


**METODE
PERANCANGAN**

TEBAL PERKERASAN JALAN BETON

BERVOLUME LALU LINTAS RENDAH


Salah satu faktor yang mempengaruhi ketahanan jalan beton adalah tebal perkerasan. Tebal perkerasan yang terlalu tipis akan menyebabkan jalan mengalami kerusakan yang parah, seperti retak, bergelombang, dan sebagainya. Sebaliknya, tebal perkerasan yang terlalu tebal akan meningkatkan biaya konstruksi yang signifikan. Oleh karena itu, penentuan tebal perkerasan yang tepat sangat penting untuk memastikan ketahanan dan efisiensi biaya jalan beton.

Salah satu metode yang digunakan untuk menentukan tebal perkerasan adalah metode perancangan. Metode perancangan adalah metode yang didasarkan pada analisis statistik dari data lalu lintas dan data material perkerasan. Metode ini memungkinkan insinyur untuk menentukan tebal perkerasan yang diperlukan untuk menahan beban lalu lintas yang diharapkan selama umur rencana jalan.

Salah satu faktor yang mempengaruhi ketahanan jalan beton adalah tebal perkerasan. Tebal perkerasan yang terlalu tipis akan menyebabkan jalan mengalami kerusakan yang parah, seperti retak, bergelombang, dan sebagainya. Sebaliknya, tebal perkerasan yang terlalu tebal akan meningkatkan biaya konstruksi yang signifikan. Oleh karena itu, penentuan tebal perkerasan yang tepat sangat penting untuk memastikan ketahanan dan efisiensi biaya jalan beton.

Salah satu metode yang digunakan untuk menentukan tebal perkerasan adalah metode perancangan. Metode perancangan adalah metode yang didasarkan pada analisis statistik dari data lalu lintas dan data material perkerasan. Metode ini memungkinkan insinyur untuk menentukan tebal perkerasan yang diperlukan untuk menahan beban lalu lintas yang diharapkan selama umur rencana jalan.

METODE PERANCANGAN TEBAL PERKERASAN JALAN BETON BERVOLUME LALU LINTAS RENDAH





METODE PERANCANGAN TEBAL PERKERASAN JALAN BETON BERVOLUME LALU LINTAS RENDAH



Anita Jannatun Nissa



INFORMATIKA
Bandung

METODE PERANCANGAN TEBAL PERKERASAN JALAN BETON BERVOLUME LALU LINTAS RENDAH

Desember 2012

Cetakan Ke-1, tahun 2012, (x + 46 Halaman)

@Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

No. ISBN : 978-602-1514-14-6
Kode Kegiatan : 01-PPK3-001107-B12
Kode Publikasi : IRE-TR-75/2012

Kata Kunci : Jalan Beton, Lalu Lintas Rendah, Perancangan Tebal



Penulis:

Anita Jannatun Nissa, ST

Editor:

Dr. Ir. Siegfried, M.Sc
Prof. Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc

Diterbitkan oleh:

Penerbit Informatika - Bandung
Anggota IKAPI Jabar Nomor : 033/JBA/99

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan
info@pusjatan.pu.go.id

Kata Pengantar

Naskah ilmiah metode perancangan tebal perkerasan jalan beton bervolume lalu lintas rendah merupakan luaran dari kegiatan penelitian Tahun Anggaran 2012 dengan judul paket kerja metode perancangan tebal perkerasan jalan beton bervolume lalu lintas rendah.

Saat ini metode perancangan perkerasan jalan beton untuk jalan provinsi ataupun jalan kabupaten/kota di Indonesia sama dengan metode perancangan perkerasan beton untuk jalan nasional. Padahal secara umum jalan nasional mempunyai lalu lintas yang lebih tinggi dari jalan provinsi dan jalan kabupaten. Untuk membangun dan memelihara jalan kabupaten yang pada umumnya mempunyai lalu lintas yang jauh lebih rendah sebaiknya digunakan metode perancangan dan spesifikasi yang berbeda dibandingkan jalan nasional. Hal ini bertujuan agar pola pembangunan jalan lebih efektif dan efisien.

Buku ini merupakan salah satu kontribusi dari hasil penelitian dan pengembangan yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan dalam penyediaan teknologi perancangan tebal perkerasan jalan beton bervolume lalu lintas rendah.

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

Bandung, Desember 2012

Anita Jannatun Nissa



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
1. Pendahuluan.....	1
2. Kriteria Jalan Bervolume Lalu Lintas Rendah	3
3. Karakteristik Material	5
3.1. Tanah Dasar	5
3.2. Lapis Fondasi Bawah.....	6
3.3. Perkerasan Beton	6
4. Prinsip Perencanaan	9
4.1. Perencanaan Menurut AASHTO 1993	10
4.1.1. Indeks Permukaan	10
4.1.2. Perhitungan Lalu Lintas.....	12
4.1.3. Reliabilitas.....	13
4.1.4. Modulus Reaksi Tanah Dasar (k)	14
4.1.5. Drainase	15
4.1.6. Koefisien Transfer Beban	17
4.2. Perencanaan Menurut Cement Concrete Institute (CCI).....	18
5. Tegangan Pada Beton	26
5.1. Tegangan Akibat Perbedaan Temperatur.....	26
5.2. Tegangan Akibat Beban	29
5.3. Tegangan Akibat Gaya Gesek.....	32
6. Analisis Sensitivitas.....	33
7. Hasil Pengujian Lapangan.....	37
7.1. Hasil Perhitungan Lalu Lintas.....	38
7.2. Hasil Pengujian Falling Weight Deflectometer (FWD).....	39

8. Katalog Perkerasan Kaku..... 41

DAFTAR PUSTAKA 45



DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 1. Perkiraan Nilai k	15
Tabel 2. Waktu (dalam hari) untuk mengalirkan air pada lapis fondasi hingga 50% jenuh	16
Tabel 3. Klasifikasi Kualitas Drainase	16
Tabel 4. Nilai Koefisien Drainase (Cd)	17
Tabel 5. Nilai koefisien transfer beban (J)	18
Tabel 6. Pengaruh Lapis Fondasi Agregat pada Nilai Modulus Reaksi Tanah Dasar	18
Tabel 7. Pengaruh Lapis Fondasi CTB pada Nilai Modulus Reaksi Tanah Dasar	19
Tabel 8. Kategori Beban Sumbu	20
Tabel 9. ADTT yang diizinkan, Beban Sumbu Kategori 1 (Sambungan tanpa Dowel)	21
Tabel 10. ADTT yang diizinkan, Beban Sumbu Kategori 2 (Sambungan dengan Dowel)	22
Tabel 11. ADTT yang diizinkan, Beban Sumbu Kategori 2 (Sambungan tanpa Dowel)	24
Tabel 12. Variasi Perhitungan Tebal Perkerasan Beton	33
Tabel 13. Persentase Perubahan Nilai Ketebalan	34
Tabel 14. Data Perhitungan Lalu Lintas Ruas Cijerah dan Gedebage	38
Tabel 15. Data Perhitungan Lalu Lintas Ruas Soreang dan Jatitujuh	38
Tabel 16. Nilai Modulus Beton dan Modulus Reaksi Tanah Dasar	40
Tabel 17. Perbandingan Tebal Slab Beton	40
Tabel 18. Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas bervolume Rendah: Rekomendasi Tebal Pelat beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar	42

Tabel 19.	Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas Bervolume Rendah: Rekomendasi Tebal Pelat Beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar	43
Tabel 20.	Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas bervolume Rendah: Rekomendasi Tebal Pelat beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar	43
Tabel 21.	Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas Bervolume Rendah : Rekomendasi Tebal Pelat Beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar	44



DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 1. Konstruksi Perkerasan Kaku	7
Gambar 2. Distribusi Tegangan pada Perkerasan Kaku dan Perkerasan Lentur	7
Gambar 3. Faktor Koreksi C	27
Gambar 4. Hubungan Nilai Tebal dengan Tegangan akibat Perbedaan Temperatur	29
Gambar 5. Hubungan Nilai Tebal dengan Tegangan akibat Beban	31
Gambar 6. Pengaruh Variasi Nilai Reliability dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan	34
Gambar 7. Pengaruh Variasi Mutu Beton dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan	35
Gambar 8. Pengaruh Variasi Nilai Koefisien Drainase dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan	35
Gambar 9. Pengaruh Variasi Nilai Modulus Reaksi Tanah Dasar dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan	36
Gambar 10. Pengaruh Variasi Nilai Jdan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan	36
Gambar 11. Data Lalu Lintas	39



1

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki ruas jalan yang secara administratif terdiri atas jalan nasional, jalan provinsi, dan jalan kabupaten / kota. Jenis perkerasan yang ada di Indonesia pada awalnya hanya perkerasan aspal dan jalan yang tidak diperkeras, baru pada tahun 1985 mulai berkembang jenis perkerasan lainnya, yaitu perkerasan beton. Saat ini metode perancangan perkerasan jalan beton untuk jalan provinsi ataupun jalan kabupaten/kota di Indonesia sama dengan metode perancangan perkerasan beton untuk jalan nasional. Padahal secara umum jalan nasional mempunyai lalu lintas yang lebih tinggi dari jalan provinsi dan jalan kabupaten. Untuk membangun dan memelihara jalan kabupaten yang pada umumnya mempunyai lalu lintas yang jauh lebih rendah sebaiknya digunakan metode perancangan dan spesifikasi yang berbeda dibandingkan jalan nasional. Hal ini bertujuan agar pola pembangunan jalan lebih efektif dan efisien.

Pada saat ini perancangan jalan beton untuk lalu lintas rendah masih mengacu pada perancangan pada umumnya. Untuk jalan lalu lintas rendah terdapat beberapa parameter yang mempunyai kebutuhan lebih rendah dibandingkan dengan jalan yang mempunyai lalu lintas tinggi. Beberapa parameter itu antara lain parameter daya dukung ataupun kekuatan struktural dari masing-masing bahan pembentuk lapisan perkerasan.

Dalam perencanaan jalan beton aspek dari kekuatan menjadi satu unsur yang patut diperhatikan dan memegang perhatian khusus. Aspek kekuatan ini biasanya diwakili oleh nilai modulus elastisitas dan juga *flexural strength*. Dari metode yang ada perhitungan untuk tebal perkerasan jalan beton berdasarkan pada nilai *flexural* ini.

Salah satu metode yang ada pada saat ini untuk perkerasan jalan beton untuk lalu lintas rendah adalah metode AASHTO 1993. Pemikiran untuk menggunakan jalan beton untuk lalu lintas rendah didasarkan atas metode perencanaan ini.



2

KRITERIA JALAN BERVOLUME LALU LINTAS RENDAH

Beberapa definisi jalan volume lalu lintas rendah disampaikan berikut ini:

Transportation Association of Canada (TAC), 1995, menyebutkan bahwa jalan bervolume lalu lintas rendah adalah jalan dengan jumlah lalu lintas harian rata-rata tidak lebih dari 200 dan fungsi pelayanan adalah jalan antar kota.

