

# ***PERPETUAL PAVEMENT/ LONG LASTING ASPHALT PAVEMENT***

**Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc  
Dr. Ir. Djunaedi Kosasih, M.Sc  
Yohanes Ronny, ST, MT**



**K E M E N T E R I A N P E K E R J A A N U M U M  
B A D A N P E N E L I T I A N D A N P E N G E M B A N G A N  
P U S A T P E N E L I T I A N D A N P E N G E M B A N G A N J A L A N D A N J E M B A T A N**

Jl.A.H Nasution No.264 P.O BOX 2 Bandung 40294 Indonesia Telp (022) 7802251 Fax (022) 7802726 email: [pusjatan@pusjatan.pu.go.id](mailto:pusjatan@pusjatan.pu.go.id)

# **PERPETUAL PAVEMENT/LONG LASTING ASPHALT PAVEMENT**

Penulis:

**Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc**  
**Dr. Ir. Djunaedi Kosasih, M.Sc**  
**Yohanes Ronny, ST, MT**

Cetakan Ke-1 Desember 2013

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan  
Pengembangan Jalan dan Jembatan

No. ISBN : 978-602-264-051-6

Kode Kegiatan : 01-PPK3-001 107-N13

Kode Publikasi : IRE-TR-131/ST/2013

Koordinator Penelitian

**Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc**

Editor

**Prof. (R) DR. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc**  
**Dr. Djoko Widajat, M.Sc**

Layout dan Design

**Yosi Samsul Maarif, S.Sn**

## **Penerbit :**

Kementerian Pekerjaan Umum  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan  
dan Jembatan  
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung –  
Bandung 40294  
Bekerja sama dengan  
Djatnika Bandung ( Anggota IKAPI )

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

[info@pusjatan.pu.go.id](mailto:info@pusjatan.pu.go.id)



**© PUSJATAN 2013**

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Kementerian Pekerjaan Umum Tahun 2013, pada paket pekerjaan Penyusunan Naskah Ilmiah Litbang Teknologi Jalan Ramah Lingkungan DIPA Puslitbang Jalan dan Jembatan. Pandangan-pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini merupakan pandangan penulis dan tidak selalu menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum maupun institusi pemerintah lainnya. Penggunaan data dan informasi yang dimuat di dalam publikasi ini sepenuhnya merupakan tanggung jawab penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum. Tulisan ini dapat digunakan secara bebas sebagai bahan referensi, pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seijin pemegang HAKI dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebut sumbernya.

Buku pada terbitan edisi pertama didesain dalam cetakan hitam putih, akan tetapi versi e-book dari buku ini telah didesain untuk dicetak berwarna. Buku versi e-book dapat diunduh dari website [pusjatan.pu.go.id](http://pusjatan.pu.go.id) serta untuk keperluan pencetakan bagi perorangan dan pemanfaatan non-komersial dapat dilakukan melalui pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum.



# PRAKATA

---

***Long-Life Asphalt Pavement*** didefinisikan sebagai perkerasan beraspal yang dirancang dan dibangun dengan umur 50 tahun atau lebih tanpa memerlukan rekontruksi (perbaikan struktur perkerasan) melainkan hanya memerlukan pemeliharaan (secara periodik) hanya pada lapisan permukaan.

Buku ini merupakan salah satu kontribusi dari hasil penelitian dan pengembangan yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan dalam penyediaan teknologi perkerasan lentur.

Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi para praktisi, akademisi maupun pelaksanaan lapangan.

Bandung, Desember 2013



# DAFTAR ISI

<b>Prakata</b>	<b>v</b>
<b>Daftar Isi</b>	<b>vii</b>
<b>Daftar Tabel</b>	<b>viii</b>
<b>Daftar Gambar</b>	<b>ix</b>
<b>Bab 1 Pendahuluan</b>	<b>1</b>
1.1 Pengertian Perkerasan Perpetual	1
1.2 Sejarah Perkembangan Teknologi <i>Long-Life Asphalt Pavement</i>	2
<b>Bab 2 Prosedur Desain 5</b>	
2.1 Prosedur Desain <i>Perpetual Pavement</i>	6
2.2 Pendekatan Desain <i>Long-Life Asphalt Pavement</i>	9
<b>Bab 3 Perpetual Pavement</b>	<b>11</b>
3.1 Kajian Literatur Tentang Konsep <i>Long-Life Asphalt Pavement</i>	11
3.2 Verifikasi Teori	11
3.3 Perumusan Elemen-Elemen Desain <i>Long-Life</i>	13
3.4 Identifikasi Faktor Penyebab Kerusakan Struktur Perkerasan (Data Sekunder Lendutan FWD)	19
3.5 Verifikasi Uji Laboratorium Modulus Lapisan Campuran Beraspal Akibat Variasi Bahan Uji	21
3.6 Analisis Data Sekunder Survei WIM	22
3.7 Analisis Data Sekunder Uji Laboratorium Retak Lelah	23
<b>Bab 4 Simulasi dan Verifikasi Desain</b>	<b>25</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>41</b>

# DAFTAR GAMBAR

.....

Gambar 1	Struktur <i>Long-Life Asphalt Pavement</i> Tipikal	3
Gambar 2	Prosedur Desain Long-life Asphalt Pavement	8
Gambar 3	Tahapan design perpetual pave	9
Gambar 4	Usulan model struktur sistem 10-lapisan tipikal	14
Gambar 5	Model kriteria retak lelah menurut berbagai metoda desain	17
Gambar 6	Data Lendutan FWD (Jalur A, Jawa Barat - Banten)	19
Gambar 7	Data Lendutan FWD (Jalur A, Banten - Jawa Barat)	20
Gambar 8	Data komposisi beban sumbu kendaraan, konstanta Poisson dan karakteristik campuran beraspal yang digunakan untuk simulasi desain struktur perkerasan	27
Gambar 9	Contoh data konfigurasi beban sumbu kendaraan dan data lapisan perkerasan pada program PastDean modifikasi	29
Gambar 10	Contoh data variasi modulus lapisan perkerasan dalam sehari dan data repetisi beban sumbu kendaraan pada program PastDean modifikasi	30
Gambar 11	Grafik data temperatur udara tipikal dan perkiraan temperatur perkerasan	31
Gambar 12	Grafik data variasi modulus lapisan perkerasan tipikal dalam sehari	32
Gambar 13	Contoh data konstanta model kriteria desain struktur perkerasan pada program PastDean modifikasi	33
Gambar 14	Contoh model kriteria retak lelah untuk lapisan pengikat ( <i>binder course</i> )	34
Gambar 15	Model kriteria deformasi permanen	34
Gambar 16	Contoh hasil perhitungan tegangan, regangan dan lendutan akibat beban roda tunggal dengan menggunakan program PastDean modifikasi	35



Gambar 17	Distribusi regangan tangensial di dalam struktur perkerasan dengan lapisan campuran beraspal yang tebal di tiga lokasi perhitungan	36
Gambar 18	Contoh hasil perhitungan superposisi tegangan, regangan dan lendutan akibat beban roda ganda dan derajat kerusakan dengan menggunakan program PastDean modifikasi	37
Gambar 19	Perkiraan derajat kerusakan struktur perkerasan untuk setiap kondisi yang dianalisis	38
Gambar 20	Contoh hasil perhitungan masa layan struktur perkerasan dengan menggunakan program PastDean modifikasi	38

## DAFTAR TABEL

---

Tabel 1	Tekanan angin dan jari-jari bidang kontak roda kendaraan untuk berbagai beban sumbu kendaraan yang dianalisis dalam proses simulasi	28
Tabel 2	Hasil dari proses simulasi desain perpetual pavement untuk empat variasi beban sumbu kendaraan ekuivalen	39
Tabel 3	Hasil dari proses simulasi desain struktur perkerasan untuk masa layan 80 juta lintasan untuk empat variasi beban sumbu kendaraan ekuivalen	40



# ■ 1. Pendahuluan

## 1.1 Pengertian Perkerasan Perpetual

*Long-Life Asphalt Pavement* didefinisikan sebagai perkerasan beraspal yang dirancang dan dibangun dengan umur 50 tahun atau lebih tanpa memerlukan rekonstruksi (perbaikan struktur perkerasan) melainkan hanya memerlukan pemeliharaan (secara periodik) hanya pada lapisan permukaan perkerasan untuk menghilangkan retak permukaan dan/atau memperbaiki ketidakrataan permukaan (Monismith, 1992; APA, 2002). Pada beberapa literatur, long-life asphalt pavement terkadang disebut sebagai long-lasting pavement, extended-life asphalt pavement atau perpetual pavement.

Pengalaman di negara lain memperlihatkan bahwa pendekatan mekanistik-empiris, seperti misalnya metoda Asphalt Institute (1991), dapat menghasilkan desain struktur perkerasan umur layan panjang seandainya respon struktural di dalam perkerasan dapat dibatasi tetap rendah, sehingga kerusakan struktur perkerasan hanya terjadi pada lapisan permukaan beraspal saja. Struktur perkerasan bahkan tidak perlu lebih dipertebal lagi untuk memperoleh umur layan panjang, asalkan pemeliharaan (*Preventive maintenance*) yang diperlukan harus dilaksanakan tepat waktu untuk dapat mengembalikan integritas struktur perkerasan. Meskipun demikian, keberhasilan dari struktur perkerasan umur layan panjang akan sangat ditentukan oleh tiga faktor pendukung, yaitu mutu konstruksi yang baik, fasilitas drainase yang memadai dan kontrol beban kendaraan sesuai dengan ketentuan desain.

## 1.2 Sejarah Perkembangan Teknologi *Long-Life Asphalt Pavement*

Tiga tahapan penting yang mendasari perkembangan teknologi *long-life asphalt pavement*:

1. *Full-depth pavement* dan *Deep-strength pavement* dengan pendekatan empiris (Asphalt Institute, 1970) yang didasarkan pada hasil AASHO Road Test.
2. *Shell Design Charts for Flexible Pavements* (Shell, 1963) yang didasarkan pada pendekatan analitis.
3. Pendekatan mekanistik dengan komposisi tiga lapisan beraspal yang masing-masing memiliki ketahanan terhadap retak lelah, deformasi permanen dan lingkungan (Monismith, 1992; APA, 2002).

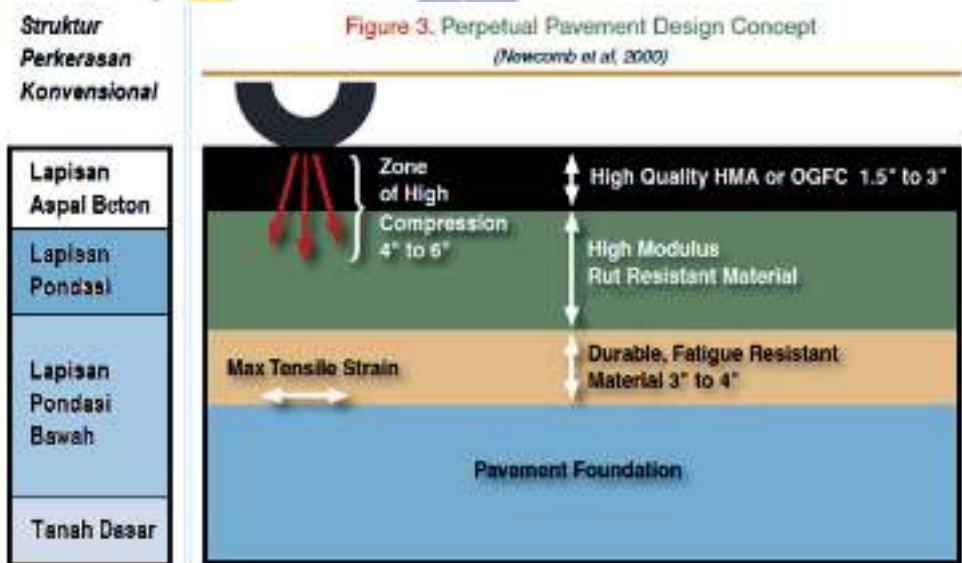
Desain struktur perkerasan untuk memikul beban lalu lintas yang tinggi pada dasarnya sudah dapat dihasilkan sejak awal tahun 60-an. Pertama, metoda Asphalt Institute (1970) mengusulkan *full-depth asphalt pavement* dan *deep-strength asphalt pavement* untuk desain struktur perkerasan yang memikul beban lalu lintas yang tinggi. Full-depth asphalt pavement merupakan struktur perkerasan berupa lapisan aspal tebal yang digelar langsung di atas tanah dasar. Sedangkan, deep-strength asphalt pavement merupakan struktur perkerasan berupa lapisan beraspal tebal yang dibangun di atas lapisan pondasi granular yang tipis.

Kedua jenis perkerasan ini dapat mereduksi regangan tarik yang terjadi pada bagian bawah lapisan beraspal sehingga mengurangi potensi terjadinya retak lelah. Meskipun demikian, teori tentang material campuran beraspal yang tahan terhadap retak lelah masih belum dapat dibedakan dengan metoda ini.

Sebagai pembanding, metoda empiris yang diaplikasikan dengan menggunakan lapisan pondasi agregat dan lapisan pondasi bawah agregat yang tebal, selain menghasilkan total ketebalan lapisan-lapisan perkerasan yang lebih tebal, juga tidak mampu memikul beban lalu lintas yang tinggi. Hal ini disebabkan karena lapisan campuran beraspal yang lebih tipis rentan terhadap kerusakan retak lelah yang terjadi akibat regangan tarik pada bagian bawah lapisan beraspal tersebut.

