

PERANCANGAN PERKERASAN JALAN BETON SEMEN PRATEGANG

Ir. A. TATANG DACHLAN, M.Eng.Sc.



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN

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

PERANCANGAN PERKERASAN JALAN BETON SEMEN PRATEGANG

Penulis:

Ir. A. Tatang Dachlan, M.Eng.Sc.

Cetakan Ke-1, Desember 2013

©Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan
Pengembangan Jalan dan Jembatan

No. ISBN : 978 602 264 0615

Kode Kegiatan : 02-PPK3-001-107-E13

Kode Publikasi : IRE-TR-122/ST/2013

Koordinator Penelitian

Ir. Nyoman, Suaryana. M.Sc.

Editor

Prof (R) Dr.Ir. Furqon Affandi, M.Sc

Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc

Layout dan Design

Yosi Samsul Maarif, S.Sn

Penerbit:

ZipBooks (Anggota IKAPI)
Jl. Margacinta no.204 Bandung

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

info@pusjatan.pu.go.id



Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Kementerian Pekerjaan Umum Tahun 2013, pada DIPA Puslitbang Jalan dan Jembatan. 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 dibuat di dalam publikasi ini sepenuhnya merupakan tanggung jawab penulis.

Perkerasan jalan beton semen sebagai perkerasan jalan menjadi suatu pilihan karena berdasarkan analisis dan evaluasi telah terbukti bahwa kinerjanya lebih unggul dibandingkan dengan perkerasan beraspal.

Prategang mengaplikasikan gaya tekan secara konsentris atau eksentris, sepanjang sumbu longitudinal suatu struktur seperti perkerasan beton. Tekanan ini menginduksi tegangan tekan (precompressive stress) dalam perkerasan, dan dapat menghilangkan atau mengurangi tegangan tarik yang disebabkan beban lalu lintas. Dan temperatur struktur prategang dapat dirancang dengan pratarik (pretensioned) atau pascatarik (posttensioned) atau keduanya. Naskah ini bertujuan menyediakan bahan untuk merancang perkerasan beton semen prategang, sebagai suatu alternatif dalam merancang perkerasan beton semen untuk jalan.

Naskah ilmiah ini merupakan salah satu kontribusi Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan dalam penyediaan teknologi perencanaan perkerasan beton semen prategang. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi para praktisi, akademisi maupun pelaksana lapangan.

Bandung, Desember 2013

Penulis,

Ir. A. Tatang Dachlan, M.Eng.Sc.

Peneliti Utama Bidang Perkerasan Jalan



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	4
1.2 Kenapa Menggunakan Perkerasan Beton Prategang	4
1.3 Rumusan Masalah	5
2. KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 AASHTO	7
2.2 Sejarah Perkembangan Aplikasi Beton Prategang di Dunia	11
2.3 American Concrete Institute (ACI 325.7R-88)	12
2.4 FHWA	14
2.4.1 Studi kelayakan (David K. Merritt Cs., FHWA, 2000)	14
2.4.2 Percobaan perkerasan beton pracetak-prategang (Luh M.Chang Cs., FHWA, 2004)	15
2.4.3 Demontrasi perkerasan pracetak-prategang (David K. Merritt Cs., FHWA-2008)	17
2.4.4 Center for Transportation Research, University of Texas, Austin (By William N. Nickas, P.E; FHWA, 2002)	18
2.5 Evaluasi kinerja perkerasan beton pracetak-prategang (Grant C. Luckenbill, E.I. July. 2009)	18
2.6 Perancangan tebal perkerasan beton prategang (Ms. Anal Sheth, 2012)	19
2.7 Penelitian Perkerasan Beton Pracetak-Prategang di Indonesia	20
2.7.1 Puslitbang Jalan dan Jembatan (2008)	20
2.8 Perencanaan dengan Prinsip Mekanistik (PT. Adhi Karya)	40
2.8.1 Pendahuluan	40
2.8.2 Beban Kendaraan	41
2.8.3 Beban Termal	44
2.8.4 Pengaruh Susut dan Rangkak	47

2.8.5	Desain PPCP (PT Adhi Karya)	50
2.9	American Concrete Institute (ACI)	71
2.9.1	Komponen rancangan tebal perkerasan beton prategang	71
2.9.2	Persyaratan Tebal Perkerasan	71
2.9.3	Koefisien Termal dan Friksi dalam Siklus Perubahan Panjang	71
2.9.4	Perumusan Perubahan Panjang Beton Prategang	72
2.9.5	Langkah Perhitungan	74
2.9.6	Siklus Perubahan Panjang Tahunan pada Perkerasan	77
2.9.7	Kombinasi Tegangan Kritis Pada Permukaan Atas Slab	78
2.9.8	Kombinasi Tegangan Kritis Di Bawah Slab	78
2.9.9	Tegangan Akibat Beban Lalu Lintas	78
2.9.10	Kombinasi Tegangan Izin dalam Perkerasan Prategang	79
2.9.11	Sambungan Perkerasan Beton Prategang	79
2.9.12	Dimensi Penutup Sambungan	81
2.9.13	Contoh Perhitungan	83
3.	PENUTUP	90



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Rumus umum penentuan tebal perkerasan beton (AASHTO 1993)	18
Gambar 2	Perhitungan Lalu Lintas	19
Gambar 3	Perhitungan Tebal Slab Beton	19
Gambar 4	Model elemen perkerasan kaku	22
Gambar 5	Konstanta spring pada elemen perkerasan kaku	22
Gambar 6	Beban Truk Trailer Panjang 14 m dan Berat Total 50 Ton	23
Gambar 7	Pola pembebanan Model-A, Kondisi-1	24
Gambar 8	Pola pembebanan Model-B, Kondisi-1	25
Gambar 9	Pola pembebanan Model-C, Kondisi-1	25
Gambar 10	Pola pembebanan Model-D, Kondisi-1	25
Gambar 11	Pola pembebanan Model-E, Kondisi-1	26
Gambar 12	Pola pembebanan Model-F, Kondisi-1	26
Gambar 13	Pola pembebanan akibat gaya rem, Kondisi-1	26
Gambar 14	Pola pembebanan Model-A, Kondisi-2	27
Gambar 15	Pola pembebanan Model-B, Kondisi-2	27
Gambar 16	Pola pembebanan Model-C, Kondisi-2	28
Gambar 17	Pola pembebanan Model-D, Kondisi-2	28
Gambar 18	Pola pembebanan Model-E, Kondisi-2	28
Gambar 19	Pola pembebanan Model-F, Kondisi-2	30
Gambar 20	Pola pembebanan akibat gaya rem, Kondisi-2	30
Gambar 21	Momen M11 arah transversal Akibat Beban Envelope (Model A~F)	31
Gambar 22	Momen M22 arah longitudinal Akibat Beban Envelope (model A~F)	33
Gambar 23	Gaya Geser yang terjadi pada struktur Perkerasan kaku	33
Gambar 24	Momen M11 dan M22 akibat beban Envelope	33
Gambar 25	Gaya Geser yang terjadi pada struktur Perkerasan kaku	33
Gambar 26	Perhitungan dimensi perkuatan geser	34
Gambar 27	Defleksi pada sambungan dengan variasi tebal dan beban	35
Gambar 28	Disain Defleksi pada beton Pracetak Tanpa Prategang	36
Gambar 29	Ilustrasi besarnya tegangan akibat termal dan gabungan termal	37
Gambar 30	Plate on Elastic Foundation	38

Gambar 31	Plate on Dense Liquid Model	38
Gambar 32	Lokasi Roda Kendaraan pada Pelat Westergaard	39
Gambar 33	Plate on Elastic Solid Model	40
Gambar 34	Distribusi tegangan akibat temperatur pada penampang beton	41
Gambar 35	Distribusi Temperatur terhadap Ketebalan Pelat	43
Gambar 36	Kurva Kegagalan Fatigue Pada Slab dan Balok (Darter, Roesler)	49
Gambar 37	Ilustrasi erosi pumping di sekitar joint	50
Gambar 38	Ilustrasi faulting pada joint	51
Gambar 39	Ilustrasi spalling di sekitar joint	57
Gambar 40	Pemodelan posisi interior, edge, dan corner loading	60
Gambar 41	Perbandingan Beberapa Model Kegagalan Fatigue pada Perkerasan Beton	65
Gambar 42	Tegangan Fleksural Maksimum pada arah Memanjang dan Melintang, dan Lendutan Tepi pada Beban Sumbu 20 kip (90 kN).	73
Gambar 43	Sambungan Ganda pada Kontruksi Perkerasan Prategang.	75
Gambar 44	Sambungan Tunggal pada Konstruksi Perkerasan Prategang	76
Gambar 45	Detil Sambungan Muai dalam Perkerasan Beton Prategang	79
Gambar 46	Tipikal Fluktuasi Temperatur dan Muai-Susut pada Sambungan di Buntu-Kebumen (September 2010).	82
Gambar 47	Tipikal Trend Muai-susut di Sub-Tropis dan Tropis,	83
Gambar 48	Pemasangan Tendon pada Ujicoba Skala Penuh (atas), dan Kondisi Umur Satu Tahun (bawah), Buntu-Kebumen (Des 2010)	83