Menurut *AASHTO* 1993, kriteria jalan bervolume lalu lintas rendah adalah jalan yang direncanakan dengan maksimum 700.000 sampai dengan 1.000.000 ESAL selama umur rencana.

Menurut *Cement Concrete Institute (CCI)*, kriteria jalan bervolume lalu lintas rendah adalah jalan dengan jumlah lalu lintas harian rata-rata di bawah 1000, di mana persentase jumlah kendaraan truk ringan sampai 30% dan kendaraan berat sampai 15% serta kendaraan dengan berat lebih dari 8 ton untuk sumbu tunggal atau 14,5 ton untuk sumbu ganda dengan jumlah yang sangat terbatas.

Menurut *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*, kriteria jalan bervolume lalu lintas rendah adalah jalan yang direncanakan

dengan maksimum 750.000 kendaraan berat (truk dan bus) selama umur rencana.

Sedangkan *Federal Highway Administration* (FHWA) dan *state departments of transportation, the US Forest Service, and the National Association of County Engineers* (NACE) mendefinisikan jalan bervolume lalu lintas rendah adalah jalan dengan volume kurang dari 400 kendaraan per hari.



3

KARAKTERISTIK MATERIAL

3.1. Tanah Dasar

Perkerasan beton memiliki nilai modulus elastisitas 25 – 45 Gpa dan memiliki tingkat kekakuan yang tinggi. Perkerasan beton juga memiliki nilai kuat tarik lentur 3,5 – 5 MPa. Sifat ini memungkinkan perkerasan beton untuk mendistribusikan beban yang lebih merata pada tanah dasar, sehingga perkerasan beton tidak memerlukan tanah dasar yang kuat dan yang lebih penting bahwa tanah dasar memiliki daya dukung yang seragam. Di Amerika Serikat klasifikasi tanah yang umum digunakan untuk perkerasan beton lalu lintas rendah adalah A-7-6.

Masalah-masalah yang membutuhkan perawatan khusus mungkin timbul pada tanah dasar seperti defleksi yang melampaui batas dan kembang susut tanah, selama dan setelah melintasnya suatu beban, kecenderungan terjadinya erosi pada kondisi tertentu, perubahan volume yang berlebihan terjadi pada beberapa tanah, seperti tanah ekspansif sebagai akibat dari perubahan kelembaban, kekurangan dalam dukungan struktural seperti *sinkholes* dan ketidakstabilan lereng, serta ketidakseragaman daya dukung di bawah perkerasan beton karena jenis tanah yang bervariasi dan adanya rongga sebagai akibat dari prosedur pengurukan yang salah pada galian utilitas ataupun pipa.

3.2. Lapis Fondasi Bawah

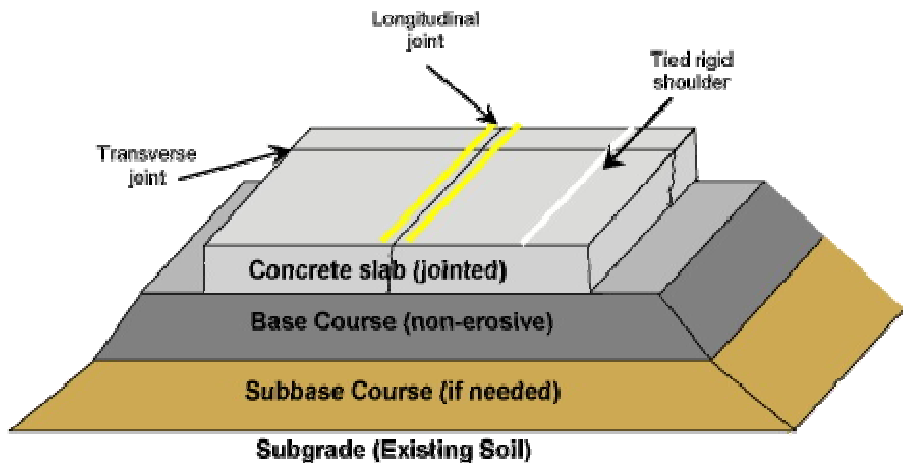
Lapis fondasi bawah memiliki fungsi utama yaitu untuk mencegah terjadinya *pumping*. Selain itu, fungsi lain dari lapis fondasi bawah adalah menyediakan lantai kerja yang lebih stabil untuk konstruksi perkerasan serta kendali terhadap kembang-susut yang terjadi pada tanah dasar.

Pumping adalah keluarnya butir-butiran halus tanah bersama air pada daerah sambungan, retakan atau pada bagian pinggir perkerasan akibat lendutan atau gerakan vertikal pelat beton karena beban lalu lintas setelah adanya air bebas terakumulasi di bawah pelat. *Pumping* dapat mengakibatkan terjadinya rongga di bawah pelat beton sehingga menyebabkan retaknya pelat beton.

Persyaratan AASHTO M 155 untuk material granular yang cocok untuk mencegah *pumping* adalah ukuran partikel maksimum tidak lebih dari 1/3 tebal fondasi bawah, material lolos ayakan ukuran 0,075 mm tidak lebih dari 15%, nilai indeks plastisitas tidak lebih dari 6, nilai batas cair tidak lebih besar dari 25, serta gradasi yang memperbolehkan pemadatan lapis fondasi bawah hingga suatu batas kepadatan yang menghasilkan peningkatan yang minimum pada saat pelayanan. Dalam spesifikasi AASHTO, material dengan persen lolos pada ukuran ayakan 0,075 mm lebih tinggi 15%, atau dengan PI lebih dari 6, atau batas cair lebih tinggi dari 25 dapat digunakan, dengan metode stabilisasi yang terbukti sesuai dengan kondisi setempat.

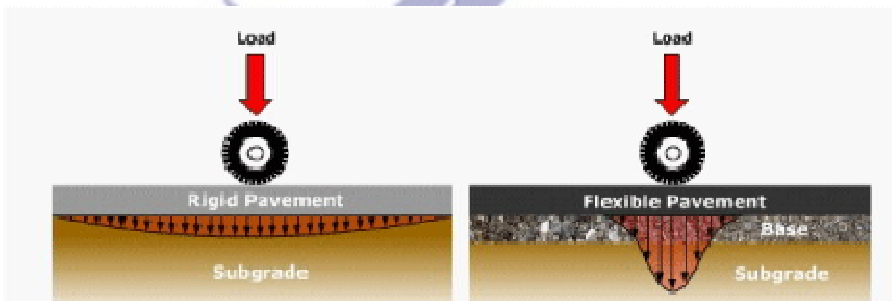
3.3. Perkerasan Beton

Konstruksi perkerasan beton terdiri atas pelat beton sebagai lapis fondasi serta lapis fondasi bawah di atas tanah dasar. Namun apabila tanah dasarnya baik, konstruksi perkerasan beton terdiri atas pelat beton yang diletakkan di atas tanah dasar. Dalam konstruksi perkerasan beton, pelat beton sering disebut sebagai lapis fondasi karena dimungkinkan masih adanya lapisan aspal beton di atasnya yang berfungsi sebagai lapis permukaan. Tipikal konstruksi perkerasan kaku dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konstruksi Perkerasan Kaku
(sumber: www.pavementinteractive.org)

Perkerasan beton yang kaku dan memiliki modulus elastisitas yang tinggi, akan mendistribusikan beban ke bidang tanah dasar yang cukup luas sehingga bagian terbesar dari kapasitas struktur perkerasan diperoleh dari pelat beton sendiri. Hal ini berbeda dengan perkerasan lentur di mana kekuatan perkerasan diperoleh dari tebal lapis fondasi bawah, lapis fondasi, dan lapis permukaan. Distribusi tegangan pada perkerasan kaku dan perkerasan lentur dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi Tegangan pada Perkerasan Kaku dan Perkerasan Lentur
(sumber: www.pavementinteractive.org)

Karena yang paling penting adalah mengetahui kapasitas struktur yang menanggung beban, maka faktor yang paling diperhatikan dalam perencanaan tebal perkerasan beton adalah kekuatan beton itu sendiri. Adanya beragam kekuatan dari tanah dasar dan atau Fondasi hanya berpengaruh kecil terhadap kapasitas struktural perkerasannya.



4

PRI NSI P PERENCANAAN

Pada prinsipnya perhitungan tebal perkerasan kaku untuk volume lalu lintas rendah hampir sama dengan perencanaan untuk perkerasan kaku bervolume lalu lintas berat. Perbedaan utama perencanaan perkerasan kaku untuk volume lalu lintas rendah adalah nilai reliabilitas yang digunakan. Karena tidak banyak dipergunakan serta memiliki resiko yang rendah, nilai reliabilitas yang disarankan untuk volume lalu lintas rendah adalah 50% akan tetapi perencana dapat juga menggunakan tingkat reliabilitas yang lebih tinggi (60% - 75%) tergantung dari perkiraan tingkat lalu lintas. (AASHTO 1993).

Menurut AASHTO 1993, perhitungan tebal perkerasan kaku dapat diperhitungkan dengan menggunakan rumus:

$$\log_{10}(w_{18}) = Z_R \times S_0 + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times P_t) \times \log_{10} \left[\frac{S_2 \times C_{22} \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{15.42}{(E' / E'_2)^{0.25}} \right]} \right] \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

W_{18} = Kumulatif beban gandar standar selama umur perencanaan (ESAL)

Z_R = Standar deviasi normal

S_o = Standard error gabungan dari prediksi lalu lintas dan kinerja

D = Tebal pelat beton (in)

P_o = Tingkat pelayanan awal

P_t = Tingkat pelayanan akhir

S_c = Kuat tarik lentur (lbs/in^2)

C_d = Koefisien drainase

J = Koefisien penyalur beban

E_c = Modulus elastisitas beton (lbs/in^2)

k = Modulus resilien tanah dasar (lbs/in^3)

4.1 Perencanaan Menurut AASHTO 1993

Periode analisis untuk perencanaan perkerasan kaku lalu lintas volume rendah pada AASHTO 1993 ditetapkan 15 - 25 tahun. Hal ini terkait dengan periode waktu sepanjang analisis dilakukan atau dapat disebut juga umur rencana.

4.1.1 Indeks Permukaan

Kinerja suatu perkerasan didefinisikan sebagai kemampuan untuk melayani jenis lalu lintas (kendaraan penumpang dan truk) yang menggunakan fasilitas jalan tersebut. Pengukuran utama pada kemampuan layan adalah Indeks Permukaan (PSI, *Present Serviceability Index*). Beberapa nilai Indeks Permukaan (IP) beserta artinya adalah seperti yang tersebut di bawah ini:

IP = 1,0 : menyatakan permukaan jalan dalam keadaan rusak berat sehingga sangat mengganggu lalu lintas kendaraan

IP = 1,5 : menyatakan tingkat pelayanan terendah yang masih mungkin (jalan tidak terputus)

IP = 2,0 : menyatakan tingkat pelayanan terendah bagi jalan yang masih mantap

IP = 2,5 : menyatakan permukaan jalan masih cukup stabil dan baik.