Kedua, metoda Shell (1963) dapat digunakan untuk desain struktur perkerasan yang memikul beban lalu lintas yang tinggi. Metoda ini merupakan metoda desain struktur perkerasan pertama yang menerapkan pendekatan mekanistik-empiris. Karakteristik material perkerasan dinyatakan langsung dengan parameter struktural, yaitu modulus dan konstanta Poisson, untuk mendukung teori analisis struktural. Kriteria kerusakan struktur perkerasan ditentukan berdasarkan dua parameter struktural utama, yaitu regangan tarik horizontal di bawah lapisan beraspal untuk mengurangi potensi terjadinya kerusakan retak lelah, dan regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar untuk mengurangi potensi terjadinya kerusakan alur. Kerusakan retak lelah umumnya dibatasi tidak melebihi 30% dari total luas permukaan perkerasan. Sedangkan, kerusakan alur dibatasi tidak melebihi 12 mm.

Selanjutnya, berbagai metoda desain struktur perkerasan berdasarkan pendekatan mekanistik-empiris telah dikembangkan untuk memikul beban lalu lintas yang tinggi, seperti metoda Asphalt Institute (1991), metoda TRRL LR-1132 (Powell, et.al., 1984), dan metoda Austroads (2010). AASHTO (2008) mengembangkan MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guideline) dalam bentuk program komputer untuk memperkirakan terjadinya kerusakan struktural dan ketidakrataan permukaan pada struktur perkerasan yang dianalisis.



(Sumber: Newcomb et al, 2000)

Gambar 1 - Struktur Long-Life Asphalt Pavement Tipikal

*Perpetual pavement* dapat diperoleh dengan pemilihan material, desain campuran beraspal dan pengujian mutu konstruksi yang baik. Gambar 1 memperlihatkan struktur *perpetual pavement* tipikal, dengan 3 lapisan campuran beraspal yang masing-masing memiliki fungsi khusus. Lapisan permukaan dirancang untuk keawetan, tahan terhadap kerusakan alur, keausan dan retak akibat temperatur. Lapisan pengikat (*binder course*) dirancang untuk memiliki modulus yang tinggi untuk efektivitas penyebaran tegangan dan tahan terhadap kerusakan alur. Sedangkan, lapisan pondasi aspal (*asphalt base*) dirancang untuk tahan terhadap kerusakan retak lelah. Gradasi agregat, tipe aspal dan kadar aspal serta kepadatan merupakan faktor utama dalam desain campuran beraspal ini.



## ■ 2. Prosedur Desain

Prinsip dasar dari desain struktur perkerasan dengan menggunakan pendekatan mekanistik-empiris adalah bahwa kombinasi dari tebal dan kekakuan lapisan perkerasan harus mencukupi untuk menghindari kerusakan alur pada permukaan tanah dasar atau permukaan tanah asli di bawahnya. Lapisan campuran beraspal juga harus cukup tebal untuk menghindari kerusakan retak lelah pada bagian bawah lapisan yang kemudian menjalar ke permukaan.

Desain struktur perkerasan yang berlandaskan pada kebijakan preservasi dapat dihasilkan dari pendekatan mekanistik-empiris dengan cara mengatur regangan kritis agar terjadi pada lapisan campuran beraspal, bukan pada tanah dasar. Sebaliknya, pekerjaan rekonstruksi kemungkinan akan diperlukan di akhir masa layan struktur perkerasan jika desain struktur perkerasan ditentukan oleh regangan kritis yang terjadi pada tanah dasar. Alternatif desain seperti ini seharusnya dihindari karena biaya rekonstruksi yang mahal atau *total life-cycle cost* yang tinggi.

Pada mulanya, proses perhitungan kerusakan retak lelah dan kerusakan alur dilakukan secara kumulatif berdasarkan teori Miner (1959) akibat variasi beban sumbu kendaraan, variasi kadar air tanah dasar akibat pengaruh musim, variasi karakteristik material perkerasan dan model kriteria desain akibat pengaruh temperatur. Kemudian, APA (2002) merangkum dari berbagai hasil penelitian laboratorium bahwa kerusakan retak lelah tidak terjadi pada benda uji campuran beraspal jika regangan yang bekerja cukup rendah, yaitu berkisar antar  $70 \div 125 \mu\epsilon$ . Demikian juga, kerusakan alur tidak terjadi pada tanah dasar jika regangan yang bekerja tidak lebih dari  $200 \mu\epsilon$ .

Oleh karena itu, konsep desain *long-life asphalt pavement* seharusnya akan lebih didasarkan pada kriteria regangan batas (atau regangan maksimum), bukan pada kerusakan kumulatif. Proses desain *long-life asphalt pavement* perlu memperhitungkan beban sumbu kendaraan terberat,

modulus tanah dasar terendah pada musim hujan dan modulus lapisan beraspal terendah pada suhu tertinggi di siang hari. Dengan demikian, masa layan *long-life asphalt pavement* menjadi tak terhingga atau disebut *perpetual pavement*.

Kerusakan terbatas pada lapisan permukaan. Jika sampai pada kerusakan kritis, lapisan permukaan digaruk dan digantikan dengan ketebalan yang sama. Material yang dibuang dapat didaur ulang. Ini memberikan solusi yang ekonomis – juga minimum biaya operasi kendaraan (BOK) karena penutupan jalan. Biaya pemeliharaan di kemudian hari terbatas juga baik.

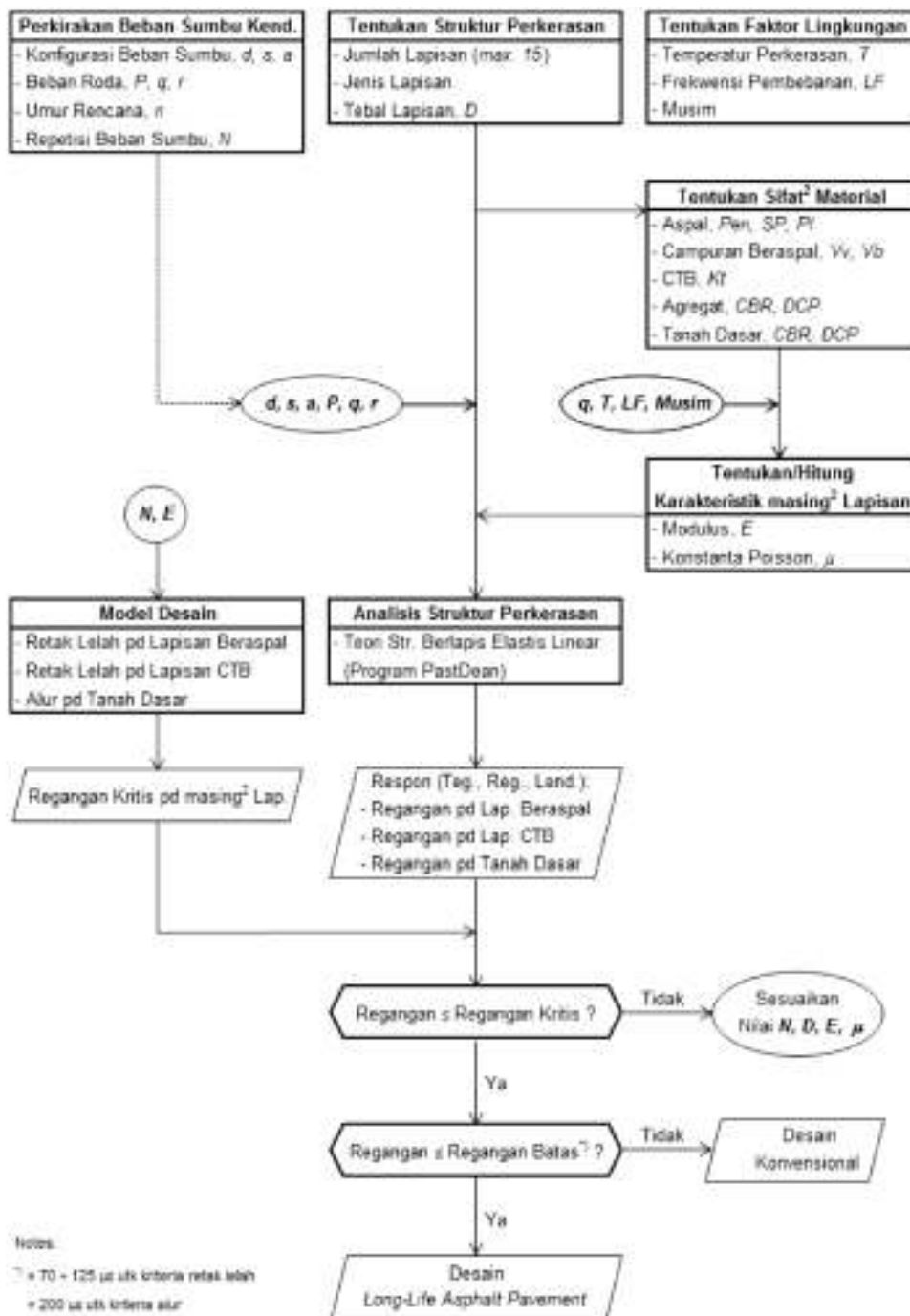
## 2.1 Prosedur Desain *Perpetual Pavement*

*Long-Life Asphalt Pavement* merupakan penajaman dari pendekatan mekanistik-empiris. Ada 5 (lima) ketentuan desain yang membedakan pendekatan *Long-Life Asphalt Pavement* dari pendekatan mekanistik-empiris konvensional, yaitu:

- a. Komposisi lapisan campuran beraspal yang terdiri dari tiga lapisan, yaitu lapisan Asphalt Base yang memiliki ketahanan terhadap retak leleh, lapisan Asphalt Binder yang memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen dan lapisan Asphalt Wearing yang memiliki ketahanan terhadap pengaruh faktor lingkungan (seperti keausan, penuaan bahan aspal dan top-down cracking).
- b. Regangan tarik horizontal yang terjadi di bawah lapisan beraspal akibat beban sumbu kendaraan terberat yang terdapat di dalam lalu lintas dibatasi tidak lebih besar dari sekitar  $70 \div 125 \mu\epsilon$ . Sedangkan, regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar dibatasi tidak lebih besar dari  $200 \mu\epsilon$ . Berdasarkan kriteria ini, desain *Long-Life Asphalt Pavement* dapat lebih ekonomis dibandingkan dengan pendekatan empiris karena tebal struktur perkerasan desain menjadi konstan dan tidak lagi dipengaruhi oleh jumlah repetisi beban sumbu standar. Secara umum, desain struktur perkerasan harus selalu didasarkan pada kriteria retak leleh yang terjadi pada lapisan campuran beraspal.



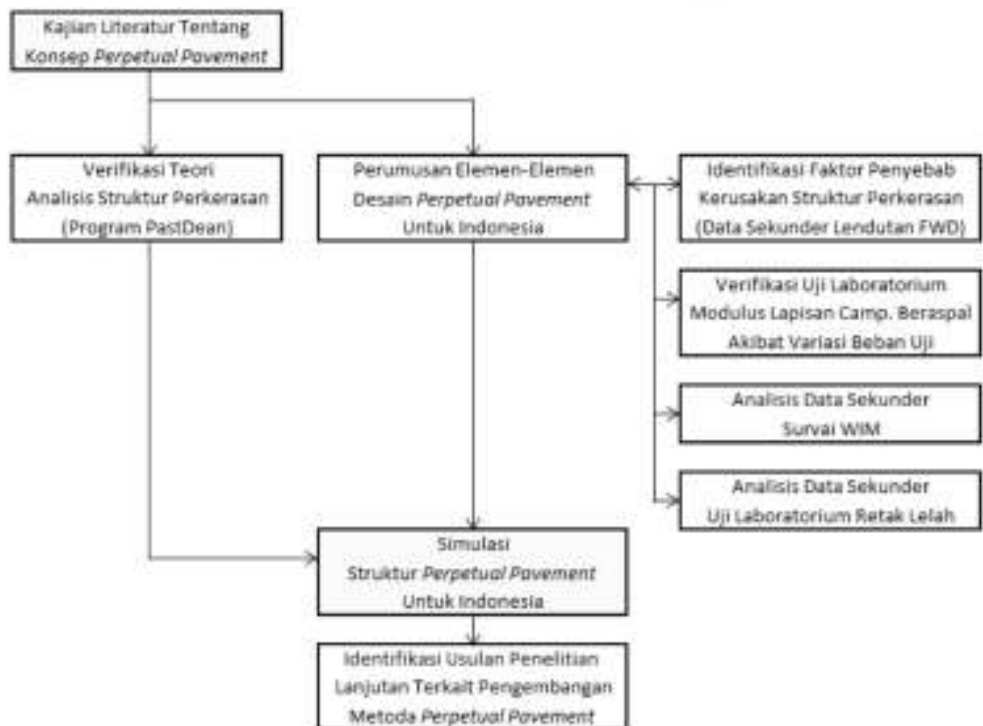
- c. Pengujian mutu dan analisis data pengujian mulai dari tanah dasar sampai dengan lapisan permukaan harus dilakukan secara teratur dan konsisten selama masa pelaksanaan konstruksi. Kontraktor perlu mengadakan fasilitas laboratorium yang dilengkapi dengan peralatan uji non destruktif yang cepat dan modern serta personil terampil yang memadai untuk memastikan kesesuaian dari struktur perkerasan yang dibangun terhadap parameter desain.
- d. Kerusakan yang terjadi pada permukaan beraspal harus diperbaiki tepat waktu. Proses daur ulang dengan cara menggaruk lapisan permukaan beraspal tersebut dan menggantikannya dengan material yang diperbaharui pada kedalaman yang sama (*mill and fill*) dapat memberikan berbagai keuntungan, seperti mempertahankan integritas struktur perkerasan, preservasi geometrik jalan dan ramah lingkungan.
- e. Biaya konstruksi *Long-Life Asphalt Pavement* tentunya akan menjadi mahal karena penggunaan lapisan campuran beraspal yang umumnya lebih tebal. Akan tetapi *life-cycle cost* mungkin bisa lebih rendah karena perkiraan biaya pemeliharaan yang lebih rendah dan biaya operasi kendaraan yg rendah selama perioda analisis ekonomi. AASHTO (2008) menyediakan model-model kerusakan struktur perkerasan yang dapat digunakan untuk perhitungan *life-cycle cost* dari *Long-Life Asphalt Pavement*.