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Sejarah Perkerasan Jalan Beton Semen Prategang	8
Tabel 2	Joint Displacements	29
Tabel 3	Hasil analisis dengan SAP-2000	34
Tabel 4	Variasi Tebal beton Pracetak dan Beban Terhadap Defleksi pada Sambungan	38
Tabel 5	Variasi Tebal beton Pracetak Tanpa Prategang dan Defleksi yang Terjadi	36
Tabel 6	Temperatur Gradien yang direkomendasikan oleh IRC	42
Tabel 7	Temperatur Gradien dan Distribusi Frekwensinya	43
Tabel 8	Hasil Perhitungan Metode Westergaard	55
Tabel 9	Perbandingan Tegangan (MPa) Westergaard vs EverFE	57
Tabel 10	Perbandingan Tegangan (MPa) : Westergaard vs EverFE	58
Tabel 11	Perbandingan Lendutan (mm) : Westergaard vs EverFE	60
Tabel 12	Perbandingan Tegangan Akibat Beban Suhu (MPa):	60
Tabel 13	Properti Beton Berdasarkan Kuat Tekan	61
Tabel 14	Tegangan Friksi pada JPCP dan PPCP	62
Tabel 15	Tegangan Prestress Effective dan Jacking Stress yang dibutuhkan (MPa)	63
Tabel 16	Perhitungan Nilai ESAL N18 Jalur Pantura	63
Tabel 17	Persamaan Fatigue Berdasarkan AASHTO dan Shi et. al.	64
Tabel 18	Aging Coefficient $\chi(t,t_0)$ menurut Bazant	67
Tabel 19	Tegangan Tarik Pada Permukaan Slab *)	72
Tabel 20	Batas Tegangan pada Dasar Slab	72
Tabel 21	Contoh Perhitungan Perubahan Panjang Tahunan Slab Beton (Sub-Tropis)	80
Tabel 22	Contoh Perhitungan Perubahan Panjang Tahunan	81



1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton semen relatif kuat dalam menerima tegangan tekan tapi lemah dalam tegangan tarik, kuat tarik beton semen antara 8 % dan 14 % terhadap kuat tekan. Kemampuan tegangan tarik beton semen yang rendah menyebabkan retak awal akibat lentur. Perkerasan beton prategang dapat dipandang sebagai suatu jenis perkerasan beton bertulang yang dapat menghilangkan atau mengurangi tegangan tarik yang terjadi pada beton. Prategang mengaplikasikan gaya tekan secara konsentris atau eksentrik, sepanjang sumbu longitudinal suatu struktur seperti perkerasan beton. Tekanan ini menginduksi tegangan tekan (*precompressive stress*) dalam perkerasan, menghilangkan atau mengurangi tegangan tarik yang disebabkan beban lalu lintas. Struktur prategang dapat dirancang dengan pratarik (*pretensioned*) atau pascatarik (*posttensioned*) atau keduanya. Perbedaan utama antara metode pratarik dan pascatarik adalah bahwa untuk pratarik, tendon ditegangkan sebelum pengecoran beton sedangkan pascatarik, tendon ditegangkan setelah beton mengeras (*set*). Kebanyakan perkerasan beton menggunakan metoda pascatarik karena waktu yang relatif lebih pendek sehingga perkerasan jalan bisa dibuka untuk digunakan sedini mungkin. (Anal Sheth, Ms; 2012).

Perkerasan jalan beton di Indonesia sudah mulai diterapkan sejak tahun 1980-an dan perlu pengembangan teknologi perancangan yang lebih efisien. Tata cara perancangan yang sudah ada adalah untuk perkerasan jalan beton tanpa tulangan sesuai dengan pedoman dalam Pd T-14-2003. Pedoman perancangan perkerasan beton semen bersambung dengan tulangan (JRCP, 2012) masih dalam proses penyusunan. Jarak sambungan. Kedua pedoman tersebut akan menghasilkan jumlah sambungan yang relatif banyak (jarak sambungan antara 4 m dan 5 m) sehingga memerlukan pemeliharaan dengan frekwensi yang relatif tinggi. Perkerasan beton semen prategang (*pre-stressed concrete pavement, PSCP*) bisa lebih panjang seperti CRCP, maksimum 180 m sehingga mengurangi jumlah sambungan, mengurangi volume pemeliharaan sambungan. Teknologi ini perlu dikembangkan terus untuk mengantisipasi tantangan permintaan masa depan di Indonesia.

Naskah ini bertujuan menyediakan bahan untuk merancang perkerasan beton semen prategang, sebagai suatu alternatif dalam merancang perkerasan beton semen untuk jalan.

1.2 Kenapa Menggunakan Perkerasan Beton Prategang

Telah diakui bahwa sumber kelemahan struktur perkerasan beton semen konvensional pada jenis perkerasan beton bersambung (*Jointed Plain Concrete Pavement, JPCP*) terletak pada sambungan melintang (*transverse joints*) dan

perkuatannya, baik menggunakan dowel atau tanpa dowel. Bentuk kerusakan antara lain terjadinya retak, *faulting*, *pumping*, dan *spalling* pada sambungan serta licin pada permukaan beton sehingga mempengaruhi kenyamanan berkendara. Sebagian besar pekerjaan pemeliharaan diperlukan untuk memperbaiki sambungan. Pemeliharaan perkerasan dengan frekwensi yang relatif tinggi pada sambungan antar panel beton adalah relatif mahal dan acapkali mengganggu arus lalu lintas. Salah satu pendekatan untuk mengurangi masalah sambungan antara lain adalah penggunaan perkerasan beton tanpa sambungan melintang yaitu dengan perkerasan beton bertulang menerus (*Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP*). Pendekatan lainnya adalah menggunakan beton prategang (*Pre-stressed Concrete Pavement, PSCP*) dengan jarak sambungan yang relatif lebih panjang lagi dari pada CRCP (AASHTO, 1993).

Beberapa instansi di negara maju melaporkan bahwa pada CRCP, jarak sambungan atau dimensi slab lebih panjang, dan masih ditemukan kerusakan retak melintang walaupun telah diberikan perkuatan tulangan baja memanjang yang rapat untuk menahan retak. Sejalan dengan waktu, bila terjadi *spalling* dan retak lebar pada permukaan beton, maka akan banyak mengurangi kenyamanan berkendara (ACI 325.7R-88). Di Indonesia, sampai saat ini, CRCP baru digunakan terbatas di jalan tol Tangerang-Merak (1,0 Km).

Kemampuan perkerasan jalan beton semen meningkat bila dirancang dalam kondisi pra-tegang (*prestressed*) (*American Association State of Highway and Transportation Officials, AASHTO, 1993*). Beton Prategang adalah beton yang tegangan tariknya pada kondisi pembebanan tertentu dihilangkan atau dikurangi sampai batas aman dengan pemberian gaya tekan permanen, dan baja prategang (*strand*) dilakukan pra-tarik (*pre-tension*) sebelum beton mengeras atau dilakukan pasca-tarik (*post-tension*) setelah beton mengeras. Dengan prategang, tebal perkerasan beton menjadi lebih tipis 35% - 40% dari pada konvensional pada kondisi lapisan dasar dan lalu lintas yang sama (*American Concrete Institute, ACI 325.7R-88*).

1.3 Rumusan Masalah

Balitbang Kementerian Pekerjaan Umum sampai saat ini memiliki Pedoman Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, dalam Pd T-14-2003 (Kementerian Pekerjaan Umum, 2003). Pedoman tersebut adalah untuk jalan beton semen bersambung tanpa tulangan (*jointed plan concrete pavement, JPCP*) dan direvisi pada tahun 2012. Jalan beton semen jenis ini hampir 98% diterapkan, baik di jalan tol, jalan provinsi, jalan kabupaten/kota dan jalan permukiman di Indonesia. Masalah utama dari beton ini adalah waktu curing yang relatif lama, jumlah sambungan banyak sehingga perlu pemeliharaan dan mengganggu kelancaran lalu lintas. Di samping itu mutu bahan dan pekerjaan kurang pengawasan yang memadai.