Sedang IP = 4,5 adalah nilai maksimum dari pekerasan kaku yang dilaksanakan secara teliti dan baru dibuka. Filosofi dasar perencanaan ini adalah konsep kinerja pelayanan, yang menyediakan suatu sarana dalam perencanaan suatu perkerasan didasarkan pada volume lalu lintas total secara spesifik dan minimum tingkat pelayanan yang dikehendaki pada akhir masa pelayanan jalan tersebut.

Pemilihan IP terendah yang diperbolehkan atau perkiraan kinerja jalan pada akhir umur rencana (*terminal serviceability index*, I_{Pt}) didasarkan pada indeks terendah yang ditoleransi sebelum dilakukan rehabilitasi, *overlay*, atau rekonstruksi. Nilai indeks 2,5 atau lebih dianjurkan untuk perencanaan jalan raya utama dan 2,0 untuk jalan raya dengan volume yang lebih rendah.

Waktu yang diperlukan suatu struktur perkerasan untuk mencapai *terminal serviceability* sangat tergantung pada volume lalu lintas dan indeks permukaan pada awal umur rencana (I_{P0}). Ketika I_{P0} dan I_{Pt} telah ditentukan, perhitungan berikut harus dilakukan untuk mengetahui perubahan total pada *serviceability index* (ΔIP).

Kinerja struktural dari suatu perkerasan berhubungan dengan kondisi fisik seperti retak yang terjadi, *faulting*, pelepasan butir atau kondisi-kondisi lain yang berakibat merugikan terhadap kemampuan struktur perkerasan dalam menahan beban atau yang akan membutuhkan pemeliharaan. Kinerja fungsional dari perkerasan menyangkut terhadap seberapa baik suatu perkerasan jalan dalam melayani para pengguna jalan. Dalam hal ini, kenyamanan atau kualitas dalam berkendara merupakan karakteristik yang dominan.

Tingkat pelayanan suatu perkerasan yang dinyatakan dalam Indeks Permukaan diperoleh melalui pengukuran ketidakrataan dan kerusakan jalan pada suatu waktu tertentu selama umur pelayanan perkerasan.

Tingkat ketidakrataan merupakan faktor dominan untuk memperkirakan IP (PSI) suatu perkerasan.

Tingkat pelayanan awal (IP0) adalah suatu perkiraan dari pengguna jalan terhadap besaran PSI segera setelah konstruksi jalan selesai dibangun. Karena variasi dari metode dan standar yang digunakan dalam perencanaan, untuk mendapatkan tingkat keandalan yang lebih tinggi disarankan tiap instansi agar melakukan perencanaan yang disesuaikan dengan keadaan setempat.

Tingkat pelayanan akhir (IPt) adalah tingkat pelayanan terendah yang masih dapat diterima sebelum dilakukannya pelapisan ulang atau rekonstruksi dan merupakan hal yang penting untuk kelas jalan tertentu. Untuk jalan raya utama disarankan nilai indeks sebesar 2,5 atau 3,0 dan untuk jalan dengan kelas yang lebih rendah dapat diambil 2,0. Untuk jalan yang relatif kecil dan memiliki keterbatasan dalam biaya pemeliharaan, nilai IPt sebesar 1,5 dapat digunakan. Biaya pengeluaran juga dapat ditekan dengan mengurangi umur pelayanan jalan.

4.1.2 Perhitungan Lalu Lintas

Faktor ekivalensi beban sumbu (*Load Equivalency Factor, LEF*) masing-masing kelas kendaraan adalah sesuai dengan beban sumbu setiap kelas kendaraan, yaitu konfigurasi sumbu tunggal, sumbu ganda (tandem) dan sumbu tiga (triple). Faktor ekivalensi beban sumbu dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$\log \left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}} \right) = 4,26 \log(18 + 1) - 4,62 \log(L_x + L_2) + 3,28 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \dots (2)$$

$$G_t = \log \left(\frac{4,5 - IP_t}{4,5 - 1,5} \right) \dots (3)$$

$$\beta_x = 1,00 + \frac{3,63(L_x + L_2)^{3,26}}{(D + 1)^{3,46} L_2^{3,52}} \dots (4)$$

Keterangan:

- W_{tx} adalah angka beban x-sumbu pada akhir waktu t
- W_{t18} adalah angka 18-kip (80 kN) beban sumbu tunggal pada waktu t

L_x adalah beban dalam kip untuk sumbu tunggal, satu set sumbu ganda, atau satu set sumbu tridem
 L_2 adalah kode sumbu (1 untuk sumbu tunggal, 2 untuk sumbu ganda, dan 3 untuk sumbu tridem)
 IP_t adalah indeks perkerasan pada saat akhir masa layan
 G_t adalah fungsi dari IP_t
 β_{18} adalah nilai dari β_x ketika $L_x = 18$ dan $L_2 = 1$
 Dari persamaan-persamaan di atas, faktor ekivalensi beban sumbu (LEF) dapat diketahui melalui rumus:

$$LEF = \frac{W_{18}}{W_{T2}} \dots \dots \dots (5)$$

4.1.3. Reliabilitas

Konsep reliabilitas untuk perencanaan perkerasan didasarkan pada beberapa ketidaktentuan (*uncertainties*) dalam proses perencanaan untuk meyakinkan alternatif-alternatif berbagai perencanaan. Tingkatan *reliability* yang digunakan tergantung pada volume lalu lintas, klasifikasi jalan yang akan direncanakan maupun ekspektasi dari pengguna jalan.

Reliabilitas didefinisikan sebagai kemungkinan bahwa tingkat pelayanan dapat tercapai pada tingkatan tertentu dari sisi pandangan para pengguna jalan sepanjang umur yang direncanakan. Hal ini memberikan implikasi bahwa repetisi beban yang direncanakan dapat tercapai hingga mencapai tingkatan pelayanan tertentu.

Pengaplikasian dari konsep reliabilitas ini diberikan juga dalam parameter standar deviasi yang mempresentasikan kondisi-kondisi lokal dari ruas jalan yang direncanakan serta tipe perkerasan antara lain perkerasan lentur ataupun perkerasan kaku. Secara garis besar pengaplikasian dari konsep reliabilitas adalah sebagai berikut:

1. Hal pertama yang harus dilakukan adalah menentukan klasifikasi dari ruas jalan yang akan direncanakan. Klasifikasi ini mencakup apakah jalan tersebut adalah jalan dalam kota (urban) atau jalan antar kota (rural)
2. Tentukan tingkat *reliability* yang dibutuhkan dengan menggunakan table yang ada pada metode perencanaan AASHTO 1993. Semakin tinggi

tingkat reliability yang dipilih, maka akan semakin tebal lapisan perkerasan yang dibutuhkan

- 3. Satu nilai standar deviasi (S_0) harus dipilih. Nilai ini mewakili dari kondisi-kondisi lokal yang ada. Berdasarkan data dari jalan percobaan AASHTO ditentukan nilai S_0 sebesar 0,30 - 0,40 untuk perkerasan kaku dan 0,40 - 0,50 untuk perkerasan lentur. Hal ini berhubungan dengan total standar deviasi sebesar 0,35 dan 0,45 untuk lalu lintas jenis perkerasan kaku dan lentur.

Nilai reliabilitas yang ditentukan oleh AASHTO 1993 untuk perencanaan perkerasan kaku lalu lintas volume rendah adalah sebesar 50% - 75%.

4.1.4. Modulus Reaksi Tanah Dasar (k)

Karakteristik tanah dasar pada perencanaan perkerasan kaku menurut AASHTO, dicerminkan dengan Modulus Resilien. Prosedur penentuan modulus resilien dapat menggunakan AASHTO T274. Menurut Heukelom dan Klomp (1962) nilai modulus resilien (M_R) dapat dikorelasikan dengan CBR dengan menggunakan rumus:

$MR = 1500 \times CBR \dots\dots\dots (6)$

Keterangan:

MR adalah Modulus resilient tanah dasar (psi)

CBR adalah California Bearing Ratio

Kualitas dari daya dukung merupakan parameter yang penting pada perkerasan kaku. Pada perencanaan untuk volume lalu lintas rendah, apabila pelat beton dihampar langsung pada tanah dasar maka perkiraan nilai k (modulus reaksi tanah gabungan) ditentukan dengan menggunakan hubungan teoritis antara nilai k dari hasil plate bearing test serta modulus elastis tanah dasar sebagai berikut:

$k = MR / 19.4 \dots\dots\dots (7)$

Kualitas daya dukung yang ditandai dengan modulus reaksi tanah dasar k. Perkiraan nilai k ini dapat dilihat pada Tabel 1, dimana nilai k minimum

didapat pada saat tanah dalam keadaan 100% jenuh dan nilai k maksimum didapat pada saat tanah dalam keadaan 50% jenuh.

Tabel 1. Perkiraan Nilai k

Klasifikasi AASHTO	Keterangan	Klasifikasi USCS	Kepadatan Kering (lb/ft³)	CBR (%)	nilai-k (psi/in)
Tanah berbutir kasar:					
A-1-a, gradasi baik	Kerikil	GW, GP	125 - 140	60 - 80	300 - 400
A-1-a, gradasi jelek			120 - 130	35 - 60	300 - 400
A-1-b	Pasir kasar	SW	110 - 130	20 - 40	200 - 400
A-3	Pasir halus	SP	105 - 120	15 - 25	150 - 300
Tanah A-2 (material berbutir dengan kadar material halus tinggi):					
A-2-4, kerikil	Kerikil mengandung lanau	GM	130 - 145	40 - 80	300 - 500
A-2-5, kerikil	Kerikil mengandung pasir dan lanau				
A-2-4, berpasir	Pasir mengandung lanau	SM	120 - 135	20 - 40	300 - 400
A-2-5, berpasir	Pasir mengandung kerikil dan lanau				
A-2-6, kerikil	Kerikil mengandung lempung	GC	120 - 140	20 - 40	200 - 450
A-2-7, kerikil	Kerikil mengandung pasir dan lempung				
A-2-6, berpasir	Pasir mengandung lempung	SC	105 - 130	10 - 20	150 - 350
A-2-7, berpasir	Pasir mengandung kerikil dan lempung				
Tanah berbutir halus:					
A-4	Lanau	ML, OL	90 - 105	4 - 8	25 - 165*
	Lanau/pasir/campuran kerikil		100 - 125	5 - 15	40 - 220*
A-5	Lanau bergradasi jelek	MH	80 - 100	4 - 8	25 - 190*
A-6	Lempung plastis	CL	100 - 125	5 - 15	25 - 255*
A-7-5	Lempung dengan tingkat plastisitas dan elastis sedang	CL, OL	90 - 125	4 - 15	25 - 215*
A-7-6	Lempung dengan tingkat plastisitas dan elastis tinggi	CH, OH	80 - 110	3 - 5	40 - 220*