Gambar 2 - Prosedur Desain Long-life Asphalt Pavement

## 2.2 Pendekatan Desain *Long-Life Asphalt Pavement*

Langkah pertama yang harus dilakukan yaitu melakukan kajian literatur tentang konsep *perpetual pavement* dan simulasi struktur perpetual pavement untuk Indonesia. Dari hasil kajian literatur awal terhadap konsep long-life asphalt pavement dan rancangan awal proses simulasi desain long-life asphalt pavement untuk Indonesia, ada dua komponen penting dan mendasar dari proses penelitian ini, yaitu verifikasi teori analisis struktur perkerasan dan perumusan elemen-elemen desain *long-life asphalt pavement* untuk Indonesia.



Gambar 3 - Tahapan *design perpetual pave*

Sedangkan, kegiatan yang terhubung dengan tanda panah 2-arah merupakan kegiatan pendukung untuk melakukan proses pendalaman terhadap empat elemen desain *long-life asphalt pavement*, yaitu identifikasi faktor penyebab kerusakan struktur perkerasan, verifikasi modulus campuran beraspal, analisis data beban lalu lintas dan analisis model retak lelah, dengan memanfaatkan data sekunder dan/atau data uji laboratorium terbatas.

**Catatan:**



## ■ 3. *Perpetual Pavement*

### 3.1 *Kajian Literatur Tentang Konsep Long-Life Asphalt Pavement*

Secara singkat, materi yang dikaji termasuk definisi *long-life asphalt pavement*, komposisi tipikal dari *long-life asphalt pavement*, ketentuan desain *long-life asphalt pavement*, pengadaan fasilitas drainase yang memadai, perbedaan antara prosedur desain *long-life asphalt pavement* dan prosedur desain struktur perkerasan dengan pendekatan mekanistik-empiris, empat contoh metoda desain struktur perkerasan untuk memikul beban lalu lintas yang tinggi dan kedua program komputer *GeneticBCalc* dan *PastDean* yang digunakan.

### 3.2 *Verifikasi Teori*

Analisis struktur perkerasan merupakan proses perhitungan respon struktur perkerasan (i.e. tegangan, regangan dan lendutan) akibat beban sumbu kendaraan yang dilakukan secara teoritis, apakah berdasarkan teori struktur berlapis elastis linear, teori elemen hingga, dll. Masing-masing lapisan perkerasan memiliki ketebalan tertentu, kecuali tanah dasar yang dianggap memiliki ketebalan yang tak terhingga; ikatan antar lapisan perkerasan dianggap sempurna; dan, material perkerasan dianggap bersifat elastis dan isotropik kecuali metoda Austroads (2010) yang menggunakan model anisotropik untuk karakterisasi material tanah dasar dan material lapisan agregat. Di samping itu, karakteristik material campuran beraspal yang visko-elastis masih jarang diaplikasikan. Respon struktur perkerasan juga sebenarnya dipengaruhi oleh faktor gesekan antar lapisan perkerasan dan oleh adanya lapisan keras di bawah tanah dasar.



<http://www.dot.ca.gov>

Dalam penelitian ini, program *PastDean* dimanfaatkan untuk melakukan analisis struktur perkerasan. Program *PastDean* yang dikembangkan berdasarkan program DAMA (Asphalt Institute, 1983) menggunakan teori struktur berlapis elastis linear. Proses verifikasi program *PastDean* diperlukan untuk dua maksud utama, yaitu pertama untuk membuktikan kompatibilitas program *PastDean* secara universal; dan, kedua untuk mempersiapkan program *PastDean* agar dapat digunakan dalam proses simulasi desain struktur perkerasan umur layan panjang.

Hasil yang diharapkan dari proses verifikasi ini adalah program *PastDean* modifikasi yang dapat menganalisis struktur perkerasan umur layan panjang yang dimodelkan sampai 14 lapisan atau lebih. Di samping itu, program *PastDean* modifikasi juga diharapkan dapat memperhitungkan kedua pasang roda ganda yang terdapat pada satu sumbu kendaraan, seperti pada metoda Austroads (2010), dan juga pada tahapan selanjutnya dapat memperhitungkan pengaruh dari sumbu tandem dan tridem.

Proses verifikasi teori analisis struktur perkerasan dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh dari program PastDean modifikasi secara tabelaris atau secara grafis untuk berbagai contoh desain struktur perkerasan yang diberikan dalam metoda Asphalt Institute (1991) dan metoda Austroads (2010) dan juga untuk design chart yang terdapat dalam metoda Asphalt Institute (1991), metoda Shell (1963) dan metoda TRRL LR-1132 (Powell, et.al., 1984). Baik desain struktur perkerasan maupun design chart keduanya diharapkan dapat dihasilkan dari program PastDean modifikasi secara otomatis.

### 3.3 Perumusan Elemen-Elemen *Desain Long-Life*

Elemen-elemen desain long-life asphalt pavement pada prinsipnya sama dengan yang dilakukan dalam prosedur desain berdasarkan pendekatan mekanistik-empiris. Elemen-elemen desain tersebut terdiri dari model struktur perkerasan, komposisi beban sumbu kendaraan, model karakterisasi material perkerasan, teori perhitungan respon struktur perkerasan, model kriteria desain dan ketentuan desain perpetual pavement.

Elemen-elemen desain *long-life asphalt pavement* yang diusulkan untuk Indonesia ditentukan dengan cara membandingkan empat metoda desain, yaitu metoda Asphalt Institute (1991), metoda Shell (1963), metoda TRRL LR-1132 (Powell, et.al., 1984) dan metoda Austroads (2010). Disamping itu, manual desain perkerasan jalan (Bina Marga, 2013) dipertimbangkan secara khusus dan, jika sesuai, diposisikan sebagai pilihan awal.

Usulan elemen-elemen desain *long-life asphalt pavement* ini diharapkan akan dapat menjadi pertimbangan dalam pengembangan program komputer dan design chart pada tahap penelitian selanjutnya. Program komputer desain long-life asphalt pavement diperlukan untuk proses desain secara rinci atau sebagai sarana pendukung penelitian terkait. Sedangkan, design chart umumnya diperlukan untuk proses desain praktis.

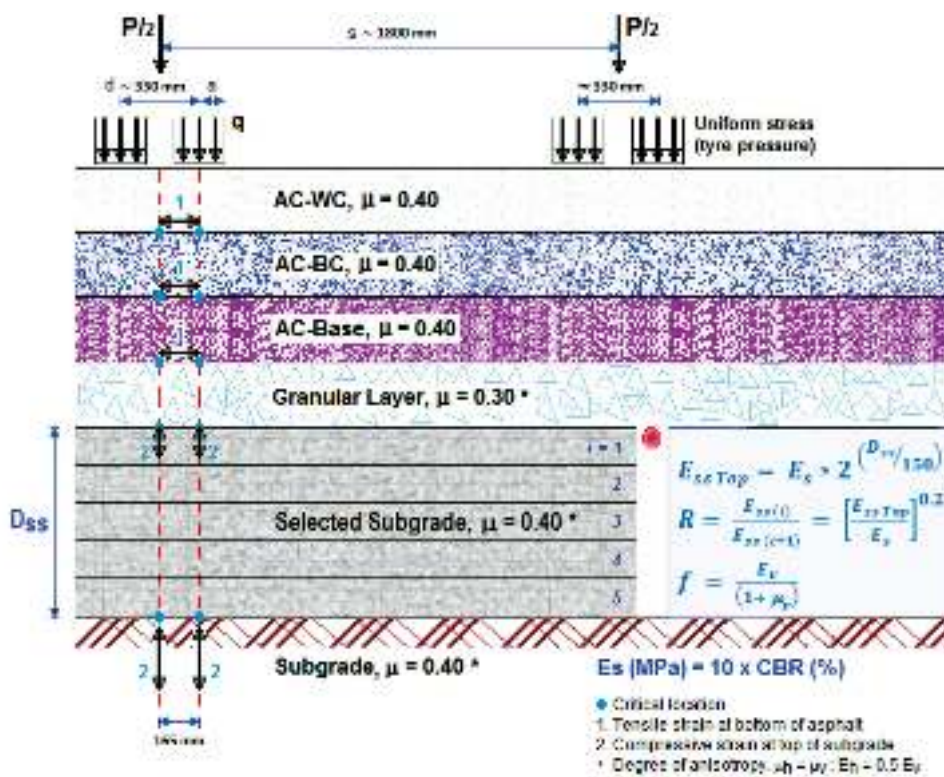
Sejumlah parameter dan model desain long-life asphalt pavement yang cocok untuk kondisi jalan di Indonesia sebenarnya masih perlu diuji dengan alat APT (*Accelerated Pavement Test*) yang sedang dibangun di Pusjatan atau diuji pada jalan percobaan skala penuh. Untuk sementara waktu, parameter dan model desain yang digunakan dalam proses simulasi desain struktur perkerasan umur layan panjang ditetapkan berdasarkan engineering judgement. Secara umum, desain struktur perkerasan



berdasarkan pendekatan mekanistik-empiris, termasuk desain perpetual pavement, memerlukan enam elemen desain utama. Berikut adalah usulan untuk keenam elemen desain utama tersebut.

### a) Usulan Model Struktur Perkerasan

Model struktur perkerasan yang diusulkan untuk keperluan desain perpetual pavement seharusnya dapat membedakan tidak kurang dari 10 lapisan perkerasan.



Gambar 4 - Usulan model struktur sistem 10-lapisan tipikal

Gambar 4 memperlihatkan usulan geometrik struktur perkerasan tipikal yang dimodelkan sebagai sistem struktur 10 lapisan, yang terdiri dari tiga lapisan campuran beraspal, satu lapisan agregat, lima lapisan capping atau improved subgrade dan tanah dasar.



## **b) Usulan Konfigurasi Beban Sumbu Kendaraan**

Pendekatan mekanistik-empiris pada dasarnya dapat menganalisis data konfigurasi dan repetisi beban sumbu kendaraan dengan tiga cara yang berbeda, yaitu:

- Data konfigurasi dan repetisi beban sumbu kendaraan terberat pada setiap kondisi struktur perkerasan (apakah data bulanan atau data setiap jam dalam setahun) untuk proses desain perpetual pavement. Data repetisi beban sumbu kendaraan terberat diperlukan di sini hanya untuk memperkirakan waktu terjadinya kerusakan retak lelah yang diakibatkan oleh regangan tarik maksimum di dalam lapisan permukaan, bukan pada interface. Selanjutnya, kebutuhan akan pemeliharaan berkala dapat diprogramkan berdasarkan waktu perkiraan tersebut. Ketepatan jadwal pelaksanaan program pemeliharaan berkala perlu diperhatikan secara khusus dalam desain perpetual pavement, agar kerusakan yang terjadi pada lapisan permukaan tidak mengganggu lapisan-lapisan lain yang ada dibawahnya.
- Data konfigurasi dan repetisi beban sumbu kendaraan campuran pada setiap kondisi struktur perkerasan untuk proses desain long-life asphalt pavement. Di sini, proses desain struktur perkerasan memerlukan waktu pemrosesan yang panjang, karena proses perhitungan harus dilakukan sebanyak spektrum beban sumbu kendaraan campuran. Proses yang lebih kompleks harus dilakukan jika spektrum beban sumbu kendaraan campuran pada setiap kondisi struktur perkerasan berbeda.
- Data konfigurasi dan repetisi beban sumbu standar (80 kN) pada setiap kondisi struktur perkerasan untuk proses desain long-life asphalt pavement. Proses desain struktur perkerasan di sini serupa dengan proses desain perpetual pavement namun memerlukan tambahan perhitungan faktor ekivalensi beban sumbu kendaraan (FE). Nilai FE di sini seharusnya dihitung secara iteratif sebagai fungsi dari berat sumbu kendaraan, tebal perkerasan dan modulus perkerasan.
- Data konfigurasi beban sumbu kendaraan pada dasarnya terdiri dari dua jenis data, yaitu data teknis sumbu kendaraan (jarak antara ban pada roda ganda, jarak antara kedua roda ganda dan jarak antara sumbu kendaraan pada sumbu tandem dan sumbu tridem) dan data

operasional kendaraan (berat sumbu kendaraan dan tekanan angin ban). Data teknis sumbu kendaraan merupakan data sekunder dari spesifikasi teknis berbagai produk dan jenis kendaraan angkutan barang. Sedangkan, data operasional kendaraan dapat diperoleh dari survai WIM dan survai wawancara.