Jenis jalan beton semen lainnya hanya sebagian kecil dan diterapkan pada kondisi tertentu, seperti perkerasan jalan beton semen pracetak-prategang (*precast*

prestressed concrete pavement, PPCP) di jalan tol Kanci-Pejagan (27 Km), dan Ciasem (Pantura, 1,3 Km), serta jalan beton semen menerus dengan tulangan (*continuous reinforced concrete pavement*, CRCP; 1,0 Km) dan beberapa segmen jalan beton bersambung dengan tulangan (*jointed reinforced concrete pavement*, JRCP; 0,1 Km) di jalan tol Tangerang-Merak. Perancangan perkerasan beton semen prategang (*pre-stressed concrete pavement*, PSCP) sampai saat ini belum ada pedoman baku di Indonesia. Jarak sambungan PSCP bisa lebih panjang seperti CRCP, maksimum 180 m sehingga mengurangi jumlah sambungan.



2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 AASHTO

American Association State of Highway and Transportation Officials (AASHTO) versi 1986 dan 1993 menyatakan bahwa sampai saat ini belum ada prosedur rancangan perkerasan beton semen prategang yang spesifik.

Kapasitas beban pada perkerasan jalan beton semen akan meningkat bila dikondisikan prategang. Bila panel perkerasan beton semen diberikan prategang maka tebal slab menjadi lebih tipis sehingga penggunaan bahan lebih efisien. Dapat diproduksi lebih panjang sehingga mengurangi jumlah sambungan dan mengurangi pemeliharaan. Dengan beton prategang akan mengubah perilaku struktur perkerasan beton semen, memperbaiki kemampuan menahan deformasi dan momen sebagai salah satu penyebab retak.

Pada pekerjaan perkerasan beton semen prategang atau *Pre-Stress Concrete Pavement* (PSCP), orientasi penerapan prategang dapat dilakukan dengan salah satu cara berikut:

- a) Sejajar sumbu memanjang. Pada arah melintang dapat diberikan perkuatan atau tanpa perkuatan.
- b) Pada sumbu memanjang dan arah melintang.
- c) Secara diagonal dengan sudut tertentu terhadap sumbu memanjang. Besar prategang yang diperlukan untuk yang sejajar dan tegak lurus sumbu memanjang dapat diperoleh dengan mengatur sudut ketika prategang diberikan.

Beberapa faktor yang secara langsung berpengaruh terhadap kinerja perkerasan beton semen prategang dan harus mendapat pertimbangan, meliputi dukungan fondasi bawah, panjang slab, besarnya prategang, jarak tendon, dan kelelahan beton (*concrete fatigue*).

Pondasi bawah perlu memiliki nilai modulus reaksi tanah dasar minimum 200 psi, baik fondasi semen-tanah, beton aspal atau agregat yang dipadatkan. Tebal antara 6 inci dan 12 inci, sedikit yang menggunakan 4 inci dan banyak yang menggunakan 18 inci.

Panjang slab mengacu pada jarak antara sambungan melintang dan bukan pada jarak sambungan pelaksanaan. Dua faktor utama harus dipertimbangkan untuk memilih panjang optimum adalah: 1) besar prategang yang diperlukan untuk mengatasi friksi antara tanah dasar dan slab yang menyediakan tegangan tekan minimum yang diperlukan di tengah slab. Biaya prategang pada gilirannya proporsional terhadap besar prategang yang diperlukan. 2) jumlah dan biaya sambungan melintang berbanding terbalik proporsinya terhadap panjang slab. Karena sambungan melintang merupakan item pemeliharaan yang besar, total biaya sambungan melintang tidak harus didasarkan hanya pada biaya awal, tetapi harus

termasuk pula perkiraan biaya selama masa pelayanan. Beberapa pekerjaan membangun perkerasan beton prategang dengan panjang 120 m (400 ft.) untuk memenuhi alasan keseimbangan kedua faktor tersebut. Panjang slab dibuat juga sepanjang 230 m (760 ft.) di Amerika Serikat, dan 300 m (1000 ft.) di Eropa.

Besar prategang memanjang antara 7 kg/cm^2 dan $21,1 \text{ kg/cm}^2$ (100 psi dan 300 psi), dan melintang antara 0 dan 14 kg/cm^2 (0 dan 200 psi) (AASHTO. 1993),

Jarak tendon tergantung pada ukuran tendon, besar prategang, tegangan beton pada angkur tendon, dan tegangan angkur tendon. Jarak tendon dapat dipasang maksimum 8 kali tebal slab, secara tipikal jarak tendon memanjang atau melintang adalah 2 atau 4 kali tebal slab, atau 3 dan 6 kali tebal slab. Tegangan ijin dalam tendon sebesar 0,8 tegangan *yield*, dan diameter *strand* umumnya digunakan berukuran 1,5 cm (0,6 inci).

Keruntuhan PSCP karena kelelahan (*fatigue*) memerlukan sedikit tambahan suatu repetisi beban ke depan untuk mencapai suatu tanda awal kerusakan sampai runtuh.

Aplikasi rancangan strukur PSCP yang ada sampai saat ini didasarkan atas pengalaman dan pertimbangan teknis (*experience and engineering judgement*). Perancang harus mengenal prinsip dasar bahwa makin besar prategang yang diberikan akan makin tipis slab yang diperlukan. Namun demikian, prategang penuh tidak dapat diterapkan karena perlu ketebalan yang memadai untuk mencegah masalah defleksi yang berlebihan. Langkah dasar perancangan PSCP adalah sebagai berikut:

- a) Tebal slab ditentukan dengan mempertimbangkan ketentuan tebal minimum selimut beton untuk menutup tendon, dan besar prategang yang diberikan. Tebal slab PSCP sekitar (40 – 50) % terhadap tebal slab konvensional. Pada pekerjaan PSCP di beberapa negara yang lalu pada umumnya diambil tebal antara 10 cm dan 15 cm (antara 4 inci dan 6 inci).
- b) Dengan panjang slab yang dipilih dan friksi fondasi bawah, hitung kehilangan prategang akibat kekangan tanah dasar (*subgrade restraint*). Perbedaan gerakan slab terjadi akibat pemendekan elastis slab pada saat penegangan, perubahan temperatur/kelembaban, dan rangkai. Gerakan ini ditahan atau dikekang oleh friksi antara slab dan tanah dasar. Tambahan kekangan pada rancangan prategang selama perkerasan bertambah panjang dan sebaliknya ketika perkerasan memendek. Nilai maksimum tegangan tanah dasar untuk beton dengan berat isi 2310 kg/cm^3 (144 pcf), adalah: $f_{SR} = \mu L / 2$. f_{SR} adalah tegangan kekangan tanah dasar (psi), μ adalah koefisien friksi tanah dasar (antara 0,4 dan 1,0), dan L adalah panjang slab (*feet*).
- c) Faktor yang menyumbang kehilangan prategang adalah (1) pemendekan elastis beton, (2) rangkai beton, (3) susut beton, (4) relaksasi tegangan tendon, (5) Selip pada angkur tendon prategang, (6) friksi antara tendon dan selongsong tendon, dan (7) kontraksi hidrotermal perkerasan. Kehilangan

prategang sekitar (15 – 20) % untuk pratarik atau pascatarik. Kehilangan prategang ini harus ditambahkan pada saat melakukan prategang pratarik atau pascatarik.