Sumber: AASHTO 1998 *supplement design procedure*

4.1.5. Drainase

Metode yang digunakan untuk menentukan kualitas drainase adalah menghitung waktu yang diperlukan untuk mengalirkan air pada lapis fondasi hingga 50% jenuh (T50). T50 didapat dari kombinasi antara permeabilitas (k), panjang jalur aliran air (L), ketebalan lapis drainase (H), porositas efektif (n) dan kemiringan lereng (S). Hasil dari perhitungan data tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Waktu (dalam hari) untuk mengalirkan air pada lapis fondasi hingga 50% jenuh

Permeabilitas k(ft/hari)	Porositas n	Kemiringan lereng S	H = 1		H = 2	
			L = 12 ft	L = 24 ft	L = 12 ft	L = 24 ft
0.1	0.015	0.01	10	36	6	20
		0.02	9	29	5	18
1	0.027	0.01	2	6	5	18
		0.02	2	5	1	3
10	0.048	0.01	0.3	1	0.2	0.6
		0.02	0.3	1	0.2	0.6
100	0.08	0.01	0.05	0.2	0.03	0.1
		0.02	0.05	0.2	0.03	0.1

Sumber: AASHTO 1986 Guide for Design of Pavement Structures Volume 2

Catatan: H adalah tebal lapisan drainase (dalam kaki) dan L adalah panjang jalur aliran air (dalam kaki) (berlaku untuk *granular base*)

Faktor kondisi drainase dan musim akan mempengaruhi perencanaan perkerasan kaku, melalui perubahan daya dukung tanah dasar dan lapisan fondasi akibat kondisi drainase dan musim. AASHTO (2004) mengklasifikasikan kualitas drainase ke dalam lima kategori berdasarkan kecepatan surutnya air. Kategori tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi Kualitas Drainase

Kualitas Drainase	Kecepatan Surutnya Air
Sangat Baik	2 jam
Baik	1 hari
Cukup	1 minggu
Jelek	1 bulan
Sangat Jelek	Air tidak bisa mengalir

Selanjutnya pengaruh kualitas drainase dinyatakan dalam nilai koefisien drainase (Cd), yang tergantung pada kualitas drainase dan persentase lamanya waktu dalam satu tahun dimana kontruksi perkerasan mencapai keadaan kadar air jenuh (saturated). Keadaan kadar air jenuh ini

tergantung kepada rata-rata intensitas hujan tahunan dan kondisi drainasenya sendiri. Nilai Cd untuk berbagai kualitas drainase dan lamanya waktu dimana perkerasan dalam keadaan jenuh di tunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Koefisien Drainase (Cd)

Persen Waktu Dimana Kontruksi Perkerasan Mencapai Tingkat Keadaan Jenuh				
Kualitas Drainase	Kurang dari 1%	1%-5%	5%-25%	Lebih besar dari 25%
Sangat Baik	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Baik	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Cukup	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Jelek	1.10 - 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Sangat Jelek	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Sumber : *AASHTO 2004 Designation M 155-87 (2000) Standard Specification for Granular Material to Control Pumping Under Concrete Pavement*

4.1.6. Koefisien Transfer Beban

Koefisien transfer beban (J) adalah faktor yang digunakan dalam perencanaan perkerasan kaku untuk menghitung kemampuan struktur perkerasan beton dalam menyalurkan beban pada sambungan atau retakan. Alat transfer beban, ikatan antar agregat, dan dengan adanya ikatan bahu beton, keseluruhannya akan mempengaruhi nilai dari koefisien ini. Umumnya nilai J untuk kondisi yang telah ditentukan (misal, perkerasan beton dengan sambungan dan ikatan bahu) meningkat sejalan dengan beban lalu lintas yang meningkat, hal ini disebabkan oleh penurunan transfer beban pada agregat akibat beban repetisi.

Koefisien transfer beban pada kondisi yang berbeda dikembangkan berdasarkan pengalaman dan analisa tegangan mekanistik. Sebagai panduan umum dalam penentuan nilai J, semakin tinggi nilai J sebaiknya digunakan untuk nilai k yang kecil, koefisien termal tinggi dan variasi temperatur yang besar. Setiap instansi bagaimanapun juga harus mengembangkan sendiri terhadap jenis agregat, kondisi cuaca dan sebagainya. Nilai rentang koefisien J untuk perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai koefisien transfer beban (J)

	Ada Dowel	Tanpa Dowel
Bahu Beton dan Tie bar	2,5 – 3,1	3,6 – 4,2
Bahu dari Perkerasan Aspal	3,2	3,8 – 4,4

Jika menggunakan dowel, ukuran dan jarak ditentukan sesuai dengan prosedur dan atau pengalaman instansi setempat. Sebagai acuan umum, diameter dowel harus sama dengan tebal slab dikalikan $\frac{1}{8}$ inci (contoh, tebal slab 10 inci, menggunakan diameter dowel sebesar $1\frac{1}{4}$ inci). Jarak normal antar dowel masing-masing adalah 12 inci dan 18 inci.

4.2. Perencanaan Menurut Cement Concrete Institute (CCI)

Parameter perencanaan pada Cement Concrete Institute (CCI) meliputi:

- Modulus reaksi tanah dasar minimum adalah 20 MPa/m
- Kuat tarik lentur beton pada umur 28 hari sebesar 3,8 MPa yang umumnya didapat dari beton yang memiliki nilai kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 30 MPa.

Batasan nilai modulus reaksi tanah dasar pada metode perencanaan *Cement Concrete Institute* dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Pengaruh Lapis Fondasi Agregat pada Nilai Modulus Reaksi Tanah Dasar

k tanah dasar (MPa/m)	k lapis fondasi (MPa/m)			
	100 mm	150 mm	250 mm	300 mm
20	23	25	32	38
40	45	49	57	66
60	64	66	76	90
80	87	90	100	117

Tabel 7. Pengaruh Lapis Fondasi CTB pada Nilai Modulus Reaksi Tanah Dasar

k tanah dasar (MPa/m)	k lapis fondasi (MPa/m)			
	100 mm	150 mm	250 mm	300 mm
20	60	80	105	135
40	100	130	185	230
60	140	190	245	-

Berdasarkan metode CCI, beban sumbu dibedakan menjadi 4 (empat) kategori, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8 nilai ADTT yang diizinkan pada metode CCI dapat dilihat pada Tabel 9 sampai dengan Tabel 11.



Tabel 8. Kategori Beban Sumbu

Kategori Beban Sumbu	Deskripsi	Lalu Lintas			Beban Sumbu Maksimum	
		ADT	ADTT		Sumbu Tunggal	Sumbu Ganda
			%	Per hari Sampai		
1	Jalan permukaan, peresahan, jalan sekunder (rendah sampai sedang*)	250 – 800	1 – 3	25	98	160
2	Jalan kolektor, pedesaan dan jalan sekunder (tinggi*) Jalan primer dan jalan arteri (rendah*)	700 – 5.000	5 – 18	40 – 1.000	115	195
3	Jalan arteri dan jalan primer Jalan tol, jalan luar kota dan jalan antar provinsi (rendah sampai sedang*)	3.000-12.000 (12 lajur) 3.000 – 50.000 (4 lajur atau lebih)	8 – 30	500 – 5000	133	230
4	Jalan arteri, jalan primer, jalan tol (tinggi*) Jalan luar kota dan jalan antarprovinsi (sedang sampai tinggi*)	3.000 – 12.000 (2 lajur) 3.000 – 150.000 (4 lajur atau lebih)	8 – 30	1.500 – 8.000	151	267

Catatan : * Istilah tinggi, sedang, dan rendah secara relatif tergantung dari beban sumbu untuk tipe jalan (misal : kategori rendah untuk jalan antar provinsi mencerminkan beban yang lebih berat dibanding kategori rendah untuk jalan sekunder)

Tabel 9. ADTT yang diizinkan, Beban Sumbu Kategori 1 (Sambungan tanpa Dowel)

Tebal Sub, cm	tanpa Batu atau Kerb				Dengan Batu atau Kerb			
	Modulus Beaksi Tanah Dasar, MPa/m		Tebal Slab, m		Modulus Beaksi Tanah Dasar, MPa/m		Tebal Slab, m	
	lebar, 20 - 34	sepanjang, 35 - 49	Tinggi, 50 - 60		lebar, 20 - 34	sepanjang, 35 - 49	Tinggi, 50 - 60	
Kuat Tarik Lentur = 4,4 MPa								
12		0,1	0,3	10		0,1	0,4	
13	0,2	1	4	11	0,3	2	6	
14	3	11	33	12	4	21	60	
15	18	77	407	13	36	160	410	
16	110	407		14	240			
17	500							
Kuat Tarik Lentur = 4,1 MPa								
13		0,2	0,7	11		0,3	1	
14	0,3	3	8	12	0,8	5	15	
15	4	19	54	13	8	41	110	
16	27	110	290	14	65	260	650	
17	140	590		15	360			
18	600							
Kuat Tarik Lentur = 3,8 MPa								
14	0,1	0,3	1	11			0,2	
15	0,7	4	12	12	0,1	0,5	3	
16	5	26	72	13	2	9	26	
17	32	130	350	14	14	63	170	
18	150	570		15	90	340		
				16	410			

Tabel 10. ADF yang diizinkan, Gelang Sumbu (Gelang 2 (Sambungan dengan Dessel))

Tulangan Batang Kert				Tulangan Batang Beton Kert			
No. Balok	Modulus Reaksi Taran Bases, M ² /m			Tinggi, 50-100	Sangat Tinggi, > 100	Tinggi, 50-100	Sangat Tinggi, > 100
	Penyele, 20-50	Sedang, 35-40					
Kuat Tarik Beton = 4.1 MPa							
14			0	12			6
15			26	13		4	12
16	2	12	150	14	5	30	86
17	15	58	343	15	44	180	470
18	77	330	5103	16	340	850	3200
19	300	2300		17	1000	3700	
20	1200	4500		19	4500		
21	4100						
Kuat Tarik Beton = 4.1 MPa							
15			5	13			17
16			38	14		7	30
17	3	16	200	15	10	45	130
18	10	52	870	16	50	240	620
19	95	550	3900	17	250	1100	3600
20	550	2300		18	1200	4100	
21	1300	4400		19	4700		
22	3700						
Kuat Tarik Beton = 3.8 MPa							
16			0	14			4
							10