### c) Usulan Model Karakterisasi Material Perkerasan

Model karakterisasi material perkerasan, baik material tanah dasar, lapisan agregat maupun lapisan campuran beraspal, yang diusulkan untuk digunakan dalam penelitian ini, masih didasarkan pada metoda Asphalt Institute (1983). Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk menurunkan secara khusus model karakterisasi material perkerasan yang memperhitungkan kondisi geografis dan lingkungan yang berlaku di Indonesia.

Model karakterisasi tanah dasar: Dari hasil uji laboratorium, modulus tanah dasar yang jenis materialnya bersifat kohesif diketahui merupakan fungsi dari tegangan *deviator* ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ), seperti terlihat pada Gambar 4-2a (Yoder, et.al., 1975). Pada tegangan deviator yang kecil, modulus tanah dasar berbanding terbalik terhadap tegangan deviator. Sebaliknya pada tegangan deviator yang besar, semakin besar tegangan deviator yang terjadi pada tanah dasar, modulus tanah dasar juga akan semakin besar.

Hasil yang berbeda diperlihatkan pada Gambar 4-2b (Asphalt Institute, 1983), dimana modulus tanah dasar selalu berbanding terbalik terhadap tegangan *deviator*, yang berlaku untuk rentang tegangan sel ( $\sigma_3$ ) antara  $6.9 \div 34.3$  KPa dan rentang tegangan deviator antara  $3.4 \div 103.4$  KPa. Tegangan deviator yang terjadi pada tanah dasar selain diakibatkan oleh beban roda kendaraan juga oleh tekanan akibat berat struktur perkerasan di atasnya. Tegangan deviator yang diakibatkan oleh beban roda kendaraan dapat dihitung dengan menggunakan teori struktur elastis berlapis.

### d) Usulan Teori Analisis Strtuktur Perkerasan

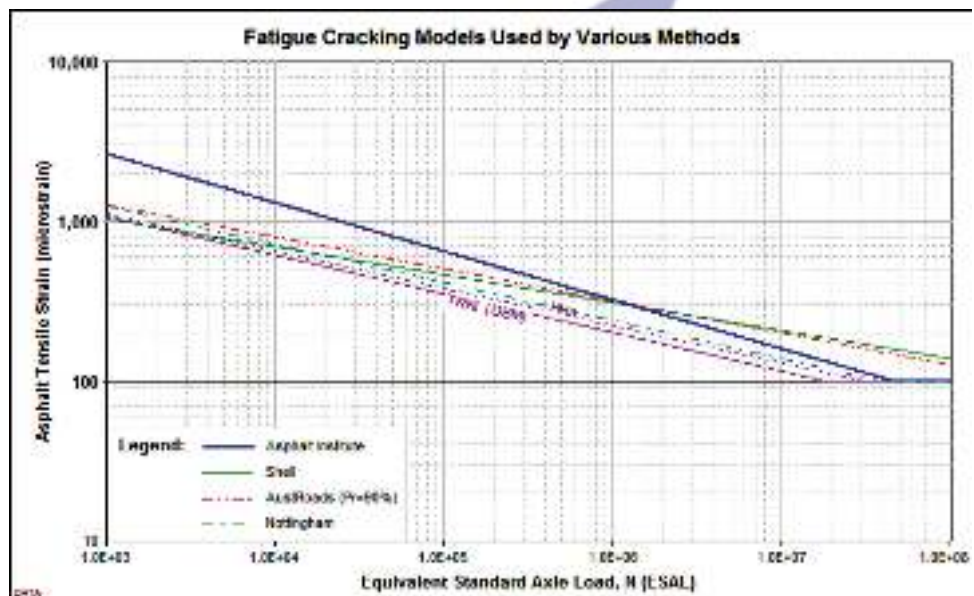
Metoda mekanistik-empiris umumnya menggunakan regangan kritis di interface sebagai kriteria desain. Penelitian ini mengusulkan untuk juga mempertimbangkan distribusi regangan yang terjadi di masing-masing lapisan, khususnya lapisan campuran beraspal. Untuk struktur perkerasan dengan lapisan campuran beraspal yang tebal, regangan

di dalam lapisan ternyata dapat lebih besar dari pada regangan di *interface*.

Selain itu, regangan geser juga perlu dikaji lebih rinci lagi untuk juga diperhitungkan dalam proses desain selain regangan tarik.

### e) Usulan Model Kriteria Desain

Dua model kriteria desain, yaitu model kerusakan retak lelah dan model kerusakan deformasi permanen menurut metoda Asphalt Institute (1983), telah digunakan dalam program PastDean modifikasi. Alasan utama pemilihan kedua model kriteria desain tersebut semata-mata adalah karena faktor konservatisme. Gambar 4-4 dan 4-5 memperlihatkan model kriteria desain menurut berbagai metoda desain, masing-masing untuk model kerusakan retak lelah dan model kerusakan deformasi permanen.



Gambar 5 - Model kriteria retak lelah menurut berbagai metoda desain

### f) Usulan Prosedur Desain

Pada penelitian ini, proses desain struktur perkerasan dengan pendekatan mekanistik-empiris diusulkan untuk menggunakan program PastDean modifikasi karena volume data yang harus dianalisis yang relatif besar dan proses perhitungan yang cukup kompleks.

Meskipun demikian perlu kiranya disampaikan di sini, bahwa program komputer untuk proses desain biasanya dimanfaatkan secara terbatas hanya untuk keperluan penelitian atau desain struktur perkerasan yang sifatnya khusus, seperti untuk desain perpetual pavement, pembebanan lalu lintas yang tinggi, penggunaan teknologi material baru, faktor lingkungan ekstrim, dan sebagainya.

Sedangkan, proses desain struktur perkerasan secara manual dengan menggunakan design chart atau program komputer sederhana (simplified) diperlukan untuk kebutuhan desain praktis. Dalam hal ini, proses desain umumnya dilakukan dengan menggunakan nilai wakil, seperti misalnya data beban sumbu standar ekivalen, modulus perkerasan rata-rata, dan sebagainya. Program PastDean modifikasi dapat juga digunakan menghasilkan *design chart*. Meskipun demikian, kesesuaian dari design chart yang dihasilkan tersebut masih perlu dikaji lebih lanjut, termasuk dengan menggunakan alat APT, pada tahapan penelitian selanjutnya.

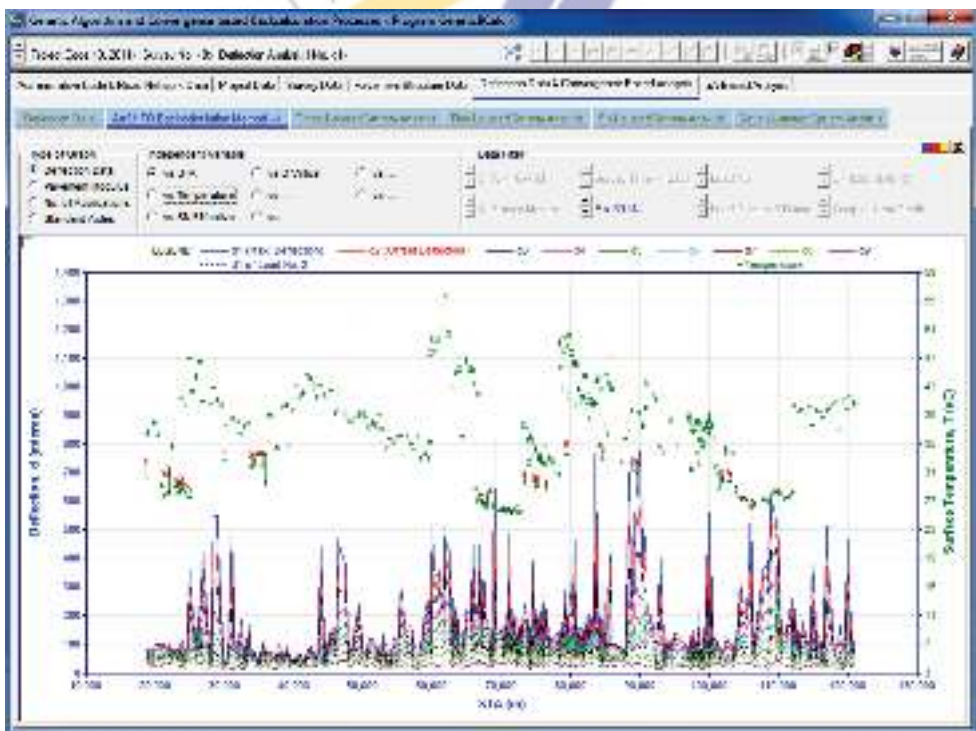
Prosedur desain struktur perkerasan alternatif yang mungkin perlu dipertimbangkan pada tahapan pengembangan selanjutnya adalah terkait dengan konsep manajemen jalan. Proses desain struktur perkerasan, tidak lagi ditujukan untuk menghitung tebal lapisan perkerasan yang diperkirakan akan mampu melayani repetisi beban sumbu kendaraan desain, melainkan untuk memperkirakan tipe dan luas kerusakan yang mungkin terjadi pada struktur perkerasan desain selama masa layan. Prosedur desain struktur perkerasan berdasarkan konsep ini telah digunakan dalam metoda MEPDG (AASHTO, 2008).

Mengingat kondisi geografis yang cukup luas dan beragam, pedoman desain struktur perkerasan dapat saja dikembangkan untuk berlaku umum di seluruh wilayah di Indonesia. Selanjutnya dari pedoman desain tersebut, masing-masing wilayah dapat menurunkan sendiri manual desain struktur perkerasan yang sifatnya lebih khusus sesuai dengan kondisi geografis di wilayahnya masing-masing.

### 3.4 Identifikasi Faktor Penyebab Kerusakan Struktur Perkerasan (*Data Sekunder Lendutan FWD*)

Berdasarkan prosedur desain dengan pendekatan mekanistik-empiris, kerusakan retak leleh pada struktur perkerasan ditentukan oleh regangan tarik horizontal di bawah lapisan campuran beraspal dan kerusakan alur oleh regangan tekan vertikal di permukaan tanah dasar. Selain itu, metoda desain struktur perkerasan berdasarkan pendekatan mekanistik-empiris secara manual pada umumnya memperhitungkan kedua nilai regangan tersebut hanya akibat beban sumbu standar dengan menggunakan nilai modulus dan model retak leleh wakil.

Untuk keperluan penelitian dan proses desain khusus, metoda desain struktur perkerasan secara terkomputerisasi perlu dilakukan dengan langsung memperhitungkan berbagai kondisi struktur perkerasan dan beban sumbu kendaraan yang mungkin terjadi. Terlebih lagi, konsep desain long-life asphalt pavement harus dapat memperhitungkan kondisi struktur perkerasan terlemah dan beban sumbu kendaraan terberat yang mungkin terjadi.



Gambar 6 - Data Lendutan FWD (Jalur A, Pantura-Banten)





### 3.5 Verifikasi Uji Laboratorium Modulus Lapisan Campuran Beraspal Akibat Variasi Bahan Uji

Model matematis modulus lapisan campuran beraspal yang ada pada saat ini merupakan fungsi dari temperatur, lama pembebanan, sifat-sifat bahan aspal dan komposisi campuran beraspal, tetapi masih belum menyertakan variabel tegangan (Asphalt Institute, 1991; Shell, 1963; Powell, et.al., 1984; Austroads, 2010). Di lain pihak, modulus lapisan campuran beraspal yang dihasilkan dari proses backcalculation terhadap data lendutan FWD diketahui bervariasi tergantung pada beban survai (tegangan) yang digunakan. Perbedaan ini mungkin semata-mata disebabkan karena model matematis diturunkan hanya terhadap beban sumbu standar saja. Pengaruh dari beban sumbu kendaraan lainnya diperhitungkan melalui faktor ekivalensi beban. Namun demikian, jika pengaruh dari overloading harus diperhitungkan dengan lebih realistis, maka model matematis modulus lapisan campuran beraspal tentunya perlu disesuaikan dengan menyertakan variabel tegangan.

Pada penelitian ini, pengujian modulus lapisan campuran beraspal dilakukan secara terbatas terhadap beberapa contoh benda uji yang telah tersedia di laboratorium dengan memvariasikan tegangan yang bekerja. Untuk memberikan gambaran yang lebih lengkap, suhu benda uji dan lama pembebanan juga divariasikan.

Hasil yang diharapkan di sini adalah dalam bentuk konfirmasi apakah benar model matematis modulus lapisan campuran beraspal merupakan fungsi dari tegangan. Sedangkan, proses modifikasi model matematis tersebut yang menyertakan tambahan variabel tegangan tidak dilakukan pada penelitian ini tetapi perlu dipertimbangkan untuk dilakukan pada penelitian lanjutan.

Metoda pengujian modulus lapisan campuran beraspal yang digunakan mengacu pada standar pengujian AASHTO TP 62-07.