- d) Tambahkan besarnya prategang tahap 1 dengan kehilangan prategang yang dihitung pada tahap 2 dan tahap 3, yang harus diberikan pada ujung slab.
- e) Jarak tendon dapat digunakan rumus berikut:

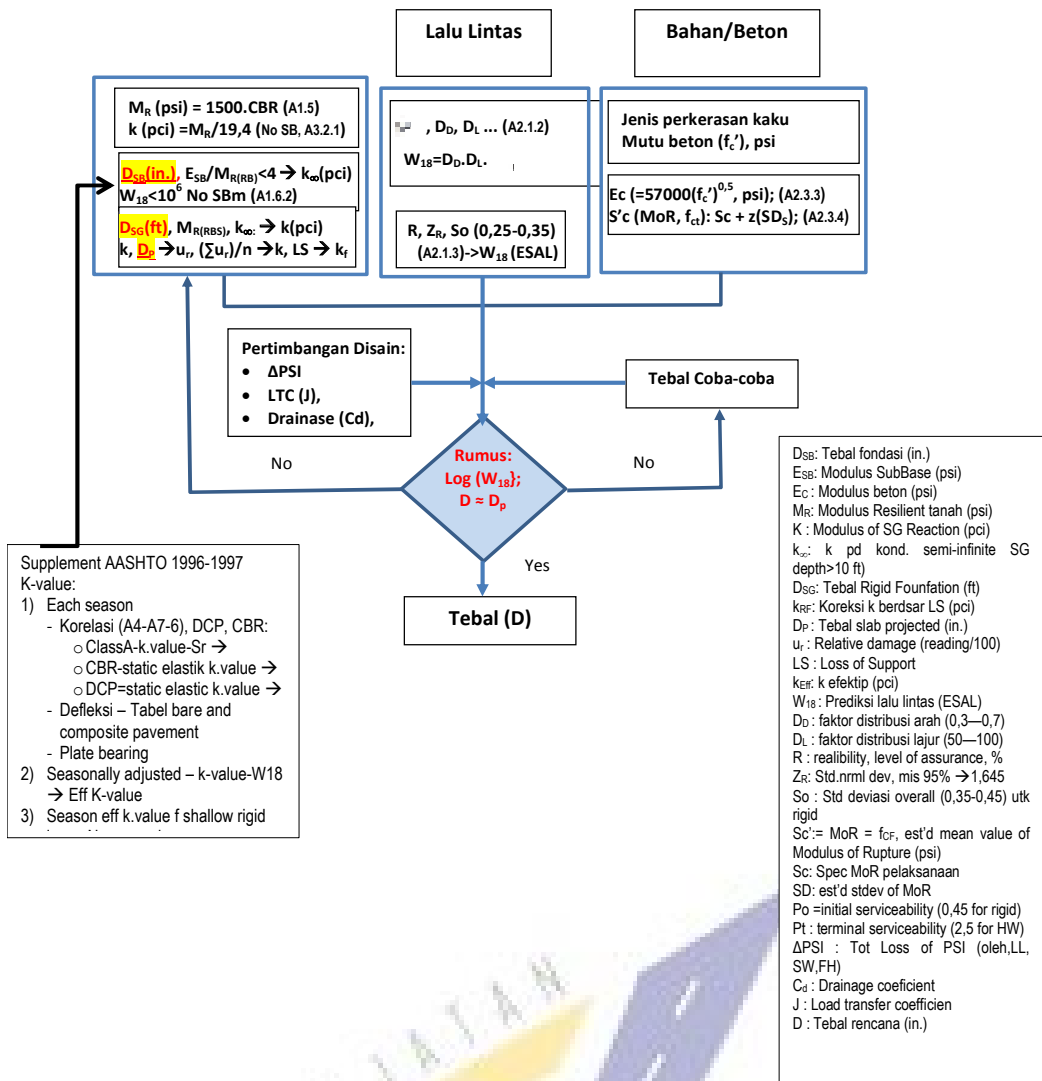
$$Y_t = \frac{f_t \times A_f}{\sigma_p \times D}$$

KETERANGAN:

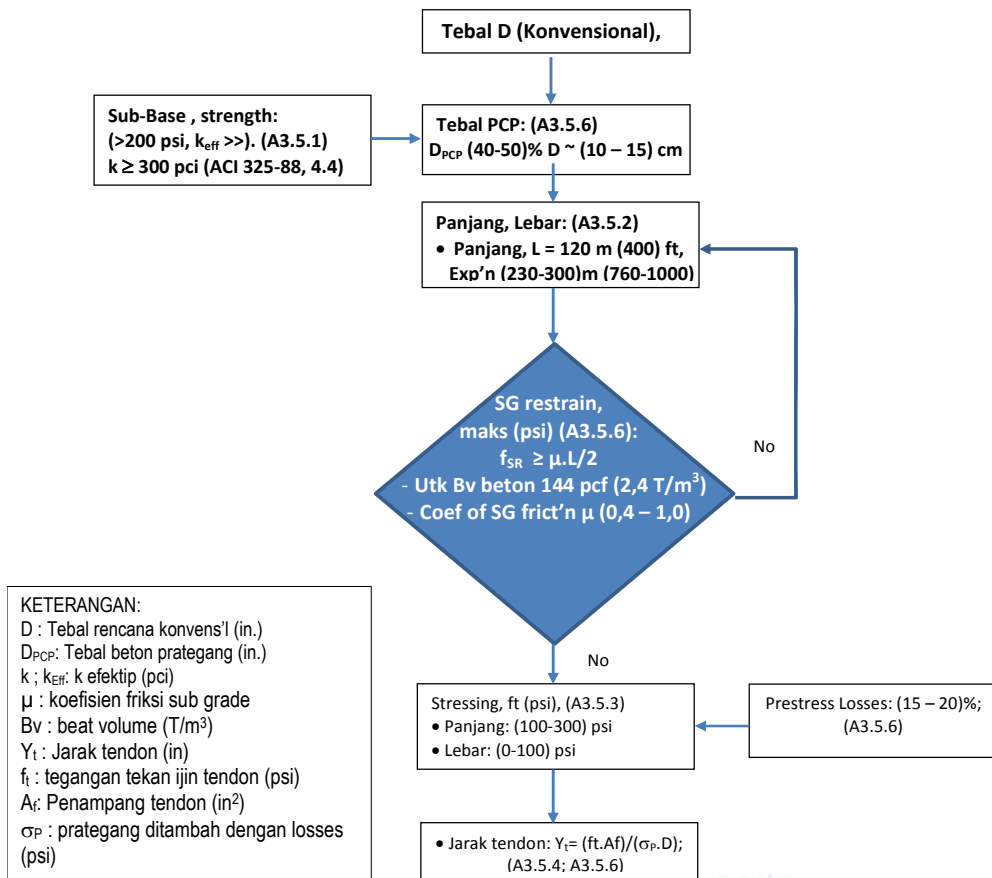
- f_t adalah tegangan ijin pada tendon (psi);
- A_f adalah penampang tendon (in²);
- D adalah tebal perkerasan (inci);
- σ_p adalah besar prategang yang diperlukan termasuk tambahan kehilangan prategang

Dalam Gambar 1- a diperlihatkan bagan alir perancangan tebal perkerasan beton konvensional dengan memasukkan tambahan (*supplement*) ketentuan untuk menentukan k-value berdasarkan musim, klasifikasi AASHTO tanah dasar, dan data defleksi. Dalam Gambar 1- b ditunjukkan proses perancangan perkerasan beton prategang, sesuai dengan ketentuan dalam AASHTO 1993 (A3.5).





Gambar 1- a **Bagan alir perancangan tebal perkerasan beton konvensional (AASHTO 1993)**



Gambar 1- b **Bagan alir perancangan tebal perkerasan beton prategang (A3.5; AASHTO 1993)**

2.2 Sejarah Perkembangan Aplikasi Beton Prategang di Dunia

Dalam Tabel 1 disajikan sejarah perkembangan perkerasan jalan beton prategang.

Tabel 1 Sejarah Perkerasan Jalan Beton Semen Prategang

Tahun	Uraian
s/d 1960	1945-1960: Di Amerika, dibangun di 60 ruas jalan. Salah satu jalan raya sepanjang 21 km, tebal 15 cm, dan enam lapangan terbang sepanjang total 32 km tebal 17 cm (ACI 325-1959). Panjang slab antara 50 m dan 210 m. Rata-rata 120 m. Besar penegangan antara 190 psi dan 700 psi (1,3 MPa dan 4,8 MPa). Penegangan melintang sampai 400 psi (2,8 MPa).