Tanpa Batu atau Kera					Dengan Batu atau Kera				
Tebal Slab, cm	Modulus Reaksi Tanah Dasar, MPa/m				Tebal Slab, cm	Modulus Reaksi Tanah Dasar, MPa/m			
	Rendah, 20-34	Sedang, 35-49	Tinggi, 50-64	Sangat Tinggi, >70		Rendah, 20-34	Sedang, 35-49	Tinggi, 50-64	Sangat Tinggi, >70
Cat Tarik beton = 3,8 MPa									
17	3	3	6	10	17	4	20	20	100
18	18	17	51	220	15	56	150	550	550
19	78	82	220	870	17	293	570	570	2800
20	293	223	840	3100	18	1100	1100	2500	
21	910	1100	1700		19	1700	1900		
22	2900	1600			20				
23									

Tabel 11. ADU yang diizinkan, Beban Sumbu Kategori 2 (Sambungan tanpa Dowel)

Tebal Slab, cm	Tanpa Bahu atau Kerb				lebar Sab, cm	Dengan Bahu atau Kerb			
	Modulus Reaksi Taraf Dasar, (MPa/cm)					Modulus Reaksi Taraf Dasar, (MPa/cm)			
	Berarah, 20 - 34	Srdang, 35 - 43	Tinggi, 50 - 60	Sangat Tinggi, >70		Berarah, 20 - 34	Srdang, 35 - 45	Tinggi, 50 - 62	Sangat Tinggi, >70
Kuat Tarik Lentur = 4,4 MPa									
14			5	3	12				6
15				26	13			12	53
16	3	13	45	150	14	6	40	86	430
17	15	68	150	740	15	44	180	470	840
18	77	320	820	2300	16	240	800	2100	1502
19	330	1200	1502	2000	17	800	1300	2800	2802
20	1200	1700	2102	3000	18	1200	2100	3100	
21	2500	2300	3102		15	1920	3500		
22	2100	3200			20	2920			
23	2500								
Kuat Tarik Lentur = 3,1 MPa									
15				5	13			2	12
16		3	8	46	14		7	70	87
17	3	16	47	200	15	12	46	130	470
18	18	82	220	870	16	62	240	620	1502
19	85	350	300	2000	17	240	1100	1800	2802
20	330	1300	2102	3000	18	1200	2100	3100	
21	2200	2300	3102		15	1920	3500		
22	2100	4200			20	2920			
23	2500								
Kuat Tarik Lentur = 2,8 MPa									

Tampin Bahau atau Korb				Genggan Bahau atau Korb			
Tebal Slab, cm	Modulus Reaksi Taraf Dasar (Wt Rajm)			Tebal Slab, cm	Modulus Reaksi Taraf Dasar (M Rajm)		
	Berulang, 20 - 34	Sedang, 35 - 49	Tinggi, 50 - 60 g		Berulang, 20 - 34	Sedang, 35 - 49	Tinggi, 50 - 60 Sangat Tinggi, >70
16				14			18
17		3	46	15		9	110
18	3	17	51	16	12	56	550
19	18	82	210	17	67	270	2302
20	78	320	840	18	290	1100	3600
21	250	1100	2300	19	1200	3500	
22	940	3200		20	2820		
23	2900						

5

TEGANGAN PADA BETON

Terdapat 3 penyebab terjadinya tegangan pada beton, antara lain tegangan akibat adanya perbedaan temperatur permukaan dan dasar pelat yang menyebabkan terjadinya *curling* dan *warping*, tegangan akibat beban, dan tegangan akibat gaya gesek.

5.1 Tegangan Akibat Perbedaan Temperatur

Pada siang hari ketika temperatur permukaan pelat beton lebih besar dari pada temperatur di dasar pelat beton, bagian atas cenderung untuk memuai/memanjang dan sebaliknya bagian bawah pelat beton cenderung berkontraksi. Akan tetapi berat sendiri pelat beton mencegah terjadinya ekspansi dan kontraksi, untuk itu gaya tarik terjadi di permukaan atas dan gaya tekan terjadi di bawah/dasar pelat beton. Dan pada malam hari terjadi sebaliknya.

Secara umum, dalam perancangan dan analisa perkerasan beton, distribusi temperatur terhadap ketebalan pelat beton diasumsikan linear. Westergaard (1927) menemukan solusi terhadap tegangan *warping/curling* pada pelat beton yang didukung oleh Fondasi Winkler sebagai berikut:

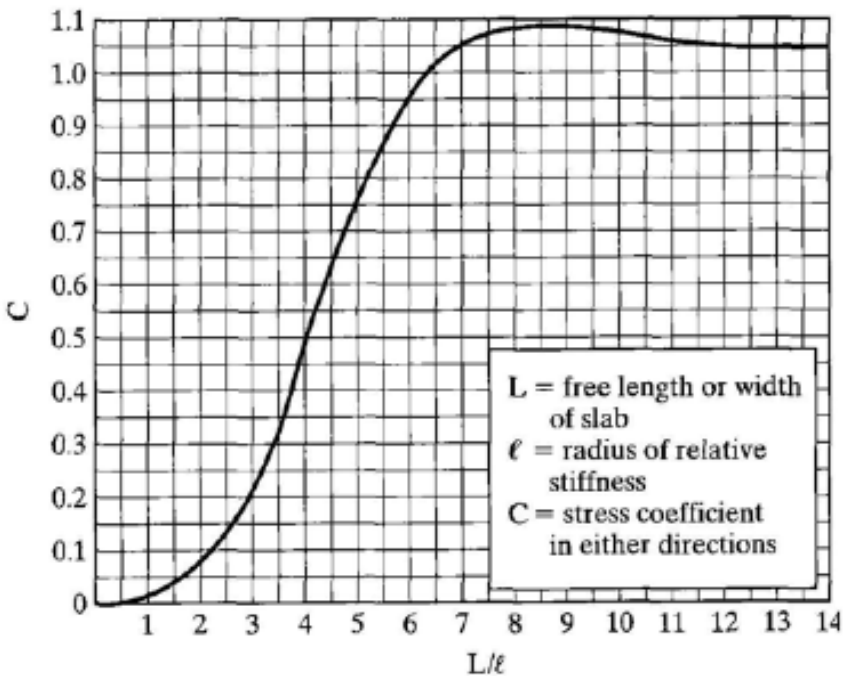
$$\sigma_x = \frac{E \alpha \Delta T}{2(1-\nu^2)} (C_x + \nu C_y) \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma = \frac{CE \alpha \Delta T}{2} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- σ_x adalah tegangan akibat temperatur dalam arah x pada tengah slab (interior) (psi)
- E adalah modulus elastisitas beton (psi)
- αt adalah koefisien termal beton (5×10^{-6} in./in./°F)
- Δt adalah perbedaan temperatur (°F)
- ν adalah poisson rasio beton (0,15)
- C_x adalah koefisien tegangan arah x
- C_y adalah koefisien tegangan arah y
- σ adalah tegangan curling pada tepi di bentang tengah pelat beton
- C adalah koefisien tegangan

Melalui analisa Westergaard, Bradbury (1938) mengembangkan suatu grafik untuk menentukan C_x dan C_y seperti terlihat pada gambar sebagai berikut: Faktor koreksi C, sangat tergantung pada perbandingan L (panjang pelat) dan ℓ (radius kekuatan relatif).

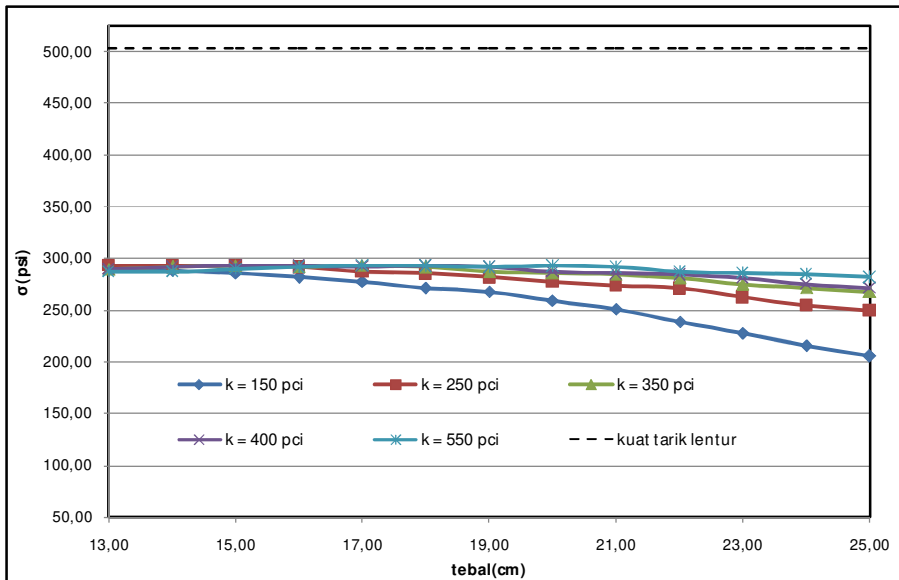


Gambar 3. Faktor Koreksi C

Walaupun tegangan akibat *curling* cukup besar dan dapat menyebabkan beton retak apabila digabungkan dengan tegangan akibat beban lalu lintas, akan tetapi hal tersebut bukan merupakan pertimbangan dalam perancangan ketebalan dikarenakan oleh:

1. Sambungan dan tulangan digunakan untuk mengurangi dan menahan tegangan akibat *curling*. Tegangan *curling* akan berkurang pada saat beton retak.
2. Ketika prinsip *fatigue* digunakan dalam perancangan, bukanlah suatu hal yang mudah untuk menggabungkan tegangan akibat beban dan *curling*. Suatu perkerasan dapat mengalami jutaan repetisi beban selama umur rencana, akan tetapi jumlah tegangan yang diakibatkan *curling* sangatlah terbatas.
3. Tegangan *curling* dapat ditambahkan atau dikurangi terhadap tegangan akibat beban untuk mendapatkan tegangan gabungan. Jika perancangan ditentukan oleh tegangan pada tepi (*edge stress*), tegangan akibat *curling* harus ditambahkan pada tegangan akibat beban di siang hari dan sebagai pengurang pada tegangan akibat beban di malam hari. Akibat efek kompensasi dan umumnya banyak kendaraan berat beroperasi di malam hari, tidak menjadi kritis apabila tegangan *curling* diabaikan.

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan (8) dan persamaan (9), dengan asumsi nilai modulus elastisitas beton adalah $3,5 \times 10^6$ psi (24000 MPa), panjang pelat beton adalah 5 m, lebar pelat beton adalah 3,5 m, serta perbedaan temperatur adalah 27°F (15°C). Hasil analisa tegangan akibat temperatur dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan Nilai Tebal dengan Tegangan akibat Perbedaan Temperatur

Dari Gambar 4 terlihat bahwa tegangan akibat perbedaan temperatur (curling/warping stress) apabila dibandingkan dengan nilai kuat tarik lentur beton, bukan merupakan hal yang menentukan dalam perancangan, tegangan akibat perbedaan temperatur ini akan dikompensasi melalui sambungan dan penulangan pada pelat beton. Gambar tersebut juga memperlihatkan bahwa penggunaan lapis fondasi yang semakin kaku akan menambah tegangan curling seiring dengan peningkatan ketebalan pelat beton.