Disamping itu, database hasil pengujian modulus lapisan campuran beraspal dari penelitian terdahulu direncanakan untuk dikembangkan dalam penelitian ini untuk memperoleh gambaran tentang karakteristik campuran beraspal terbaik pada temperatur puncak yang mungkin dapat diperoleh khususnya untuk binder course (nilai modulus yang besar). Sedangkan,

karakteristik campuran beraspal terbaik untuk lapisan asphalt base (tahan terhadap retak lelah) ditentukan dari analisis database model retak lelah

### 3.6 Analisis Data Sekunder Survai WIM

Data survai WIM (*Weigh In-Motion*) terdiri dari data volume dan komposisi beban sumbu kendaraan yang dikategorikan berdasarkan jenis kendaraan pada lokasi ruas jalan tertentu. Dalam pemakaiannya, data survai WIM masih perlu dilengkapi dengan data tekanan angin ban (khususnya untuk pendekatan mekanistik-empiris), data distribusi volume kendaraan pada setiap lajur jalan, dan data lintas harian rata-rata tahunan.

Pada umumnya, kurva desain struktur perkerasan dibuat hanya berdasarkan beban sumbu standar seberat 80 kN yang disalurkan lewat dua roda ganda pada masing-masing ujungnya. Sedangkan, beban sumbu kendaraan lainnya dikonversikan ke dalam beban sumbu standar dengan menggunakan faktor ekuivalen beban. Salah satu rumus pendekatan dalam menentukan faktor ekuivalen beban adalah persamaan Liddle yang merupakan fungsi pangkat empat (TRRL, 1977). Sedangkan, dalam pendekatan mekanistik-empiris, proses desain dapat dilakukan untuk setiap kategori beban sumbu kendaraan dengan menerapkan teori Miner (1959); dan, untuk keperluan desain struktur perkerasan umur layan panjang, beban sumbu kendaraan terberat juga digunakan dalam menentukan nilai regangan batas,

Ada tiga hasil yang diharapkan dari analisis data sekunder survai WIM ini. Pertama, contoh perhitungan faktor ekuivalen beban baik berdasarkan pendekatan empiris (AASHTO, 1993) maupun berdasarkan pendekatan mekanistik-empiris (Asphalt Institute, 1991); kedua, contoh data komposisi beban sumbu kendaraan untuk desain struktur perkerasan berdasarkan pendekatan mekanistik-empiris yang akan diusulkan untuk penelitian lanjutan; dan ketiga, contoh data beban sumbu kendaraan terberat untuk simulasi desain struktur perkerasan umur layan panjang.

Analisis data sekunder survai WIM dilakukan dengan cara membandingkan data survai WIM dari penelitian lain yang sedang dikerjakan di Pusjatan (2013) dengan contoh data komposisi beban sumbu kendaraan yang terdapat pada manual desain struktur perkerasan jalan (Bina Marga, 2013). Sedangkan, contoh data teknis sumbu kendaraan dan ban diperoleh dari informasi yang tersedia di internet dan wawancara kepada operator



kendaraan komersial/bus secara terbatas. Jika diperlukan, beban sumbu kendaraan terberat untuk simulasi desain struktur perkerasan umur layan panjang ditentukan secara hipotetis.

### 3.7 Analisis Data Sekunder Uji Laboratorium Retak Lelah

Model retak lelah lapisan campuran beraspal pada dasarnya perlu diteliti melalui uji laboratorium secara komprehensif dan divalidasi melalui long-term performance study pada jalan percobaan skala penuh. Rencana pembangunan fasilitas APT di Pusjatan merupakan langkah awal untuk proses validasi model retak lelah yang cocok dengan kondisi jalan di Indonesia. Sementara ini, pegujian retak lelah lapisan campuran beraspal di laboratorium sebenarnya sudah sering dilakukan secara terbatas pada nilai modulus atau suhu benda uji tertentu untuk melengkapi data JMF (Job Mix Formula). Pegujian retak lelah lapisan campuran beraspal untuk keperluan desain long-life asphalt pavement pada dasarnya perlu dilakukan secara lebih komprehensif.

Maksud dari analisis data sekunder uji laboratorium retak lelah adalah untuk membangun database yang dapat mengkompilasi data hasil pengujian retak lelah lapisan campuran beraspal yang sudah dan yang akan dilakukan. Model matematis retak lelah yang digunakan dalam metoda Asphalt Institute (1991), metoda Shell (1963), metoda TRRL LR-1132 (Powell, et.al., 1984) dan metoda Austroads (2010) juga disertakan sebagai referensi.

Hasil dari analisis data sekunder uji laboratorium retak lelah adalah dalam bentuk usulan model retak lelah yang diadopsi dari referensi model matematis yang ditinjau. Usulan model retak lelah ini kemudian digunakan untuk simulasi desain struktur perkerasan umur layan panjang.

Untuk sementara, pemilihan model matematis retak lelah hanya dilakukan secara grafis dan berdasarkan Engineering judgment. Kombinasi karakteristik campuran beraspal (nilai modulus dan jenis campuran) yang digunakan dalam model matematis yang dipilih tersebut juga turut dipertimbangkan.

**Catatan:**



## ■ 4. Simulasi dan Verifikasi Desain

Salah satu pertanyaan yang paling mendasar untuk dijawab pada penelitian ini adalah “apakah *long-life asphalt pavement* mungkin dapat dibangun di Indonesia”. Dengan melakukan proses simulasi desain struktur perkerasan umur layan panjang, pertanyaan ini diharapkan akan dapat terjawab.

Simulasi desain struktur perkerasan umur layan panjang dilakukan dengan menggunakan data sekunder, model-model yang diusulkan dan program *PastDean* modifikasi, seperti yang telah diuraikan di atas. Berbagai kemungkinan variasi data desain turut dianalisis dalam proses simulasi, termasuk analisis sensitivitas.

Maksud dari proses simulasi ini adalah untuk memperlihatkan kelebihan



<http://www.betterroads.com>

dan/atau keterbatasan dari desain struktur perkerasan umur layan panjang, relatif terhadap desain struktur perkerasan berdasarkan pendekatan mekanistik-empiris. Selain itu, proses simulasi ini dimaksudkan untuk merangkum ketentuan tentang data desain dan pengujian laboratorium yang diperlukan, dan identifikasi usulan penelitian lanjutan, termasuk pemanfaatan alat APT untuk menunjang keberhasilan implementasi dari desain struktur perkerasan umur layan panjang.

Simulasi desain *long-life asphalt pavement* dilakukan dengan menggunakan usulan elemen-elemen desain struktur perkerasan dan program PastDean modifikasi, seperti yang telah diuraikan pada sub-bab sebelumnya. Untuk proses simulasi ini, struktur perkerasan hanya dimodelkan sebagai sistem struktur 5-lapisan. Ada dua variasi desain struktur perkerasan yang disajikan, yaitu:

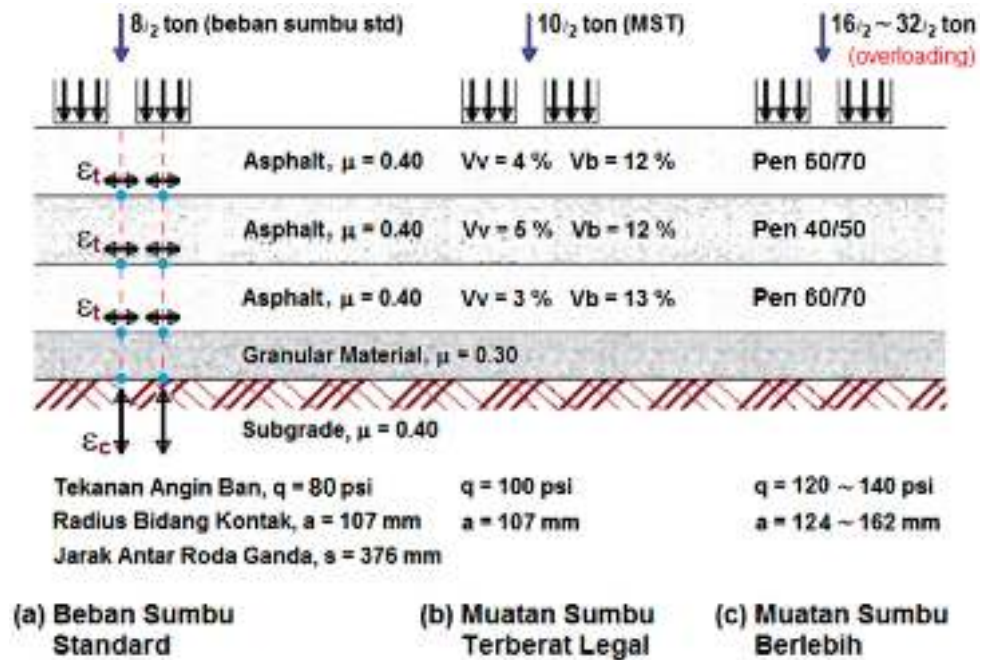
- Simulasi desain *perpetual pavement* berdasarkan regangan batas pada interface dengan membatasi regangan tarik pada lapisan beraspal agar tidak lebih dari  $100 \mu\epsilon$  dan regangan tekan pada tanah dasar agar tidak lebih dari  $200 \mu\epsilon$ . Proses desain ini pada prinsipnya hanya didasarkan pada kondisi struktur perkerasan terlemah (yaitu pada saat nilai modulus perkerasan terendah) dan beban sumbu kendaraan terberat.
- Simulasi desain struktur perkerasan untuk repetisi 80 juta beban sumbu kendaraan berdasarkan regangan kritis pada interface. Regangan yang terjadi di dalam struktur perkerasan akibat beban sumbu kendaraan berat diijinkan untuk melampaui regangan batas. Derajat kerusakan yang diakibatkan oleh setiap lintasan beban sumbu kendaraan yang memberikan regangan yang besar diakumulasikan dengan menggunakan teori Miner (1959). Pada dasarnya, proses desain ini seharusnya akan lebih kompleks karena variasi beban sumbu kendaraan dan variasi modulus perkerasan dalam sehari yang harus diperhitungkan dalam proses desain.

Regangan tarik maksimum sebenarnya dapat terjadi di dalam lapisan permukaan, tidak selalu pada interface. Jika regangan tarik maksimum terjadi di dalam lapisan permukaan, maka kerusakan pada lapisan permukaan dapat terjadi lebih awal. Frekwensi pemeliharaan berkala akan ditentukan oleh kerusakan pada lapisan permukaan ini.

Data umum: Program *PastDean* modifikasi mengelompokkan data

umum yang diperlukan untuk proses desain struktur perkerasan ke dalam 4 kelompok data, yaitu data konfigurasi beban sumbu kendaraan, data lapisan perkerasan, data variasi bulanan (atau data variasi per jam) dan data konstanta model kriteria desain.

Karakteristik masing-masing campuran beraspal, konstanta Poisson



Gambar 8 - Data komposisi beban sumbu kendaraan, konstanta Poisson dan karakteristik campuran beraspal yang digunakan untuk simulasi desain struktur perkerasan

dari setiap lapisan perkerasan dan variasi beban sumbu kendaraan terberat yang digunakan dalam proses simulasi diperlihatkan pada Gambar 8. Jarak antara dua roda ganda ditetapkan sebesar 376 mm, yang sama untuk semua variasi beban sumbu kendaraan terberat yang dianalisis, termasuk dua beban sumbu kendaraan yang overloading, yaitu masing-masing sebesar 16 ton dan 32 ton.

Tabel-1 memperlihatkan hasil perhitungan jari-jari bidang kontak untuk berbagai beban sumbu kendaraan, dengan asumsi tekanan angin ban pada bidang kontak yang umum dijumpai di lapangan, yaitu antara 80 ÷ 140 psi. Sumbu tandem, sumbu tridem, dst. sebenarnya saling mempengaruhi dalam proses analisis kekuatan struktur perkerasan. Namun, untuk sementara,

masing-masing sumbu kendaraan masih dianalisis secara terpisah.

Beban sumbu kendaraan campuran juga masih belum dapat dianalisis dengan menggunakan program PastDean modifikasi. Seperti telah dijelaskan di atas, desain struktur perkerasan yang memperhitungkan beban sumbu kendaraan campuran memerlukan data dan proses perhitungan yang lebih panjang dan rumit. Pengaruh dari beban sumbu kendaraan campuran diharapkan akan dapat dianalisis dengan menggunakan program perpetual pavement yang diusulkan untuk dikembangkan pada tahapan penelitian selanjutnya.