Tahun	Uraian
Setelah 1960	Di Eropa. Lapangan terbang militer, luas 3,3 juta m ² , penegangan arah melintang dan memanjang dengan baja kuat tinggi, digrouting dalam selongsong baja.
	Lapangan terbang sipil, Tebal 18 cm: 1965-1978: <i>Schiphol (Amsterdam Airport)</i> , luas 680.000 m ² 1960-1968: <i>Cologne-Bonn</i> , 530.000 m ² . 1972-1978: <i>Rio de Janeiro</i> , 560.000 m ² . Lapangan terbang militer di runway dan taxiway, 800.000 m ² tebal 0,14 m, 500.000 m ² tebal 0,16 m. Overlay 170.000 m ² tebal 0,12 m.
1960	Dikembangkan tendon 7 kawat baja kuat tinggi berlapis plastik (<i>plastic-encased grease-protected high strength seven-wires</i>) untuk slab panjang, termasuk <i>combined bearing</i> dan <i>strand chucks</i> untuk memudahkan meletakkan angkur dan <i>grip strand</i> . Pengembangan dongkrak dubel silinder untuk mempercepat proses <i>post-tensioning</i> .
1963	Pengembangan media <i>low-friction</i> dengan dua lapis tipis plastik sebagai membran (<i>Timms, 1963</i>). Produk komersial dapat membuat media dengan nilai friksi 0,20 (sesuai ASTM D 2103). Nilai friksi serendah itu tidak akan tercapai karena pelaksanaan pondasi bawah yang bervariasi. Di lapangan mungkin dicapai 0,50 atau lebih rendah lagi bila ditambah dengan parafin tipis di antara dua lapis plastik (<i>US DoT, 1983</i>).
1972	Jalan raya dekat lapangan terbang <i>Dulles Int'l Airport</i> , perkerasan beton dengan besar prategang 200 psi (1,4 MPa), panjang slab (120 – 230) m ((400 – 600) ft..
1973-1985	Proyek jalan skala-penuh di <i>Pennsylvania</i> tahun 1973 (<i>Brunner 1975</i>); di <i>Mississippi</i> tahun 1975 (<i>Albritton, 1976</i>), <i>Arizona</i> tahun 1977 (<i>Morris and Emery, 1977</i>).
1985	Overlay beton prategang di <i>Texas</i> , tahun 1985 (<i>Burns and McCulloch, 1986</i>), dan di <i>Pennsylvania</i> direncanakan overlay tahun 1988 (<i>Gramling 1986</i>).
Sumber: <i>American Concrete Institute, ACI 325-7R-88</i>	

2.3 American Concrete Institute (ACI 325.7R-88)

ACI merekomendasikan perancangan perkerasan beton prategang untuk jalan raya atau lapangan terbang, sesuai dengan ACI 325.7R-88. Komisi ACI 325 melaporkan bahwa kekuatan perkerasan beton semen yang diperkuat dengan prategang secara signifikan bertambah dalam melayani beban. Prategang

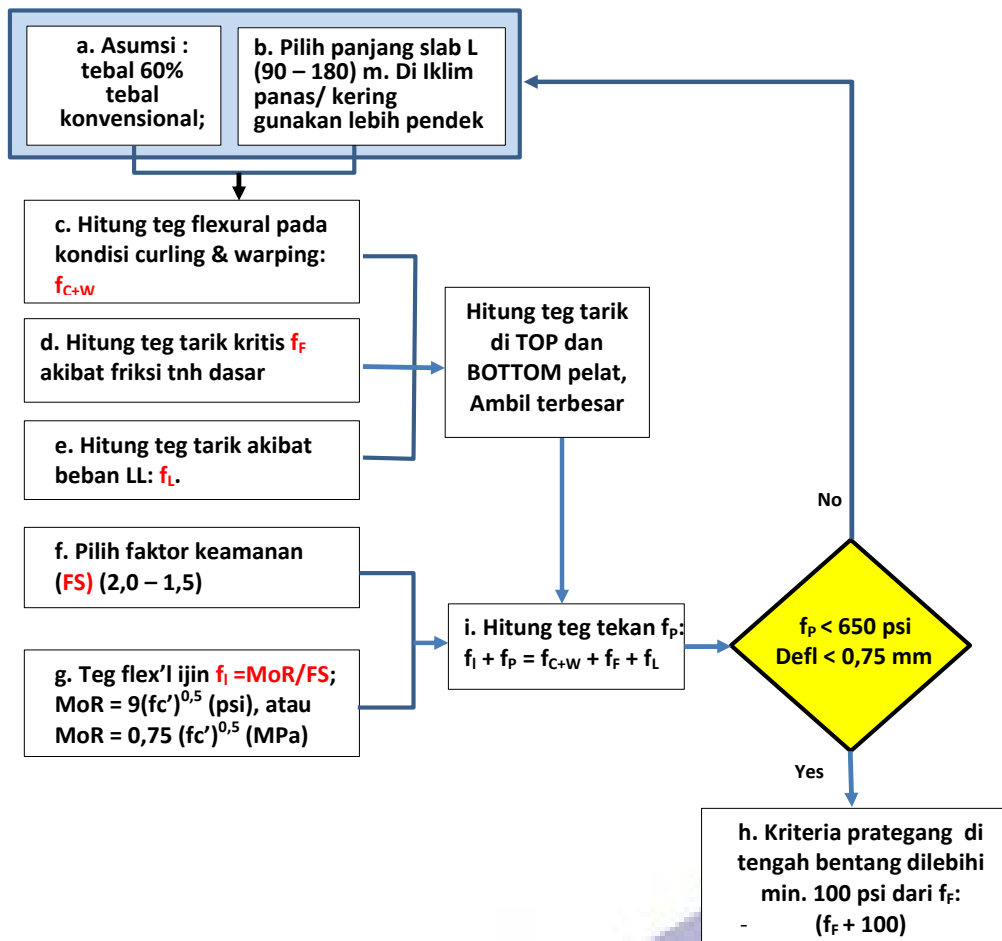
menyebabkan tambahan kuat tekan pada panel perkerasan beton. Tekanan ini membentuk perilaku struktur yang dapat meningkatkan kemampuan untuk menahan perubahan bending tanpa menyebabkan retak. Perkerasan beton prategang dapat menyediakan permukaan yang rata, bebas retak dan mengurangi jumlah sambungan. Dengan memanfaatkan penyebaran tegangan akibat kelembaban antara bagian atas dan bawah tebal slab, besar perkuatan prategang dapat dikurangi.

ACI Committee 325 telah mempublikasikan sejumlah laporan pengalaman pelaksanaan perkerasan beton prategang. Pada Februari 1959 mengkaji bahwa kemampuan beton prategang untuk melayani beban kendaraan meningkat dibandingkan dengan tanpa prategang. Sejak publikasi ACI Committee 325 tersebut, beberapa jalan beton prategang dibangun untuk mendukung validitas konsepnya. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa penyebaran prategang dapat digunakan pada slab yang datar untuk mampu menahan beban kendaraan. Teknologi perkerasan dengan metoda prategang merupakan metoda yang inovatif dan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan pelaksanaan pembangunan jalan yang kuat dan nyaman dengan mutu terkendali. ACI Committee 325 (1988) mempublikasikan bahwa besarnya gaya prategang dan jumlah tendon dapat dikurangi bila dipenuhi hal-hal sebagai berikut:

- a) Media hambatan (*friction*) yang rendah antara perkerasan dan pondasi di bawahnya akan mengurangi tegangan tarik yang timbul selama kontraksi slab pada saat temperatur turun. Pengurangan hambatan akan mengurangi besar gaya prategang yang diperlukan.
- b) Penyebaran tegangan susut akibat perbedaan kelembaban antara bagian atas dan bawah slab dapat mengurangi tegangan akibat beban kendaraan. Tegangan sisa akibat tekanan di bagian bawah slab diimbangi dengan tegangan tarik yang diakibatkan beban kendaraan sehingga dapat mengurangi besarnya gaya prategang.

Untuk mereancang tebal perkerasan beton prategang dapat diikuti bagan alir dalam Gambar 2- a.





Gambar 2- a Bagan alir perancangan tebal perkerasan beton prategang (AASHTO 1993)

2.4 FHWA

2.4.1 Studi kelayakan (David K. Merrit Cs., FHWA, 2000)

David K. Merrit, B.Frank McCullough, Ned H Burns, and Anton K Schindler. (Federal Highway Administration, 2000) U.S. Department of Transportation (DOT), telah melakukan studi kelayakan penggunaan perkerasan beton prategang dalam bentuk komponen pracetak yang terbukti lebih efisien. Hasil studi kelayakan menyatakan, antara lain:

- a) Dari tinjauan literatur, diperoleh banyak aspek yang diusulkan, seperti sambungan panel terkunci, sambungan ekspansi, dan pascatarik

(*posttensioning*), telah berhasil digunakan dan juga membuktikan layak untuk perkerasan pracetak.