5.2. Tegangan Akibat Beban

Westergaard menganggap suatu pelat yang membentang dengan panjang dan lebar yang tidak terbatas dari beban di sudut pelat. Dengan menggunakan metoda perkiraan berurutan, Westergaard menemukan persamaan berikut untuk menghitung tegangan maksimum apabila pelat dikenakan beban di sudut:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{\alpha \sqrt{l}}{l} \right)^{0.6} \right] \dots\dots\dots (10)$$

Menurut Westergaard beban interior merupakan kasus di mana suatu beban bekerja pada jarak yang cukup dari tepi pelat. Dalam penurunannya, Westergaard mendefinisikan radius kekakuan relatif sebagai berikut:

$$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25} \dots\dots\dots (11)$$

- Keterangan:
- E adalah modulus elastisitas beton (psi)
 - ν adalah poisson rasio dari beton (0,15)
 - h adalah ketebalan pelat beton (inci)
 - k adalah modulus reaksi tanah dasar (pci)

Westergaard menurunkan persamaan berikut sebagai tegangan maksimum di interior:

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{b} + 1.069 \right) \right] \dots\dots\dots (12)$$

- Keterangan:
- oi adalah tegangan maksimum di interior pelat beton (psi)
 - P adalah beban yang dikenakan pada pelat beton (lb)
 - h adalah tebal pelat beton (inci)
 - l adalah radius kekakuan relatif (inci)
- dimana,

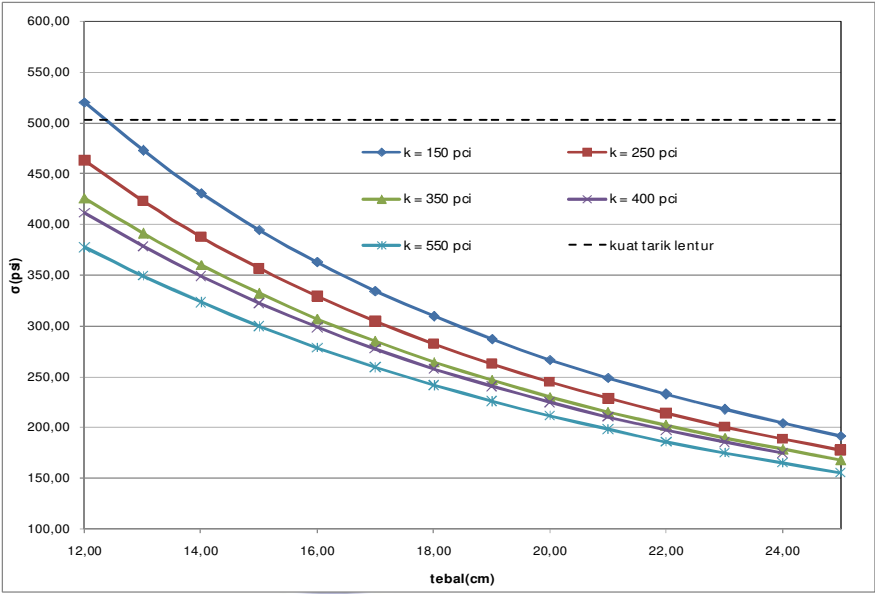
$$b = a, \text{ bila } a \geq 1.724 h \dots\dots\dots (13)$$

$$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \text{ bila } a < 1,724 h \dots\dots\dots (14)$$

Westergaard mendefinisikan beban tepi sebagai kasus di mana ban berada di tepi pelat dan berada pada jarak yang cukup dari bagian sudut pelat, untuk itu tegangan maksimum yang terjadi dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_s = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{a} \right) + 0.666 \left(\frac{a}{l} \right) - 0.034 \right] \dots\dots\dots (15)$$

Perhitungan tegangan dilakukan pada tiga titik di pelat beton, yaitu di sudut (*corner stress*), di tepi (*edge stress*) dan di tengah (*interior stress*) dengan menggunakan persamaan (10), persamaan (12), dan persamaan (15). Metode ini hanya dapat diterapkan untuk beban roda tunggal, untuk itu beberapa asumsi yang digunakan dalam perhitungan ini adalah modulus elastisitas beton adalah $3,5 \times 10^6$ psi (24000 MPa), beban untuk roda tunggal adalah 2,5 ton serta beban untuk roda ganda adalah 4 ton (5 ton untuk sumbu tunggal roda tunggal dan 8 ton untuk sumbu tunggal roda ganda). Hasil perhitungan tegangan, dimana hanya tegangan terbesar yang diambil, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan Nilai Tebal dengan Tegangan akibat Beban

Gambar 5 memperlihatkan bahwa ketebalan pelat beton sangat mempengaruhi terhadap tegangan yang terjadi akibat beban. Dari hasil perhitungan, terlihat bahwa dengan batasan ketebalan tertentu, maka penggunaan mutu beton yang lebih rendah dapat diterapkan, hasil dari perhitungan ini juga diambil sebagai batasan dalam pembuatan katalog rancangan ketebalan perkerasan kaku untuk volume lalu lintas rendah.

5.3. Tegangan Akibat Gaya Gesek

Gesekan antara pelat beton dengan lapis fondasi dapat menyebabkan tegangan tarik pada beton, tulangan (jika ada) dan *tie bar*. Untuk perkerasan kaku, jarak antara sambungan kontraksi harus dirancang agar tegangan akibat gaya gesek yang terjadi tidak mengakibatkan retak pada beton. Untuk jarak sambungan yang lebih panjang perlu disediakan perkuatan dengan tulangan untuk mengatasi tegangan akibat gaya gesek. Untuk menghitung tegangan yang timbul akibat gaya gesek, maka persamaan berikut dapat digunakan:

$\sigma_f = \frac{\gamma_c L f_a}{2}$ (16)

Keterangan:

- σ_f adalah tegangan akibat gaya gesek (psi)
- γ_c adalah berat isi beton (pci)
- L adalah panjang pelat beton (inci)
- f_a koefisien gesek beton

Apabila temperatur menurun, maka pelat beton cenderung bergerak dari kedua sisi menuju ke tengah, akan tetapi lapisan di bawahnya mencegah pelat untuk bergerak sehingga terjadi tegangan akibat gaya gesek antara pelat beton dan lapis Fondasi. Tegangan tarik maksimum yang terjadi berada di tengah pelat, dengan asumsi bahwa nilai koefisien gesek beton adalah 1,5 dan panjang slab sebesar 5 m maka tegangan akibat gaya gesek dapat dihitung sebagai berikut:

$\sigma_f = \frac{0.0868 \times 196 \times 1.5}{2} = 12.8 \text{ psi (88 kPa)} < S'_c = 3500 \text{ kPa}$

6

ANALISIS SENSITIVITAS

A nalisis sensitivitas merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai tebal yang akan terjadi akibat perubahan parameter. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh parameter perhitungan tebal perkerasan berdasarkan AASHTO 1993, digunakan data dengan variasi nilai lalu lintas, kekuatan beton, reliabilitas, koefisien penyalur beban, koefisien drainase, dan variasi modulus reaksi tanah dasar seperti dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Variasi Perhitungan Tebal Perkerasan Beton

No	Parameter	Variasi
1	Lalu Lintas (ESAL)	700.000 ; 800.000 ; 900.000 ; 1.000.000
2	Reliability	50% ; 60% ; 70% ; 80%
3	Modulus reaksi tanah dasar (pci)	150 ; 250 ; 350 ; 550
4	Koefisien penyalur beban	2,5 ; 3,1 ; 3,6 ; 4,4
5	Kekuatan beton (kg/cm^2)	250 ; 350 ; 400 ; 450
6	Koefisien drainase	0,70 ; 0,80 ; 0,90 ; 1,00 ; 1,10

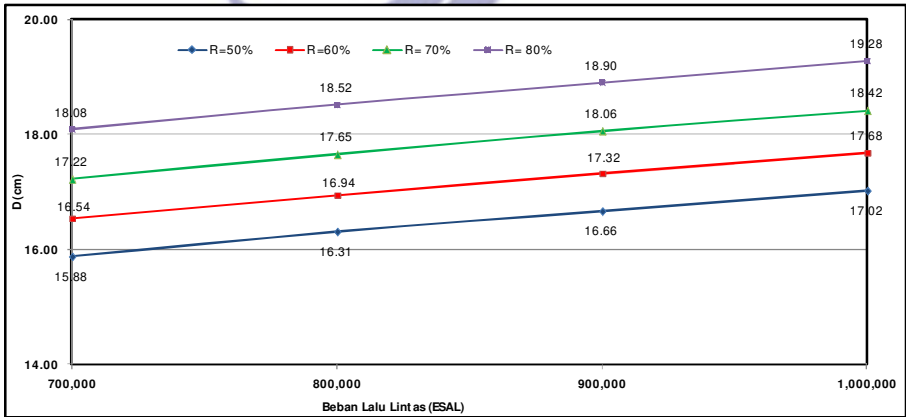
Dari hasil pengujian analisis sensitivitas, perubahan variasi nilai koefisien penyalur beban memiliki sensitivitas paling tinggi apabila

dibandingkan dengan variasi parameter lainnya. Presentase rata-rata perubahan ketebalan akibat adanya perbedaan variasi nilai koefisien penyalur beban yaitu sebesar 12 %. Dari hasil tersebut terlihat bahwa penggunaan alat transfer beban berupa dowel dan penggunaan bahu merupakan hal yang cukup penting terhadap penentuan ketebalan perkerasan. Tabel 13 menunjukkan pengaruh parameter koefisien penyalur beban, kekuatan beton, modulus reaksi tanah dasar ,reliabilitas, lalu lintas, dan koefisien drainase terhadap perubahan tebal.