Gambar 9 memperlihatkan data konfigurasi beban sumbu kendaraan

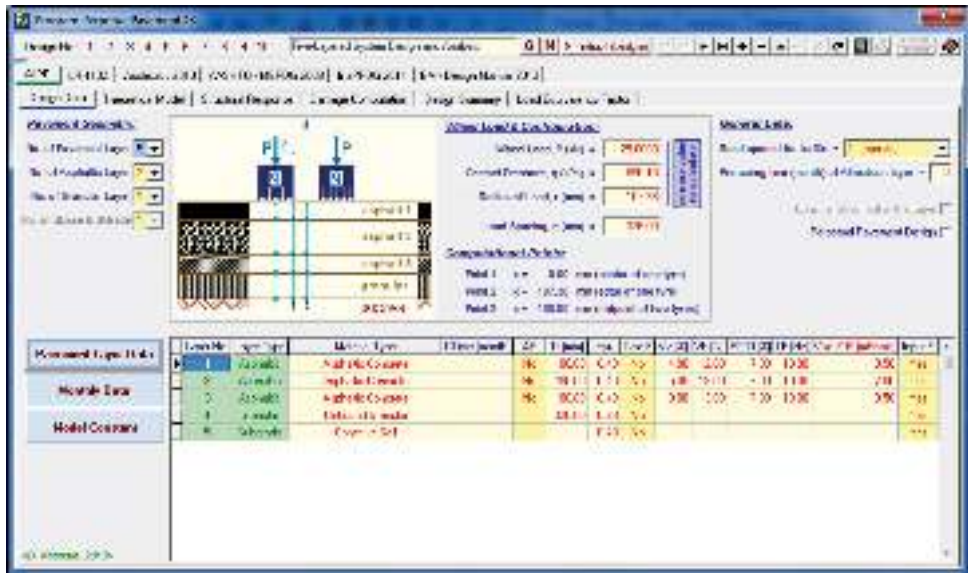
**Tabel 1 - Tekanan angin dan jari-jari bidang kontak roda kendaraan utk berbagai beban sumbu kendaraan yang dianalisis dalam proses simulasi**

No.	Beban Sumbu Kend., P Total (kN)	P (kN)	Tekanan Angin Ban,		Jari2 Bidang Kontak, a (mm)
			q (psi)	q (KPa)	
1	80	20	80	552.11	107.38
2	100	25	100	690.13	107.38
3	160	40	120	828.16	123.99
4	240	60	130	897.17	145.90
5	320	80	140	966.19	162.35

dan data lapisan perkerasan berdasarkan metoda Asphalt Institute (1991). Program PastDean modifikasi menyediakan sepuluh no. desain, dimana no. desain 1, 2 dan 3 berturut-turut digunakan untuk proses desain struktur perkerasan sistem 3-lapisan, 4-lapisan dan 5-lapisan. Sedangkan, no. desain lainnya diperuntukkan secara khusus untuk beberapa contoh desain, yang digunakan dalam proses verifikasi program PastDean modifikasi. Komposisi struktur perkerasan secara umum didefinisikan berdasarkan jumlah lapisan campuran beraspal, lapisan agregat dan tanah dasar. Dalam proses simulasi, struktur perpetual pavement yang dimodelkan sebagai sistem 5-lapisan terdiri dari tiga lapisan campuran beraspal, satu lapisan agregat dan satu tanah dasar.

Data konfigurasi beban sumbu kendaraan akan menentukan lokasi





Gambar 9 - Contoh data konfigurasi beban sumbu kendaraan dan data lapisan perkerasan pada program PastDean modifikasi

perhitungan tegangan, regangan dan lendutan yang terjadi di dalam struktur perkerasan, yaitu di bawah pusat roda, di bawah dinding roda dan di bawah antara kedua roda kendaraan. Untuk beban roda tunggal, lokasi perhitungan ketiga diposisikan pada jarak 75 cm dari dinding roda.

Data bulan sebagai awal pengoperasian jalan setelah masa konstruksi diperlukan agar konsistensi terhadap model prediksi kerusakan struktur perkerasan dengan ketelitian bulan. Di samping itu, dua pilihan proses desain disediakan masing-masing untuk menghitung distribusi regangan di dalam lapisan (pilihan ini masih belum diaktifkan) dan untuk variasi regangan batas.

Data lapisan perkerasan terdiri dari data tebal lapisan, konstanta Poisson dan karakteristik material campuran beraspal (yaitu volume rongga, volume aspal, kandungan filler, frekwensi pembebanan dan viskositas aspal). Data karakteristik material campuran beraspal, jika diperlukan, digunakan untuk memperkirakan modulus lapisan beton aspal. Modulus lapisan beton aspal atau modulus lapisan beton aspal emulsi juga dapat dinyatakan di sini sebagai data input.

Data volume rongga, volume aspal dan modulus lapisan campuran

beraspal digunakan untuk menentukan model kriteria retak lelah dari lapisan campuran beraspal. Nilai modulus lapisan campuran beraspal yang variatif akibat perubahan temperatur lapisan akan menghasilkan model kriteria retak lelah yang bervariasi.

Data konstanta Poisson dan karakteristik material campuran beraspal yang digunakan untuk proses simulasi desain perpetual pavement diperlihatkan pada Gambar 9. Sedangkan, data tebal lapisan perkerasan diubah-ubah di sini secara iteratif untuk memperoleh hasil desain yang diinginkan.

Gambar 10 memperlihatkan data temperatur udara, modulus perkerasan dan beban lalu lintas yang bervariasi dalam setahun (data bulanan) atau dalam sehari (data per jam dalam setahun). Data temperatur udara, jika diperlukan, digunakan untuk memperkirakan temperatur lapisan- lapisan campuran beraspal yang selanjutnya memperkirakan nilai modulus dari masing-masing lapisan campuran beraspal tersebut.

Di negara beriklim tropis seperti Indonesia, temperatur lapisan campuran beraspal bervariasi lebih nyata dalam sehari dibandingkan dengan data bulanan. Jika data modulus perkerasan telah tersedia, maka data tersebut dapat langsung diinput di sini.

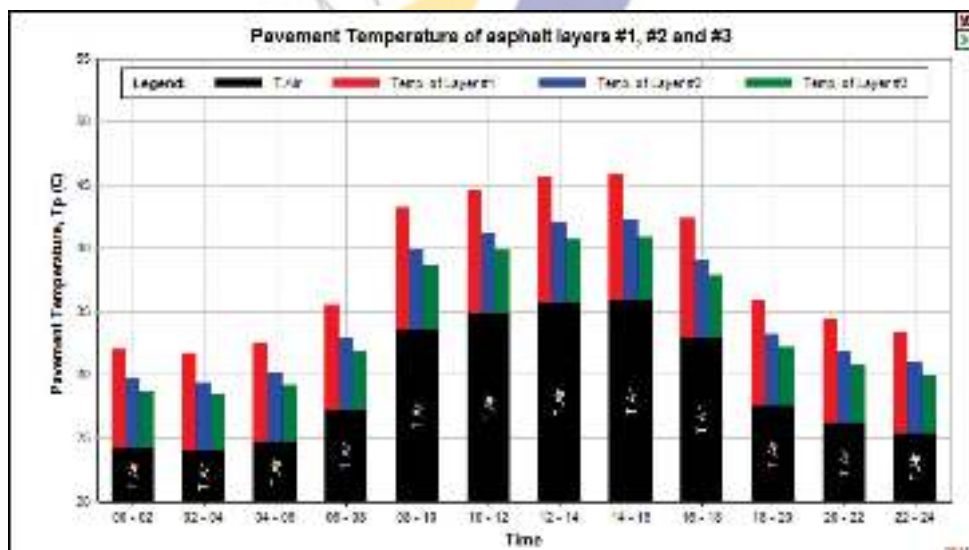
Perkiraan temperatur perkerasan berdasarkan data temperatur



Gambar 10 - Contoh data variasi modulus lapisan perkerasan dalam sehari dan data repetisi beban sumbu kendaraan pada program PastDean modifikasi



udara tipikal berdasarkan model Asphalt Institute (1991) diperlihatkan pada Gambar 11. Secara umum, temperatur perkerasan dan temperatur udara yang tinggi terjadi di dalam rentang waktu antara jam 08:00 sampai 18:00. Meskipun demikian, temperatur perkerasan yang dihasilkan terlihat selalu lebih tinggi dari pada temperatur udara, dan temperatur lapisan perkerasan yang lebih bawah selalu lebih rendah dari pada temperatur lapisan perkerasan yang di atasnya. Kenyataannya di malam hari temperatur lapisan perkerasan yang lebih bawah seringkali dapat lebih tinggi dari pada temperatur lapisan perkerasan yang diatasnya; dan, di pagi hari temperatur perkerasan dapat lebih rendah dari pada temperatur udara. Oleh karena itu, model perkiraan temperatur perkerasan yang digunakan perlu disesuaikan seperlunya sebelum diterapkan di Indonesia. Untuk proses simulasi desain perpetual pavement, modulus lapisan campuran beraspal untuk sementara diperkirakan terlebih dahulu secara rasional berdasarkan beberapa hasil pengujian laboratorium dan hasil perhitungan balik dari data lendutan FWD terdahulu.

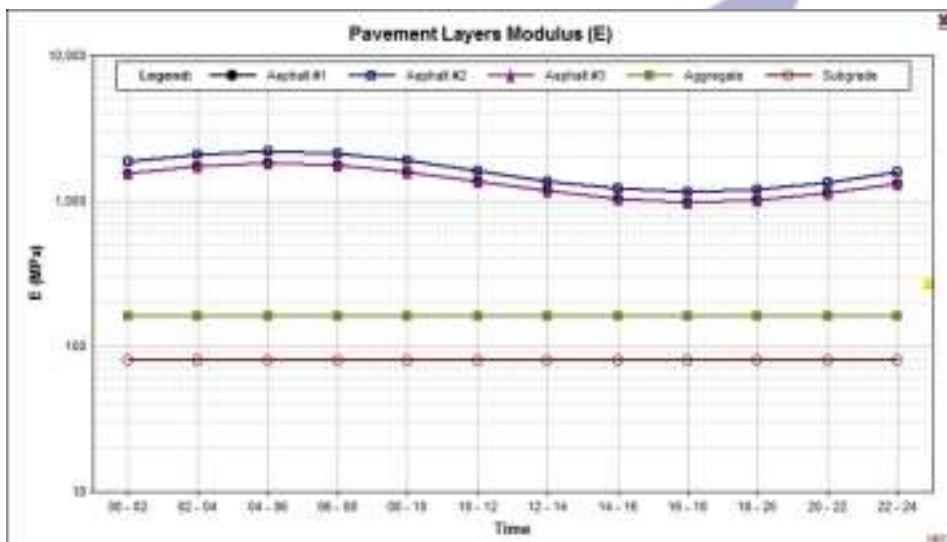


Gambar 11 - Grafik data temperatur udara tipikal dan perkiraan temperatur perkerasan

Nilai CBR tanah dasar yang digunakan untuk proses simulasi desain perpetual pavement adalah 8%, yang dianggap setara dengan nilai modulus 80 MPa; nilai modulus lapisan agregat ditetapkan secara konservatif, yaitu

sebesar dua kali nilai modulus tanah dasar; dan, nilai modulus dari tiga lapisan beraspal (surface course, binder course dan asphalt base) ditetapkan bervariasi sebagai fungsi dari temperatur lapisan campuran beraspal dalam sehari, seperti terlihat pada Gambar 12, dimana nilai modulus lapisan permukaan dianggap sama dengan nilai modulus lapisan pondasi beraspal.

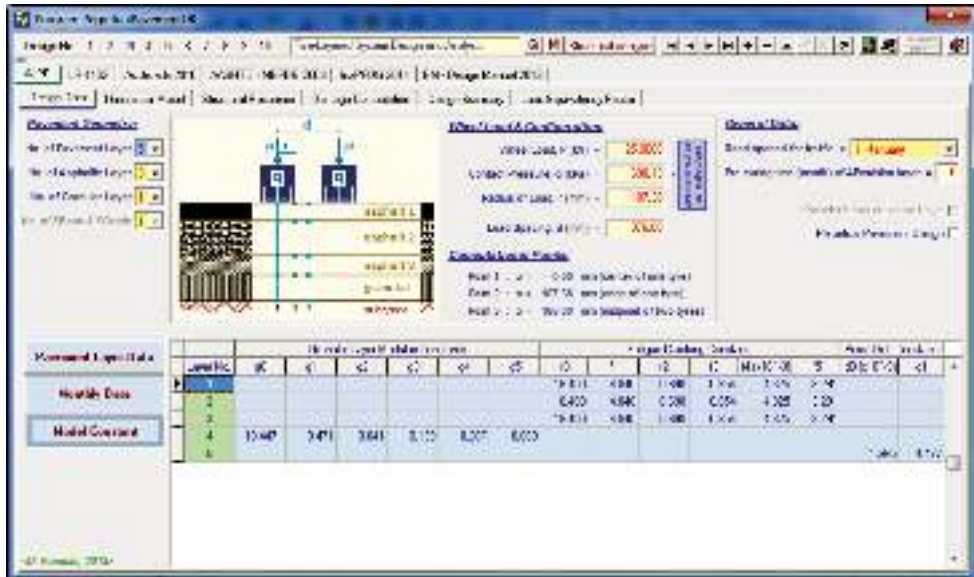
Dalam metoda mekanistik, pengaruh dari setiap konfigurasi beban sumbu kendaraan terhadap kerusakan struktur perkerasan pada prinsipnya juga dapat diperkirakan dan dianggap bersifat akumulatif dengan menggunakan teori Miner (1959). Untuk itu, data repetisi beban sumbu kendaraan yang melintas dalam rentang waktu analisis (apakah bulanan atau per jam dalam setahun) perlu dibedakan untuk setiap konfigurasi beban sumbu kendaraan. Konsep beban sumbu standar ekivalen masih dapat digunakan untuk mempermudah proses perhitungan tetapi dengan menggunakan faktor ekivalen beban sumbu kendaraan yang berbeda (Austroads, 2010).