- b) Dari pertemuan para ahli, diusulkan konsep teknik fabrikasi panel. Konsep tersebut memastikan bahwa pelaksanaan dapat dipercepat dengan mengadaptasi model pracetak.
- c) Hasil evaluasi menunjukkan bahwa panel beton pracetak-prategang menjadi jenis perkerasan yang paling praktis..
- d) Kelayakan desain mengungkapkan bahwa perkerasan pracetak-prategang dapat dirancang memiliki umur rencana yang setara dengan perkerasan konvensional, dengan penghematan yang signifikan dalam tebal.
- e) Kelayakan pelaksanaan disukai karena cepat, dapat dilapis dengan lapisan aspal perata, serta pekerjaan yang spesifik seperti geometri dapat dilakukan dalam disain.
- f) Kelayakan ekonomi dan keawetan menunjukkan keuntungan dari perkerasan pracetak, biaya pengguna berkurang, dan daya tahan meningkat.

Keuntungan utama lain dari konstruksi pracetak meliputi:

- a) Panjang slab meningkat (sambungan berkurang), penghematan bahan (bahan beton dan tulangan relatif sedikit), dan daya tahan meningkat.
- b) Perkerasan beton prategang cor di tempat di McLennan County, Texas, menjadi dasar konsep perkerasan pracetak. Perkerasan tersebut memiliki jarak sambungan ekspansi sekitar (80 – 130) m (240 – 440) ft. Tebal perkerasan 15 cm (6 inci), dibandingkan dengan CRCP 35 cm (14 inci) yang dibangun di wilayah yang sama. Perkerasan beton prategang yang telah berumur selama hampir 15 tahun, menunjukkan hampir tidak ada tanda-tanda kerusakan.
- c) Perkerasan beton pracetak dapat digunakan untuk setiap aplikasi pelaksanaan yang memerlukan penyelesaian yang cepat, baik untuk aplikasi perkerasan baru, aplikasi lapis tambah tak terikat (*unbounded overlay*), dan aplikasi pembongkaran dan penggantian.

2.4.2 Percobaan perkerasan beton pracetak-prategang (Luh M.Chang Cs., FHWA, 2004)

Luh M.Chang, Yu-Tzu Chen, Sangwook Lee (2004) dari Purdue University dan Indiana DoT, dalam laporan nomor FHWA/IN/JTRP-2003/26, membuat percobaan perkerasan jalan beton prategang dalam bentuk panel pracetak yang dipasang melintang jalan dengan ukuran 36 in x 10 in x 8 in. (9 m x 2,5 m x 0,2 m), di Indiana.

Keuntungan hasil percobaan ini adalah sebagai berikut:

- a) Pelaksanaan cepat sehingga dapat segera dibuka untuk lalu lintas. Tidak diperlukan waktu tambahan untuk mencapai kekuatan seperti perkerasan beton konvensional.
- b) Kemungkinan untuk semua pelaksanaan sepanjang tahun karena panel pracetak dapat diproduksi di pabrik atau tempat lain di dekat lapangan dan kemudian diangkut ke lokasi menempatkan. Pelaksanaan perbaikan slab “tak terlihat” karena pembuatan panel dilakukan di pabrik, pada berbagai cuaca. Pelaksanaan dapat dilakukan dalam satu malam atau di akhir pekan.
- c) Biaya pengguna jalan relatif rendah karena adanya kegiatan konstruksi, seperti konsumsi bahan bakar meningkat dan waktu kerja hilang. Memperpendek masa penutupan untuk jalan akan menghemat biaya pengguna jalan. Dapat dibuka selama konstruksi dan juga dapat segera terbuka untuk lalu lintas setelah konstruksi.

Kerugian dari PPCP:

- a) PPCP sebagian kecil telah digunakan dalam pembangunan jalan di Amerika Serikat. Proyek percontohan Georgetown adalah percobaan pertama. Kurangnya prosedur desain yang digunakan telah menjadi kendala utama untuk aplikasi pertama.
- b) Kelemahan ditemukan oleh CTR, UT-Austin adalah sebagai berikut:

- 1) Kenyamanan berkendara

Untuk evaluasi kualitas kenyamanan berkendara, digunakan sebuah Profilometer di atas perkerasan jalan beton. Hasilnya adalah nilai *International Roughness Index* (IRI) sebesar 2,61 m/km (165,5 inci/mile) untuk lebar parsial panel, dan sebesar 2,32 m/km (147,1 inci/mile) untuk lebar penuh panel. Nilai yang lebih tinggi biasanya terjadi pada perkerasan beton konvensional.

Rekomendasi dari CTR, UT menunjukkan bahwa untuk aplikasi masa depan, standar kualitas kenyamanan berkendara harus ditetapkan untuk perkerasan beton pracetak. Penerapan insentif dan hukuman akan membantu untuk memastikan kualitas produk yang tinggi bagi kontraktor.

- 2) Biaya

Biaya total pelaksanaan PPCP di Georgetown, termasuk fabrikasi panel, persiapan dasar, dan pelaksanaan adalah sekitar \$ 203/m² (\$ 19/ft²). Biaya secara signifikan lebih tinggi daripada CRCP tebal 355 mm \$ (36 – 48) /m² atau \$ (3.34 -- 4.46) /ft² atau sekitar 5 kali lipat harga CRCP, karena alasan berikut:

- Pertama, perkerasan beton pracetak di Georgetown adalah sebuah proyek yang relatif kecil (0,7 km) sehingga pekerjaan ini tidak

berskala ekonomi. Bila proyek pekerjaannya jauh lebih besar akan memiliki unit biaya yang jauh lebih rendah.

- Kedua, PPCP di Georgetown adalah proyek tentatif. Kontraktor maupun pemasok pracetak mengenal teknik perkerasan beton pracetak memerlukan peralatan tambahan untuk mencetak, melakukan stressing, grouting dan lainnya, karena itu mungkin mengajukan tawaran yang lebih tinggi.

2.4.3 Demonstrasi perkerasan pracetak-prategang (David K. Merritt Cs., FHWA-2008)

FHWA-HIF-08-009, David K. Merritt, Richard B. Rogers, Robert Otto Rasmussen (2008). Dalam laporan tentang *Construction of a Precast Prestressed Concrete Pavement Demonstration Project on Interstate 57 near Sikeston, Missouri*. Demonstrasi pelaksanaan PPCP di Interstate 57 Sikeston, Missouri menunjukkan kelayakan PPCP untuk rekonstruksi perkerasan. Lebih penting lagi memungkinkan bagi kontraktor pracetak dan pemasok menjadi terbiasa dengan teknologi PPCP, dengan harapan bahwa akan digunakan di daerah yang paling membutuhkan, di kota yang lalu lintasnya padat, serta di jalur yang ditutup untuk pekerjaan rekonstruksi dan rehabilitasi.

Meskipun panjang proyek relatif pendek sekitar 310 m (1.010 ft.), peragaan ini memberikan kesempatan mengevaluasi teknologi yang memadai untuk memantau kinerja jangka panjang. Konsep serupa untuk pekerjaan beton prategang yang dilaksanakan di Texas dan California, menyajikan beberapa tantangan dan solusi yang unik, termasuk:

- a) Pembuatan penampang mahkota (crown) panel pracetak,
- b) Pelaksanaan di atas pondasi aspal permeabel yang distabilisasi ,
- c) Penggunaan *end-stressing* dari sambungan panel (vs pusat *stressing*),
- d) Penggunaan sambungan ekspansi jenis *header*,
- e) Penggunaan lidah-alur non-kontinyu antara panel,
- f) Ekstensifikasi peralatan selama fabrikasi, pelaksanaan, *post-tensioning*, 18 bulan pertama setelah pelaksanaan.

Seperti proyek percontohan sebelumnya, tujuan utama dari proyek ini adalah sebagai peragaan untuk membiasakan lembaga terkait dengan jalan raya setempat dan kontraktor lokal tentang teknologi PPCP, memungkinkan evaluasi lebih lanjut dan penyempurnaan teknologi PPCP. Jalan beton prategang ini dibangun di bagian jalan raya antar Negara bagian (*Interstate*) dan ditutup untuk lalu lintas selama pelaksanaan, diizinkan MoDOT untuk proses mengevaluasi kelayakan untuk pembangunan perkotaan di masa depan.