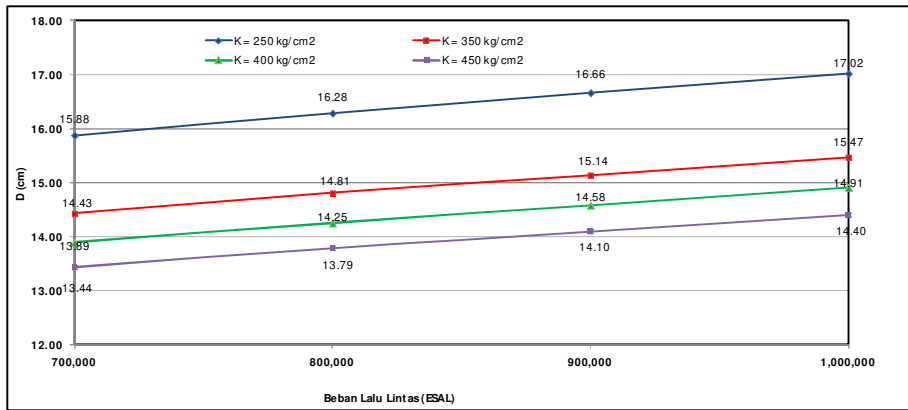
Tabel 13. Persentase Perubahan Nilai Ketebalan

No	Parameter	Persentase
1	Reliability	4%
2	Kekuatan Beton (kg/cm ²)	5%
3	Koefisien drainase	7%
4	Modulus reaksi tanah dasar (pci)	8%
5	Koefisien penyalur beban	12%
6	Lalu Lintas (ESAL)	2%

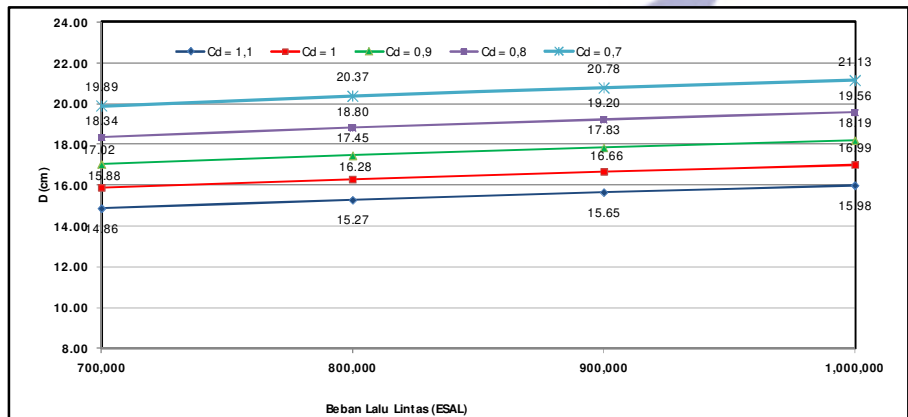
Pengaruh perubahan variasi parameter perencanaan terhadap ketebalan pelat beton dengan variasi beban yang ditetapkan sebesar 700.000 ESAL, 800.000 ESAL, 900.000 ESAL, dan 1.000.000 ESAL dapat dilihat pada Gambar 6 sampai dengan Gambar 10.



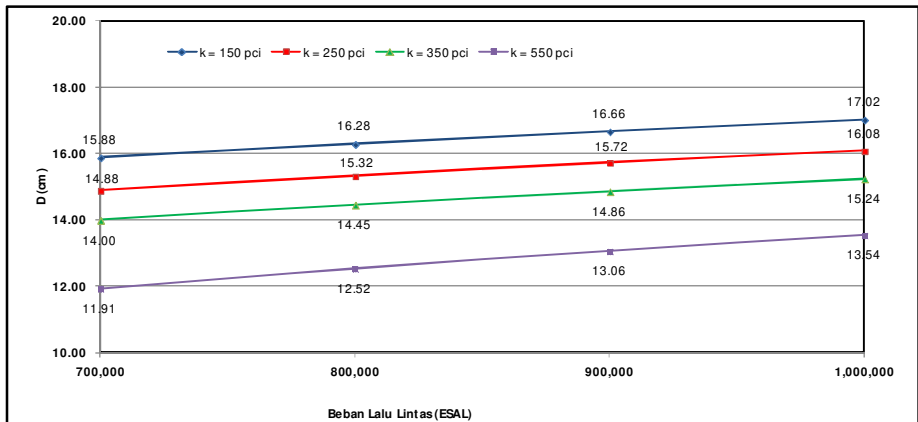
Gambar 6. Pengaruh Variasi Nilai Reliability dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan



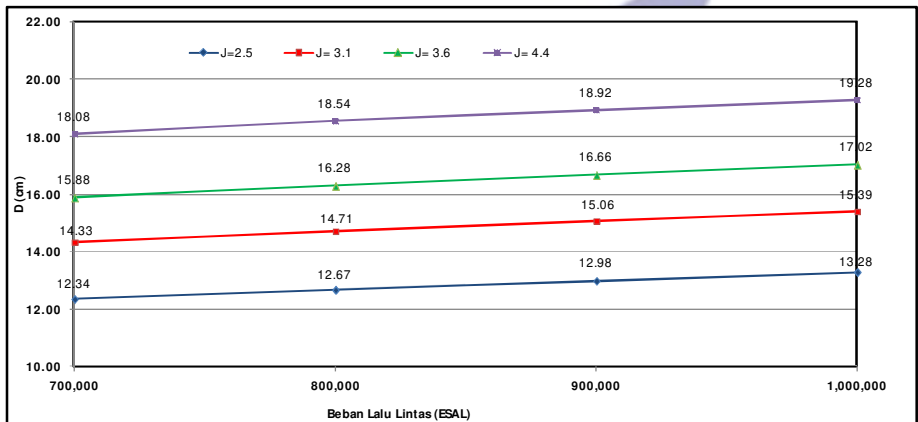
Gambar 7. Pengaruh Variasi Mutu Beton dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan



Gambar 8. Pengaruh Variasi Nilai Koefisien Drainase dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan



Gambar 9. Pengaruh Variasi Nilai Modulus Reaksi Tanah Dasar dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan



Gambar 10. Pengaruh Variasi Nilai J dan Beban Lalu Lintas terhadap Ketebalan

Dari hasil analisis sensitivitas terlihat bahwa pengaruh nilai beban lalu lintas memiliki nilai sensitivitas yang kecil, hal ini disebabkan karena pengujian analisis sensitivitas yang dilakukan adalah pada beban lalu lintas yang kecil, yaitu beban lalu lintas dibatasi kurang dari 1.000.000 ESAL.

7

HASIL PENGUJIAN LAPANGAN

Pengujian lapangan dilakukan dengan maksud untuk membandingkan secara struktural perkerasan kaku berkategori lalu lintas rendah yang telah ada dengan katalog perkerasan kaku lalu lintas rendah yang terdapat pada AASHTO 1993.

Dari hasil analisis sensitivitas, parameter kekuatan beton hanya memberikan pengaruh rata-rata sebesar 5% terhadap ketebalan perkerasan kaku, akan tetapi kekuatan beton sangat berpengaruh terhadap ketahanan struktur perkerasan kaku dalam menerima beban lalu lintas karena sebagian besar beban yang terjadi akibat lalu lintas akan langsung diterima oleh pelat beton itu sendiri. Untuk mengetahui mutu beton pada perkerasan kaku yang telah ada di lapangan terdapat dua cara pendekatan, yaitu dengan metoda destruktif (*core drill*) dan metoda yang tidak merusak yang salah satunya dengan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Lokasi pengujian lapangan dipilih berdasarkan tingkat lalu lintas, dengan asumsi bahwa lalu lintas selama umur layan 10 tahun adalah 1.000.000 ESAL.

7.1. Hasil Perhitungan Lalu Lintas

Perhitungan lalu lintas dilakukan untuk menentukan lokasi pengujian dengan tingkat lalu lintas rendah. Beberapa ruas jalan yang dilakukan perhitungan lalu lintas antara lain ruas Jalan Gedebage Selatan Bandung, ruas Jalan Baru Sadu Soreang, ruas Jalan Raya Cijerah serta ruas Jalan Jati Tujuh. Hasil perhitungan lalu lintas dapat dilihat pada Tabel 14 dan Tabel 15.

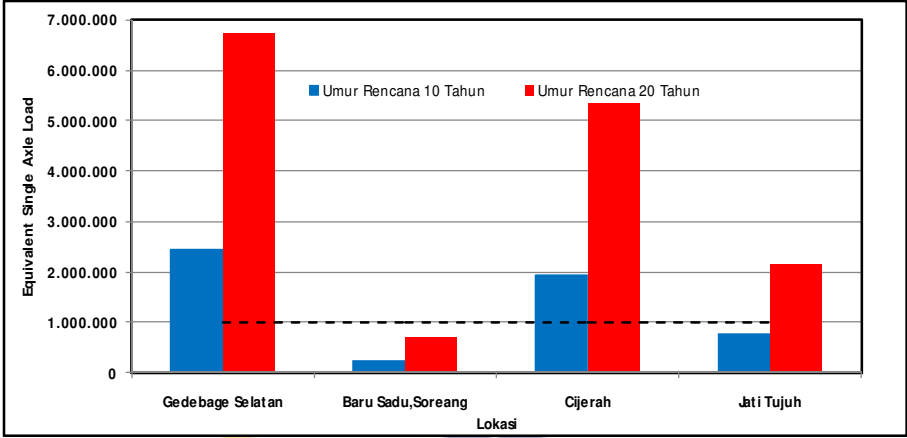
Tabel 14. Data Perhitungan Lalu Lintas Ruas Cijerah dan Gedebage

KELAS KENDARAAN	Cijerah			Gedebage		
	LHR (2012)	ESAL		LHR (2012)	ESAL	
		(UR 10 tahun)	(UR 20 tahun)		(UR 10 tahun)	(UR 20 tahun)
1. Kendaraan Ringan	2.761	524	1.443	2.530	471	1.297
2. Truk Sedang 2 Sumbu	1.085	97.018	267.062	458	40.185	110.617
3. Truk Besar 2 Sumbu	123	495.970	1.365.259	59	235.887	649.326
4. Truk 3 Sumbu	66	1.270.626	3.497.661	113	2.135.307	5.877.868
5. Truk 4 Sumbu	0	0	0	2	1.164	3.204
6. Truk Gandengan	3	0	0	0	0	0
7. Trailer 3 & 4 Sumbu	0	0	0	0	0	0
8. Trailer 4 & 5 Sumbu	2	75.212	207.028	1	24.596	67.706
9. Trailer 5 & 6 Sumbu	0	0	0	0	0	0
10. Bus Besar	3	2.068	5.693	8	6.507	17.911
TOTAL	4.041	1.941.419	5.344.145	3.170	2.444.116	6.727.929

Tabel 15. Data Perhitungan Lalu Lintas Ruas Soreang dan Jatitujuh

KELAS KENDARAAN	Soreang			Jatitujuh		
	LHR (2012)	ESAL		LHR (2012)	ESAL	
		(UR 10 tahun)	(UR 20 tahun)		(UR 10 tahun)	(UR 20 tahun)
1. Kendaraan Ringan	810	120	332	844	158	432
2. Truk Sedang 2 Sumbu	213	14.928	41.092	585	51.440	141.072
3. Truk Besar 2 Sumbu	22	70.943	195.283	10	41.688	114.656
4. Truk 3 Sumbu	10	150.944	415.500	32	605.994	1.662.000
5. Truk 4 Sumbu	4	2.170	5.972	1	518	1.422
6. Truk Gandengan	0	0	0	0	0	0
7. Trailer 3 & 4 Sumbu	0	0	0	0	0	0
8. Trailer 4 & 5 Sumbu	0	0	0	1	65.730	180.260
9. Trailer 5 & 6 Sumbu	1	5.825	16.035	0	4.805	13.364
10. Bus Besar	12	7.472	20.569	5	3.803	10.434
TOTAL	1.070	252.402	694.783	1.478	774.137	2.123.639

AASHTO 1993 mensyaratkan nilai lalu lintas untuk jalan dengan lalu lintas rendah adalah di bawah 1.000.000 ESAL. Apabila dilihat dari Tabel 14 dan Tabel 15, lokasi yang memenuhi persyaratan untuk kategori jalan dengan lalu lintas rendah dengan umur rencana 10 tahun adalah jalan Baru Sadu Soreang serta jalan Jati Tujuh. Sedangkan untuk umur rencana 20 tahun hanya ruas Jalan Baru Sadu saja yang memenuhi persyaratan AASHTO 1993. Grafik pada Gambar 11 memperlihatkan nilai ESAL untuk umur rencana 10 tahun dan 20 tahun menurut masing-masing lokasi pengamatan beserta batasan ESAL sesuai dengan persyaratan AASHTO untuk lalulintas rendah.