Gambar 12 - Grafik data variasi modulus lapisan perkerasan tipikal dalam sehari

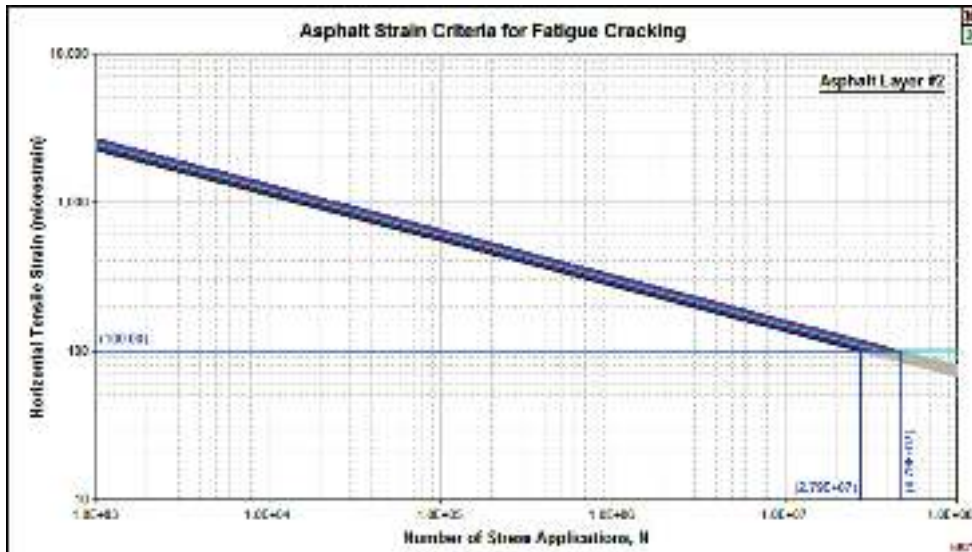
Proses simulasi desain perpetual pavement yang dilakukan dalam penelitian ini didasarkan pada beban sumbu kendaraan terberat. Masa layan struktur perkerasan dinyatakan dalam repetisi beban sumbu kendaraan terberat, sehingga data repetisi beban sumbu kendaraan terberat pada Gambar 4-10 dapat diisi dengan nilai sembarang asalkan tidak nol karena tidak akan berpengaruh terhadap hasil desain yang diperoleh.

Data umum terakhir yang diperlukan di sini adalah data konstanta model kriteria desain struktur perkerasan, seperti terlihat pada Gambar 13. Ada tiga konstanta model yang diperlukan, yaitu konstanta model kriteria retak leleh, konstanta model modulus lapisan agregat dan konstanta model kriteria deformasi permanen. Ketiga data konstanta model merupakan nilai default yang didasarkan pada metoda Asphalt Institute (1991).



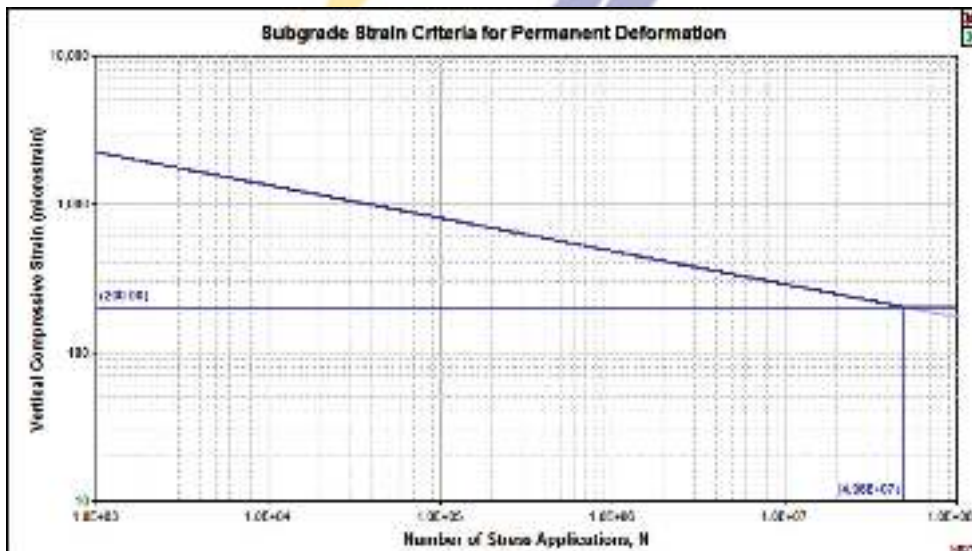
Gambar 13 - Contoh data konstanta model kriteria desain struktur perkerasan pada program PastDean modifikasi

Model kriteria retak leleh selain merupakan fungsi dari regangan tarik horizontal juga merupakan fungsi dari karakteristik campuran beraspal (yaitu rongga udara dan volume aspal) dan modulus lapisan campuran beraspal. Karena nilai modulus lapisan campuran beraspal bervariasi sesuai dengan variasi data temperatur lapisan, maka model kriteria retak leleh juga bervariasi, seperti terlihat pada contoh untuk lapisan pengikat (binder course) di Gambar 14.



Gambar 14 - Contoh model kriteria retak lelah untuk lapisan pengikat (*binder course*)

Regangan batas sebesar 100  $\mu\epsilon$  untuk penerapan konsep perpetual pavement diperlihatkan pada gambar. Pengaruh dari jenis campuran beraspal, seperti SMA (split mastic asphalt), aspal poros, campuran dengan aspal modifikasi, dsb., terhadap model kriteria retak lelah perlu dikaji lebih lanjut.



Gambar 15 - Model kriteria deformasi permanen



Gambar 15 memperlihatkan model deformasi permanen yang hanya merupakan fungsi dari regangan tekan vertikal pada tanah dasar. Pada gambar ini diperlihatkan regangan batas sebesar  $200 \mu\epsilon$  untuk penerapan konsep perpetual pavement.

Model modulus lapisan agregat merupakan model pendekatan untuk menghindari proses perhitungan modulus yang sifatnya iteratif terhadap tegangan total (bulk stress) yang terjadi di dalam lapisan agregat (Asphalt Institute, 1982). Sebagai catatan, modulus tanah dasar juga merupakan fungsi dari tegangan deviator. Sedangkan, informasi tentang pengaruh dari beban roda kendaraan terhadap modulus lapisan campuran beraspal masih terbatas dan perlu dikaji lebih lanjut. Perhitungan iteratif seharusnya dapat diselesaikan secara mudah dengan menggunakan program komputer. Di lain pihak, fasilitas peralatan laboratorium untuk karakterisasi material perkerasan (tanah dasar, lapisan agregat dan lapisan campuran beraspal) umumnya masih terbatas.

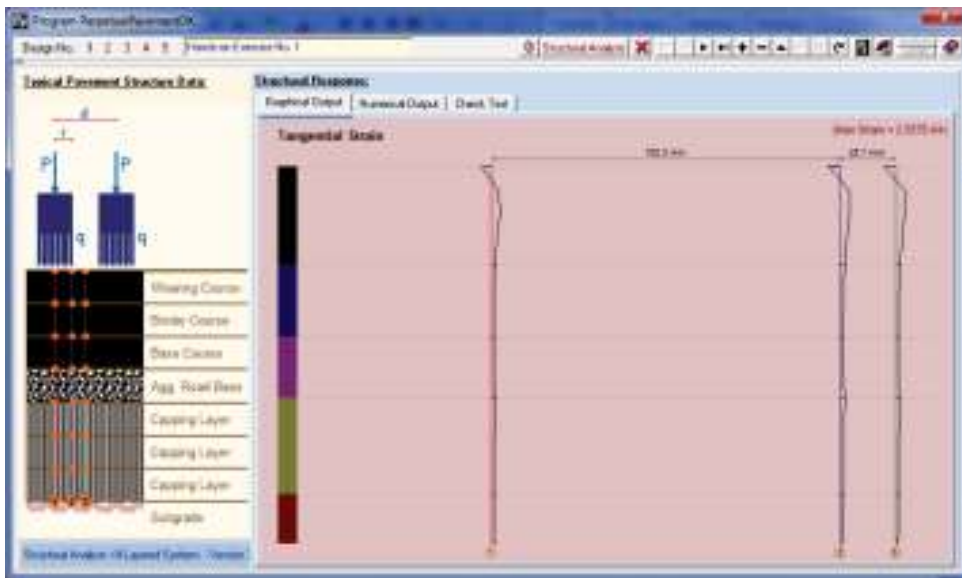
Proses simulasi: Proses simulasi desain perpetual pavement dengan menggunakan program PastDean modifikasi dilakukan dalam 4 langkah secara iteratif. Langkah pertama (lihat Gambar 9 ÷ 11) adalah pengisian data umum, seperti yang telah dijelaskan di atas.

Langkah kedua (lihat Gambar 16) adalah perhitungan tegangan, regangan dan lendutan pada setiap interface di tiga lokasi perhitungan akibat satu beban roda kendaraan. Regangan tarik horizontal maksimum umumnya terjadi di sisi bawah setiap lapisan campuran beraspal dan regangan tekan vertikal maksimum terjadi pada permukaan tanah dasar. Gambar 17 memperlihatkan distribusi regangan tangensial di tiga lokasi perhitungan.

Layer No.	Layer	Modulus	Thickness	Stress	Strain	Deflection
1	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
2	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
3	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
4	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
5	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
6	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
7	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
8	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
9	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
10	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
11	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
12	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
13	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
14	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
15	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
16	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
17	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
18	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
19	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
20	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
21	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
22	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
23	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
24	Asphalt	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000

Gambar 16 - Contoh hasil perhitungan tegangan, regangan dan lendutan akibat beban roda tunggal dengan menggunakan program PastDean modifikasi

Untuk lapisan campuran beraspal yang relatif tebal, regangan tarik horizontal maksimum mungkin terjadi di dalam lapisan permukaan, bukan pada interface, seperti terlihat pada Gambar 18. Hal ini mungkin dapat menjelaskan alasan mengapa retak leleh dapat terjadi yang dimulai dari permukaan perkerasan. Dalam konsep desain perpetual pavement yang hanya memperhitungkan regangan tarik pada interface, kerusakan retak leleh pada lapisan permukaan ini sepertinya tidak dapat dihindari. Untuk itu, jenis kerusakan ini perlu ditangani dengan program pemeliharaan rutin secara tepat waktu agar tidak mempengaruhi lapisan-lapisan yang berada dibawahnya.



Gambar 17 - Distribusi regangan tangensial di dalam struktur perkerasan dengan lapisan campuran beraspal yang tebal di tiga lokasi perhitungan

Langkah ketiga (lihat Gambar 18) adalah perhitungan superposisi tegangan, regangan dan lendutan untuk beban roda ganda dan perhitungan derajat kerusakan untuk setiap kondisi struktur perkerasan dan repetisi beban sumbu kendaraan, apakah untuk kondisi bulanan atau kondisi per jam dalam setahun. Seperti yang diharapkan, derajat kerusakan tertinggi terjadi di siang hari pada saat kondisi struktur perkerasan terlemah (nilai modulus terendah). Hal ini diperlihatkan pada Gambar 19. Sedangkan, untuk desain perpetual pavement, derajat kerusakan ini dibuat sama dengan nol.

Program PastDeanPastDeanOK

Design No: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 [View Layout] [Print Design] [Print Results]

Alt: 10 | U1-1102 | Asiadad 2018 | AASHTO - HSPDG 2000 | hspdg 2014 | SM - Design Manual 2013

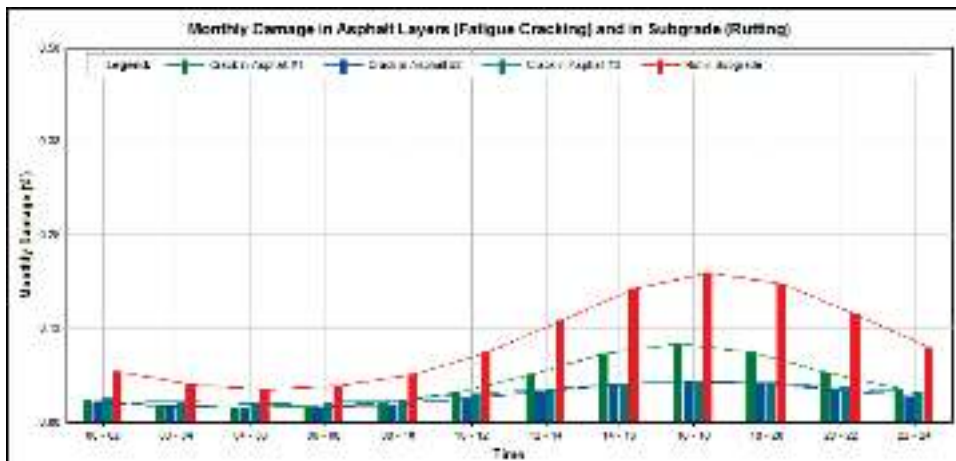
Design Data | Theoretical Model | Material Properties | Damage Computation | Design Summary | Load Equivalence Factor