Penting untuk mengenali bahwa tidak ada keahlian khusus yang diperlukan untuk proyek ini, dan untuk proyek-proyek masa depan. Meskipun bentuk panel pracetak ini unik, tidak ada pelatihan khusus bagi sumber daya manusia yang diperlukan oleh pabrikator pracetak. Pemasangan panel di lokasi telah diselesaikan dengan peralatan standar dan tidak membutuhkan tenaga kerja yang terlatih khusus.

Penting ditekankan bahwa meskipun kesukaran teramati setelah pembangunan, pengaruhnya terhadap kinerja perkerasan adalah sedikit atau tidak berpengaruh. Pengujian lendutan yang dilakukan MoDOT menegaskan bahwa perkerasan secara struktural kuat walaupun dalam kondisi tertekan. Pemantauan kinerja perkerasan dari waktu ke waktu akan memberikan indikasi yang benar dari suatu kinerja jangka panjang

2.4.4 *Center for Transportation Research, University of Texas, Austin (By William N. Nickas, P.E; FHWA, 2002)*

Post-tensioning telah diterapkan untuk perkerasan beton semen cor di tempat (cast-in-place, CIP) di sejumlah negara dan terbukti sukses selama beberapa dekade. Sebuah proyek yang telah selesai di Texas hampir 25 tahun yang lalu terus dalam pelayanan menunjukkan kinerja yang sangat baik. Pada tahun 2002 proyek percontohan dengan *Texas Department of Transportation (TxDOT)* dan *Federal Highway Administration (FHWA)* di Georgetown, Texas, diterapkan teknologi perkerasan beton semen berupa panel pracetak-prategang, sebagai proyek percontohan. Pada proyek ini, FHWA, bekerja sama dengan *Center for Transportation Research di University of Texas*, di Austin,

Proyek perkerasan beton pracetak pertama dipasang pada tahun 2002 di Georgetown, Texas. Panel dengan panjang 13 meter (36 kaki), disiapkan untuk dua lajur dan dua lajur bahu (bahu luar dan bahu dalam) dalam satu panel.

2.5 *Evaluasi kinerja perkerasan beton pracetak-prategang (Grant C. Luckenbill, E.I. July. 2009)*

Grant C Luckenbill, mengevaluasi inovasi kinerja perkerasan beton pracetak-prategang. Kinerja masa depan dari sistem perkerasan pracetak pratekan diharapkan menjadi tanpa masalah yang berarti. Teknologi pracetak-prategang telah diadaptasi untuk digunakan sebagai sistem perkerasan, dan telah teruji dalam beberapa dekade, diterapkan pada pekerjaan jembatan. Namun bahwa di antara banyak perkerasan yang ada, muncul masalah. Banyak tantangan yang signifikan telah diketahui sebelumnya, dan diperkirakan muncul dalam rancangan sistem perkerasan prategang. Hal-hal yang diperkirakan akan memenuhi atau melampaui harapan desain adalah sebagai berikut:

- a) Kemampuan sistem perkerasan mungkin terbentuknya rongga karena erosi atau *setlemen*.

- b) Karena dibangun pada tegangan tekan di perkerasan beton semen, retak diharapkan tetap tertutup. Lebar retak akan lebih kecil dibandingkan dengan perkerasan bukan prategang, sehingga cenderung mengurangi kerusakan akibat intrusi air dan akibat beku-cair (*freeze-thaw*).
- c) Peningkatan daya tahan material karena peningkatan kontrol mutu dalam proses pracetak.

Pelayanan kinerja hasil evaluasi adalah sebagai berikut:

- a) Telah diperlihatkan bahwa dengan pengambilan data yang tepat, diperlukan pemantauan instrumentasi yang tertanam untuk mengukur strain yang terisolasi dari beban lalu lintas, operasi pasca-tarik serta tren beban *termal* harian, mingguan, dan musiman.
- b) *Strain* perkerasan akibat perubahan temperatur secara signifikan lebih besar daripada semua jenis pembebanan (efek viskous seperti rangkai, susut, dan relaksasi, atau beban kendaraan). Data rentang regangan (*strain*) memanjang berkisar (50 – 100) μ strain diamati selama cuaca dingin setiap hari. Pada musim panas rentang *strain* sekitar (125 – 200) μ strain.
- c) *Strain* lebih besar pada arah melintang daripada arah longitudinal, sementara disimpulkan bahwa kekangan (*restraint*) melintang menunjukkan nilai yang lebih rendah.
- d) Gradien termal diamati berdasarkan ketebalan perkerasan dan kondisi pencahayaan (atas dan bawah).
- e) Beban kendaraan diukur menghasilkan rentang strain sekitar (1 – 2) μ strain di perkerasan pracetak. Ini hanya terjadi sekitar (1 -- 2) % total strain dari termal harian.

2.6 Perancangan tebal perkerasan beton prategang (Ms. Anal Sheth, 2012)

Perkerasan beton semen dapat dirancang sepenuhnya dengan metode prategang, karena slab akan memiliki tegangan tekan di seluruh penampang. Perkerasan yang tidak memiliki internal prategang, akan menyebabkan retak dalam beton. (Ms. Anal Sheth, 2012. Lecturer, Faculty of Technology, CEPT University, Ahmedabad, http://www.cept.ac.in/index.php?option=com_content&view=article&id=185&Itemid=341)

Perkerasan beton prategang memiliki keuntungan sebagai berikut:

- a) Tebal perkerasan beton yang diperlukan lebih tipis dibandingkan dengan perkerasan beton lainnya (JPCP, JRCP, CRCP). Kebutuhan volume beton berkurang secara signifikan, dan lebih ekonomis menggunakan lempengan panel-panel (slabs) beton prategang.

- b) Jumlah sambungan melintang berkurang atau dapat dihilangkan. Sambungan pada perkerasan beton semen potensial terjadi masalah konvensional dalam struktur perkerasan. Hal itu mempengaruhi karakteristik drainase dan berpotensi terjadi pumping pada fondasi bawah. Pengurangan jumlah sambungan mengakibatkan turunnya biaya dan potensi masalah sambungan termasuk biaya pemasangan dan pemeliharaan.
- c) Prategang menahan tegangan tarik pada beton sehingga struktur perkerasan terbebas dari kemungkinan retak akibat beban lalu lintas. Pelayanan menjadi lebih lama, biaya pemeliharaan berkurang, sehingga perkerasan beton semen prategang menjadi lebih ekonomis dalam jangka panjang.

Perkerasan jalan beton prategang sering digunakan untuk bandara karena telah terbukti lebih ekonomis. Rancangan perkerasan jalan beton semen prategang dibagi dalam dua bagian yaitu rancangan tebal dan rancangan sambungan.

2.7 Penelitian Perkerasan Beton Pracetak-Prategang di Indonesia

Penelitian yang dilakukan oleh Pusat Litbang Jalan, Balitbang, Kementerian Pekerjaan Umum telah dimulai sejak tahun 2009 (Dachlan, A.T., 2009). Penelitian tersebut berupa ujicoba skala penuh pada perkerasan beton pracetak-prategang sepanjang 2 x 36 m, dan beton semen pracetak konvensional sepanjang 200 m. Dimensi panel pracetak-prategang 8 m x 1,8 m x 0,20 m, dan dimensi pracetak konvensional tanpa prategang 5 m x 1,8 m x 0,28 m. Analisis tebal perkerasan beton menggunakan ketentuan AASHTO 1993. Defleksi dikontrol dengan program SAP 2000. Lokasi percobaan di ruas jalan antara Buntu dan Kebumen, Km 108 (SMR). Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa beton pracetak yang diberi prategang dapat meningkatkan nilai kuat tekan sekitar 23%.

Pemanfaatan perkerasan jalan beton pracetak-prategang dan perkerasan beton (Dachlan A.T., 2011). Di bawah panel beton pracetak-prategang (M4 dan M5), beton karet (M3), dan beton pracetak konvensional (M1) ditemukan voids. Setelah dilakukan perbaikan dengan grouting maka voids dan gejala pumping secara signifikan berkurang.