Gambar 11. Data Lalu Lintas

7.2. Hasil Pengujian Falling Weight Deflectometer (FWD)

Pengujian Falling Weight Deflectometer dilakukan untuk menentukan nilai modulus reaksi tanah dasar dan nilai modulus elastisitas beton melalui cara perhitungan balik (back calculation) sesuai langkah-langkah pada perhitungan metode AASHTO. Tabel 16 menunjukkan nilai modulus reaksi tanah dasar dan modulus elastisitas beton pada Ruas Baru Sadu, Soreang dan Jatitujuh.

Tabel 16. Nilai Modulus Beton dan Modulus Reaksi Tanah Dasar

Lokasi	Modulus Reaksi Tanah Dasar (MPa/m)	Modulus Elastisitas Beton (MPa)
Baru Sadu,Soreang	56	23178,76
Jati Tujuh	49	24441,26

Dari hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 16, lokasi Baru Sadu dan Jatitujuh memiliki kualitas tanah dasar yang buruk. Sedangkan apabila dilihat dari segi kualitas mutu beton, hasilnya tidak memenuhi batasan yang disyaratkan oleh AASHTO, yaitu sebesar 34.500 MPa.

Jika dilihat dari perbandingan antara nilai ketebalan menurut AASHTO (perhitungan maupun katalog) dengan nilai ketebalan yang ada di lapangan, maka ketebalan yang ada di lapangan memiliki tebal yang lebih tinggi. Perbandingan nilai ketebalan dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Perbandingan Tebal Slab Beton

Lokasi	Tebal slab (cm)		
	Lapangan	AASHTO (tabel)	AASHTO (perhitungan)
Baru Sadu,Soreang	30	15	15
Jati Tujuh	26	19	18

8

KATALOG PERKERASAN KAKU

Penentuan katalog perkerasan kaku didasarkan atas pertimbangan dari segi kepraktisan dan kemudahan dalam hal perancangan ketebalan pelat beton. Tabel 18, Tabel 19, Tabel 20, dan Tabel 21 menyajikan katalog tebal pelat perkerasan kaku yang dapat digunakan untuk perencanaan jalan bervolume lalu lintas rendah apabila pendekatan perencanaan yang lebih detail tidak memungkinkan. Tabel 18, Tabel 19 didasarkan pada tingkat reliabilitas 50%, masing-masing dengan dan tanpa lapis fondasi material berbutir. Tabel 20 dan Tabel 21 didasarkan pada tingkat reliabilitas 75%, masing-masing dengan dan tanpa lapis fondasi material berbutir. Asumsi yang digunakan pada katalog perencanaan adalah sebagai berikut:

- Apabila menggunakan lapis fondasi bawah, material berbutir yang digunakan harus memiliki kualitas yang baik dengan ketebalan antara 10 – 15 cm
- Nilai rata – rata kuat tarik lentur berkisar antara 4,1 – 4,8 MPa
- Nilai rata – rata modulus elastisitas beton 34.500 MPa
- Kualitas drainase cukup ($C_d = 1,0$)

- Beban lalu lintas:
 - a. Tinggi 700.000 - 1.000.000 ESAL;
 - b. Sedang 400.000 - 600.000 ESAL;
 - c. Rendah 50.000 - 300.000 ESAL
- Kualitas tanah dasar yang dibatasi dengan kisaran modulus reaksi tanah dasar efektif (k) adalah sebagai berikut:
 - a. Sangat Baik- Baik Lebih besar dari 110 MPa/ m
 - b. Cukup 70 sampai 95 MPa/ m
 - c. Sangat Buruk-Buruk kurang dari 70 MPa/ m

Tabel 18. Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas bervolume Rendah: Rekomendasi Tebal Pelat beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar

Reliabilitas yang ditetapkan : 50%									
Tanpa lapis pondasi material berbutir									
Alat Transfer Beban	Tidak Ada				Ada				
Daya Dukung Tepi (Bahu)	Tidak Ada		Ada		Tidak Ada		Ada		
Sc	4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8	
Lalu Lintas Rendah									
Sangat Baik & Baik	14	13	13	13	13	13	13	13	
Cukup	14	13	13	13	13	13	13	13	
Buruk & Sangat Buruk	14	13	13	13	14	13	13	13	
Lalu Lintas Sedang									
Sangat Baik & Baik	16	15	15	13	15	14	14	13	
Cukup	16	15	15	13	15	14	14	13	
Buruk & Sangat Buruk	16	15	15	13	15	14	14	13	
Lalu Lintas Berat									
Sangat Baik & Baik	18	16	16	13	17	15	15	13	
Cukup	18	16	16	15	17	15	15	14	
Buruk & Sangat Buruk	18	17	17	15	17	15	15	14	

Sumber: AASHTO 1993 *Guide for Design of Pavement Structures* Published by the American Association of State Highway and Transportation Office

Tabel 19. Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas Bervolume Rendah: Rekomendasi Tebal Pelat Beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar

Reliabilitas yang ditetapkan : 50%									
dengan lapis pondasi material berbutir									
Alat Transfer Beban	Tidak Ada				Ada				
Daya Dukung Tepi (Bahu)	Tidak Ada		Ada		Tidak Ada		Ada		
Sc	4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8	
Kualitas Tanah Dasar	Lalu Lintas Rendah								
Sangat Baik & Baik	13	13	13	13	13	13	13	13	
Cukup	13	13	13	13	13	13	13	13	
Buruk & Sangat Buruk	13	13	13	13	13	13	13	13	
	Lalu Lintas Sedang								
Sangat Baik & Baik	15	13	13	13	14	13	13	13	
Cukup	15	13	14	13	14	13	13	13	
Buruk & Sangat Buruk	15	14	14	13	15	13	13	13	
	Lalu Lintas Berat								
Sangat Baik & Baik	17	15	15	14	15	14	13	13	
Cukup	17	15	15	14	15	14	14	13	
Buruk & Sangat Buruk	17	15	15	14	16	15	14	13	

Sumber: AASHTO 1993 *Guide for Design of Pavement Structures Published by the American Association of State Highway and Transportation Office*

Tabel 20. Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas bervolume Rendah: Rekomendasi Tebal Pelat beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar

Reliabilitas yang ditetapkan : 75%									
Tanpa lapis pondasi material berbutir									
Alat Transfer Beban	Tidak Ada				Ada				
Daya Dukung Tepi (Bahu)	Tidak Ada		Ada		Tidak Ada		Ada		
Sc (MPa)	4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8	
Kualitas Tanah Dasar	Lalu Lintas Rendah								
Sangat Baik & Baik	15	14	14	13	15	13	13	13	
Cukup	15	14	15	13	15	13	13	13	
Buruk & Sangat Buruk	15	14	15	13	15	14	13	13	
	Lalu Lintas Sedang								
Sangat Baik & Baik	17	16	16	15	17	15	15	14	
Cukup	17	16	16	15	17	15	15	14	
Buruk & Sangat Buruk	17	16	16	15	17	15	15	14	
	Lalu Lintas Tinggi								
Sangat Baik & Baik	19	18	18	16	18	17	17	15	
Cukup	19	18	18	16	18	17	17	15	
Buruk & Sangat Buruk	19	18	18	17	18	17	17	15	

Sumber: AASHTO 1993 *Guide for Design of Pavement Structures Published by the American Association of State Highway and Transportation Office*

Tabel 21. Katalog Perencanaan Perkerasan Kaku Untuk Lalu Lintas Bervolume Rendah: Rekomendasi Tebal Pelat Beton minimum (cm) untuk 3 Kategori Lalu Lintas dan 5 Tingkatan Kualitas Tanah Dasar

Reliabilitas yang ditetapkan : 75%									
Dengan lapis pondasi material berbutir									
Alat Transfer Beban		Tidak Ada				Ada			
Daya Dukung Tepi (Bahu)		Tidak Ada		Ada		Tidak Ada		Ada	
Sc (MPa)		4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8	4.1	4.8
Kualitas Tanah Dasar		Lalu Lintas Rendah							
Sangat Baik & Baik		14	13	13	13	13	13	13	13
Cukup		15	13	13	13	13	13	13	13
Buruk & Sangat Buruk		15	13	13	13	13	13	13	13
		Lalu Lintas Sedang							
Sangat Baik & Baik		16	15	15	13	15	14	14	13
Cukup		17	15	15	14	16	14	14	13
Buruk & Sangat Buruk		17	15	15	14	16	15	14	13
		Lalu Lintas Tinggi							
Sangat Baik & Baik		18	17	17	15	17	15	15	14
Cukup		18	17	17	15	17	15	15	14
Buruk & Sangat Buruk		18	17	17	15	17	16	16	14

Sumber: AASHTO 1993 *Guide for Design of Pavement Structures* Published by the American Association of State Highway and Transportation Office

Daftar Pustaka

- AASHTO. 1986. *Guide for Design of Pavement Structures Volume 2*
- AASHTO. 1993. *Guide for Design of Pavement Structures Published by the American Association of State Highway and Transportation Offices*
- AASHTO. 2004. Designation M 155-87 (2000) *Standard Specification for Granular Material to Control Pumping Under Concrete Pavement*
- Affandi, Furqon. 2010. *Perencanaan Perkerasan Kaku Bersambung Tanpa Tulangan*. Laporan Penelitian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum
- D. Hall, Kevin and Nataraj Banihatti. *Structural Design of Portland Cement Concrete Overlays for Pavement*. Department of Civil Engineering: University of Arkansas
- Heukelom, W. and A.J.G. Klomp. 1962. *Dynamic Testing as a Means of Controlling pavements During and After Construction. Proceedings International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor. Michigan
- Huang, Yang H. 2004. *Pavement Analysis and Design Second Edition*. University of Kentucky.
- National Cooperative Highway Research Program. 2004. *Guide for Mechanistic-Empirical Design*.
- Perrie, Bryan. *Low volume Concrete Roads*. South Africa. Cement and Concrete Institute.
- <http://www.pavementinteractive.org/category/pavement/pavement-types/rigid-pavement-types>, (diakses Desember 2012)
- <http://nptel.iitm.ac.in/courses/105104098/2>, (diakses Desember 2012)