Order No	Date	Month	Lane No	Traffic			Structural Parameters under T-Compaction Points				Monthly Damage (D) under T-Compaction Points		
				AD	MPG	Type	Date	Edge	Module	Joint	Carve	Edge	Module
1	1	January	1	62.582	1.538.819	ET	81.2903	81.3488	81.2412	Good	0.0000	0.0000	0.0000
2	1	January	2	67.684	1.688.213	ET	88.1142	86.1218	90.1068	Good	0.0000	0.0000	0.0000
3	1	January	3	68.989	1.538.819	ET	74.6178	75.2185	74.3223	Good	0.0000	0.0000	0.0000
4	1	January	4	148.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1	January	5	88.000	88.000	EC	155.193	181.0394	126.4287	Good	0.0000	0.0000	0.0000
6	2	February	1	62.582	1.727.213	ET	971.8885	862.8867	852.7881	Good	0.0000	0.0000	0.0000
7	2	February	2	62.582	1.727.213	ET	46.5237	82.3688	52.8822	Good	0.0000	0.0000	0.0000
8	2	February	3	67.684	2.027.261	ET	84.7909	86.1834	85.3093	Good	0.0000	0.0000	0.0000
9	2	February	4	68.989	1.727.213	ET	66.3525	81.7948	81.0031	Good	0.0000	0.0000	0.0000
10	2	February	5	148.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	2	February	6	88.000	88.000	EC	148.9068	147.9883	146.3884	Good	0.0000	0.0000	0.0000
12	3	March	1	62.582	1.988.836	ET	987.8813	891.7781	842.8883	Good	0.0000	0.0000	0.0000
13	3	March	2	62.582	1.988.836	ET	44.6272	48.1798	47.3388	Good	0.0000	0.0000	0.0000
14	3	March	3	67.684	2.174.796	ET	82.9882	84.8881	84.3829	Good	0.0000	0.0000	0.0000
15	3	March	4	68.989	1.988.836	ET	68.3356	87.0013	82.7527	Good	0.0000	0.0000	0.0000
16	3	March	5	148.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	3	March	6	88.000	88.000	EC	142.7985	144.2407	142.0024	Good	0.0000	0.0000	0.0000
18	4	April	1	62.582	1.781.989	ET	888.8952	886.0726	886.0786	Good	0.0000	0.0000	0.0000
19	4	April	2	62.582	1.781.989	ET	46.4234	51.7728	51.5320	Good	0.0000	0.0000	0.0000
20	4	April	3	67.684	2.086.984	ET	84.6882	86.3687	85.2220	Good	0.0000	0.0000	0.0000
21	4	April	4	68.989	1.781.989	ET	67.8771	82.5588	82.1381	Good	0.0000	0.0000	0.0000
22	4	April	5	148.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Gambar 18 - Contoh hasil perhitungan superposisi tegangan, regangan dan lendutan akibat beban roda ganda dan derajat kerusakan dengan menggunakan program PastDean modifikasi

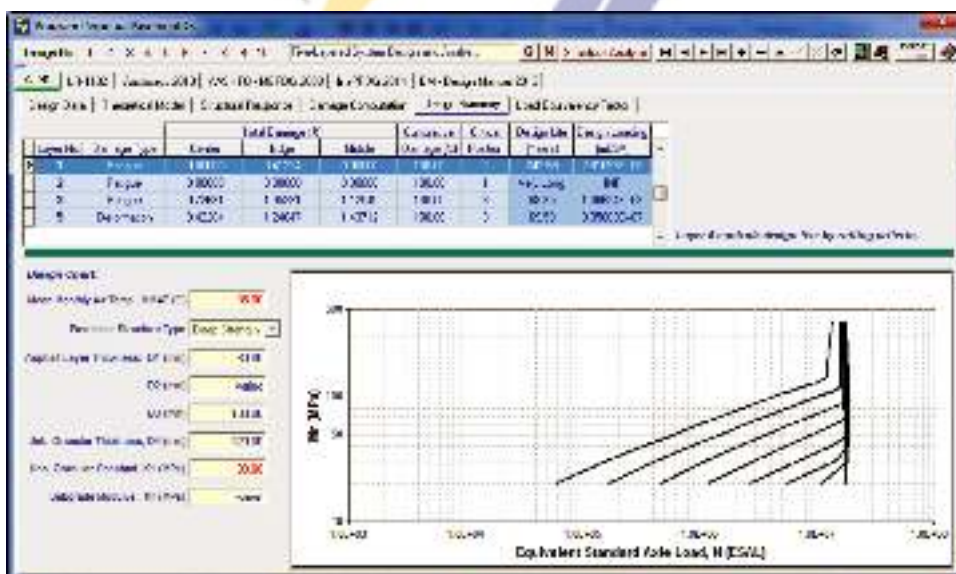
Langkah keempat dan terakhir (lihat Gambar 20) adalah perhitungan masa layan struktur perkerasan. Masa layan struktur perkerasan dihitung berdasarkan total kerusakan sebesar 100%. Sedangkan, untuk desain perpetual pavement, total kerusakan ini dibuat sama dengan nol. Pada contoh desain, total kerusakan 100% terjadi pertama kali pada permukaan tanah dasar. Hal ini berarti bahwa, jenis kerusakan deformasi permanen diperkirakan akan terjadi di akhir masa layan struktur perkerasan. Jika masa layan yang diinginkan belum tercapai, maka proses diulang kembali ke langkah pertama, dst. Grafik yang diperlihatkan di bagian bawah pada Gambar 20 merupakan contoh design chart untuk keperluan penyusunan dokumen pedoman desain struktur perkerasan lentur pada tahapan penelitian selanjutnya.





Gambar 19 - Perkiraan derajat kerusakan struktur perkerasan untuk setiap kondisi yang dianalisis

Hasil dari proses simulasi: Proses simulasi desain perpetual pavement untuk empat variasi beban sumbu kendaraan ekuivalen diperlihatkan pada Tabel 2. Sedangkan, Tabel 3 merangkum hasil dari proses simulasi desain struktur perkerasan untuk masa layan 80 juta lintasan beban sumbu kendaraan ekuivalen. Secara umum, tebal lapisan campuran beraspal untuk kedua contoh desain struktur perkerasan masa layan panjang ini relatif sangat tebal.



Gambar 20 - Contoh hasil perhitungan masa layan struktur perkerasan dengan menggunakan program PastDean modifikasi

Hasil dari proses simulasi desain mengindikasikan bahwa struktur perkerasan masa layan panjang tetap akan cepat rusak jika kasus overloading tidak dapat dikontrol. Sebagai contoh, desain perpetual pavement untuk muatan sumbu terberat legal 10 ton tetap akan rusak hanya setelah menerima 11.44 juta lintasan beban sumbu kendaraan seberat 16 ton.

Nilai ekonomis dari desain perpetual pavement terlihat dari hasil desain struktur perkerasan yang tidak perlu dipertebal lagi untuk memperpanjang masa layan. Hal ini yang membedakan konsep desain perpetual pavement dengan pendekatan desain struktur perkerasan secara empiris. Dengan pendekatan empiris, tebal struktur perkerasan terus bertambah untuk masa layan yang lebih panjang.

Tabel 2 - Hasil dari proses simulasi desain *perpetual pavement* untuk empat variasi beban sumbu kendaraan ekuvalen

Jenis Lapisan	Data Input	P = 8 ton		P = 10 ton		P = 16 ton		P = 32 ton	
		D (mm)	LR <sub>perpet</sub>	D (mm)	LR <sub>perpet</sub>	D (mm)	LR <sub>perpet</sub>	D (mm)	LR <sub>perpet</sub>
Lap. Beraspal - WC	V <sub>a</sub> = 4 % V <sub>b</sub> = 12 % E Variatif	50	~	~	90	106.53 juta SS	110	58.25 juta SS	390
Lap. Beraspal - BC	V <sub>a</sub> = 3 % V <sub>b</sub> = 12 % E Variatif	210	~	~	270	273.62 juta SS	310	16.87 juta SS	490
Lap. Beraspal - Base	V <sub>a</sub> = 3 % V <sub>b</sub> = 12 % E Variatif	120	~	168.60 juta SS	320	57.59 juta SS	120	26.65 juta SS	120
Lap. Agregat	E = 160 MPa	200	-	-	210	-	250	-	300
Tanah Dasar	E = 80 MPa		~	44.84 juta SS		11.44 juta SS		4.65 juta SS	
TOTAL L (mm)		620		620		660		660	
			Perpetual	Rekonstruksi di akhir masa layan	Perpetual	Rekonstruksi di akhir masa layan	Perpetual	Rekonstruksi di akhir masa layan	Perpetual

Tabel 3 - Hasil dari proses simulasi desain struktur perkerasan untuk masa layan 80 juta lintasan untuk empat variasi beban sumbu kendaraan ekuivalen

Jenis Lapisan	Data Input	P = 8 ton		P = 10 ton		P = 15 ton		P = 32 ton	
		D (mm)	URR (juta SS)	D (mm)	URR (juta SS)	D (mm)	URR (juta SS)	D (mm)	URR (juta SS)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Lap. Beraspal - WC	Vv = 4 % Vb = 12 % E Variatif	80	291.92 juta SS	80	145.73 juta SS	80	-	260	88.00 juta SS
Lap. Beraspal - BC	Vv = 5 % Vb = 12 % E Variatif	200	-	200	37.04 juta SS	310	8.49 juta SS	360	145.37 juta SS
Lap. Beraspal - Base	Vv = 9 % Vb = 13 % E Variatif	100	81.83 juta SS	100	19.77 juta SS	100	8.79 juta SS	100	90.22 juta SS
Lap. Agregat	E = 100 MPa	200	-	320	-	400	-	500	-
Tanah Dasar	E = 80 MPa		10.55 juta SS		6.25 juta SS		2.80 juta SS		88.54 juta SS
		500		700		850		1200	
		Desain utk UR 80 juta SS	Rekonstruksi lebih awal	Desain utk UR 80 juta SS	Rekonstruksi lebih awal	Desain utk UR 80 juta SS	Rekonstruksi lebih awal	Desain utk UR 80 juta SS	

# DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO (1993), Guide for Design of Pavement Structures, Washington, USA.
- AASHTO (2008), Mechanical-Empirical Pavement Design Guide – A Manual of Practice, Interim Edition, Washington, USA.
- AASHTO (2013), Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Washington, USA.
- Asphalt Institute (1970), Full Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets – Thickness Design, MS-1, Eight Edition, Maryland, USA.
- Asphalt Institute (1982), Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), RR-82-2, Ninth Edition, Maryland, USA.
- Asphalt Institute (1983), Computer Program Dama – User's Manual, CP-1, Maryland, USA.
- Asphalt Institute (1991), Asphalt Pavements for Highways and Streets – Thickness Design, MS-1, Ninth Edition, Maryland, USA.
- Asphalt Institute (1995), Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types, MS-2, Sixth Edition, Kentucky, USA.
- ASTM (1989), Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP-1026, Editors: Bush AJ III and Baladi GY, Philadelphia, PA., USA.
- ASTM (1994), Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, Second Volume, ASTM STP-1198, Editors: Quintas HLV, Bush AJ III and Baladi GY, Philadelphia, PA., USA.
- ASTM (2000), Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, Third Volume, ASTM STP-1375, Editors: Tayabji SD and Lukanen EO, Philadelphia, PA.
- Austroroads (2010), Guide to Pavement Technology – Pavement Structural Design, Part 2, New South Wales, Australia.
- Bina Marga (2002), Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur, Pd T 01-2002-B, Indonesia.

- Bina Marga (2005), Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambahan Perkerasan Lentur Dengan Metoda Lendutan, Pd T 05-2005-B, Indonesia.
- Bina Marga (2013), Manual Desain Perkerasan Jalan, Indonesia.
- Brown, S.F., Brunton J.M. (1984), An Introduction to the Analytical Design of Bituminous Pavements, Second Edition, University of Nottingham, UK.
- Croney, D. (1977), The Design and Performance of Road Pavements, HMSO, UK.
- Atkins, A.N. (2003), Highway Materials, Soils and Concretes, Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Miner, M.A. (1959), Estimation of Fatigue Life with Emphasis on Cumulative Damage. Metal Fatigue, Edited by Sines and Wiseman, McGraw Hill.
- NAASRA (1987), A Guide to the Structural Design of Road Pavements – Pavement Design, New South Wales, Australia.
- Newcomb, D.E., Willis, R. (2002), Perpetual Asphalt Pavement – A Synthesis, Asphalt Pavement Alliance, IM-40.
- Powell, W.D., Potter, J.F., Mayhew, H.C., Nunn, M.E. (1984), The Structural Design of Bituminous Roads, TRRL LR-1132, Berkshire, UK.
- Shell (1963), Shell Design Charts for Flexible Pavements, London, UK.
- Shell (1978), Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and overlays for Road Traffic, London, UK.
- Shell (1990), The Shell Bitumen Handbook, Surrey, UK.
- SNI (1989), Tata Cara Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya Dengan Metoda Analisa Komponen, SNI 03-1732-1989, Indonesia.
- TRB (1992), Nondestructive Deflection Testing & Backcalculation for Pavements, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington, DC., USA.
- TRB (2000), Perpetual Bituminous Pavement, Circular Report No. 503, Washington, DC., USA.
- TRRL (1977), A Guide to the Structural Design of Bituminous-Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries, Road Note 31, HMSO, London, UK.

Yoder, E.J., Witczak, M.W. (1975), Principles of Pavement Design, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, USA.



**Catatan:**