2.7.1 Puslitbang Jalan dan Jembatan (2008)

2.7.1.1 Perhitungan tebal perkerasan beton semen (AASHTO 1993)

Untuk perkerasan beton semen konvensional dan untuk memperkirakan tebal slab atau panel digunakan perhitungan AASHTO (1993). Contoh analisis berdasarkan akumulasi beban lalu lintas (ESAL) untuk rencana 20 tahun ditunjukkan dalam Gambar 6a dan Gambar 6b. (Sumber: Pusat Litbang Jalan dan Jembatan tahun 2008 (DED perkerasan Beton dengan Metoda Pracetak, di Buntu-Purworejo, Jawa tengah, Laporan Akhir, A.Tatang Dachlan, Pusjatan 2008). Rumus dasar untuk perhitungan tebal perkerasan beton semen adalah sebagai berikut:

$$\text{Log}_{10} W_{18} = Z_R \cdot S_o + 7,35 \text{Log}_{10}(D+1) - 0,06 + \frac{\text{Log}_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5-1,5} \right]}{1 + \frac{1,627 \cdot 10^7}{(D+1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 p_i) \text{Log}_{10} \left[\frac{S_c' C_d (D^{0,75} - 1,132)}{21563 J \left(D^{0,75} - \frac{1842}{(E_c / k)^{0,25}} \right)} \right]$$

Gambar 1 Rumus umum penentuan tebal perkerasan beton (AASHTO 1993)

KETERANGAN:

- E_c : Modulus beton (psi)
- k : Modulus of SG Reaction (pci)
- W_{18} : Prediksi lalu lintas (ESAL)
- R : realibility, level of assurance
- Z_R : angka statistik, mis 95% \rightarrow 1,645
- S_o : Std deviasi (0,35-0,45) utk rigid
- S_c' := MoR: Modulus of Rupture (psi)
- P_o =initial serviceability (0,45 for rigid)
- P_t : terminal serviceability (2,5 for HW)
- ΔPSI : Tot Loss of PSI (oleh,LL, SW,FH)
- C_d : Drainage coeficient
- J : Load transfer coefficient
- D : Tebal rencana (in.)

Contoh perhitungan lalu lintas dan tebal slab beton ditunjukkan dalam Gambar 2 dan Gambar 3.



Perhitungan LALU LINTAS

No. Jalan : 001
 No. Bus : 001
 No. Bus : 001
 No. Bus : 001

Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Jumlah : 1000
 Jumlah : 1000
 Jumlah : 1000
 Jumlah : 1000

Gambar 2 Perhitungan Lalu Lintas

Perhitungan Tebal Slab Beton

No. Jalan : 001
 No. Bus : 001
 No. Bus : 001
 No. Bus : 001

Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Waktu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

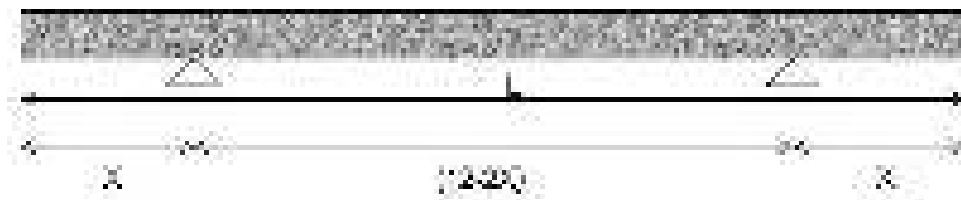
Jumlah : 1000
 Jumlah : 1000
 Jumlah : 1000
 Jumlah : 1000

Gambar 3 Perhitungan Tebal Slab Beton

Dari hasil perhitungan perkerasan beton konvensional (tanpa prategang), diperoleh tebal slab sebesar 33 cm bila dipasang dengan bahu beton tanpa dowel dan 28 cm bila dipasang bahu beton dengan dowel. Mengingat kondisi bahu jalan yang ada dan posisi badan jalan terdiri atas timbunan lama, maka ditetapkan bahu jalan terbuat dari beton dan slab dipasang dowel, sehingga disain tebal diambil 28 cm.

Untuk slab beton dengan pracetak yang diberi prategang, diambil sebesar 65% terhadap hasil perhitungan tanpa prategang, sehingga diperoleh tebal $65\% \times 28 \text{ cm} = 18,5 \text{ cm}$ dan dibulatkan menjadi 20 cm.

Untuk mengangkat dan memindahkan slab beton pracetak tersebut diperlukan posisi titik untuk mengangkat dan menurunkan slab dengan aman. Berikut ini dihitung jarak posisi titik angkat dari tepi slab (x), berdasarkan dimensi dan parameter beton.



$$L = 12 \text{ m}$$

$$x = 2,5 \text{ m}$$

$$b = 1,8 \text{ m} = 1800 \text{ mm}$$

$$t = 0,20 \text{ m} = 200 \text{ mm}$$

$$\text{BJ beton} = 24$$

$$\begin{aligned} \text{Berat sendiri pelat beton, } q_{\text{BS}} &= t \cdot b \cdot \text{BJ} \\ &= 0,2 \cdot 1,8 \cdot 24 = 8,64 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Momen tepi, } M_{\text{tp}} \text{ maksimum} = \frac{1}{2} \cdot q \cdot x^2$$

$$\begin{aligned} \text{Momen lapangan maksimum} &= \frac{1}{8} \cdot q \{ (12 - 2x)^2 - 4 \cdot x^2 \} \\ &= \frac{1}{8} \cdot q \{ (144 - 48x + 4x^2 - 4x^2) \} \\ &= (18 - 6x) q \end{aligned}$$

$$\text{Jika } M_{\text{tp}} = M_{\text{lap}} :$$

$$\frac{1}{2} \cdot q \cdot x^2 = (18 - 6x) q$$

$$\frac{1}{2} \cdot x^2 = 18 - 6x$$

$$x^2 + 12x - 36 = 0 \rightarrow x = 2,485 \sim 2,50 \text{ m}$$

$$\text{Jadi } M_{\text{bs}} = \frac{1}{2} \cdot 8,64 \cdot 2,5^2 = 27 \text{ kN.m}$$

Jika tegangan tekan akibat gaya prategang = 1,5 MPa (setara dengan kemampuan menahan momen = $1,5 (1/6 \cdot 1800 \cdot 200^2) = 18.000.000 \text{ N.mm} = 18 \text{ kN.m}$

Sisa momen lebih = $27 - 18 = 9 \text{ kN.m}$

$\mu = 1,2 \times 9 = 10,8 \text{ kN.m}$

Bila menggunakan wire mesh:

Jika tebal selimut beton = 40 mm,

diameter tulangan wire mesh = 5 mm ---- $d = 200 - 40 - 2,5 = 157,5 \text{ mm}$.

Mutu beton saat lifting, $f_c' = 25 \text{ MPa}$,

mutu baja, $f_y = 400 \text{ MPa}$

$\mu/b.d^2 = 10,8/1,8.0,1575^2 = 241,87$

---- $\rho = 0,00075$

$A_s = 0,00075 \times 1800.157,5 = 212,6 \text{ mm}^2$

Jarak tulangan = $\frac{1}{4}.3,14.52.1800/212,6$
 $= 166,16 \text{ --- } \phi 5 - 150$

Bila tidak menggunakan wire mesh :

- Tegangan tarik akibat momen kerja = $27.000.000/(1/6.1800.200^2) = 2,25 \text{ MPa}$
- Gaya prategang yang dibutuhkan = $2,25 \times 1800 \times 200 = 810.000 \text{ N} \sim 81.000 \text{ kg}$
- Jika 4 strands, 1 strand = 20,25 t
- Jika 6 strands, 1 strand = 13,5 t
- Jika 8 strands, 1 strand = 10,125 t

2.7.1.2 Kontrol defleksi dengan SAP-2000 V.9.03

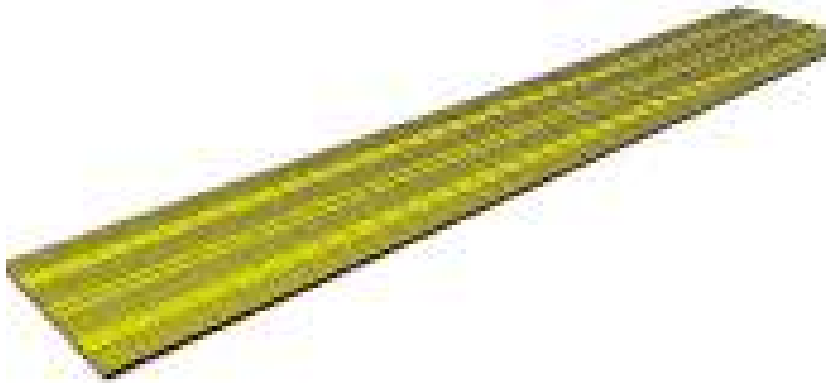
2.7.1.2.1 Pemodelan

Untuk mensimulasikan sistem perkerasan beton pracetak sebagai perkerasan kaku yang dianggap mendekati kondisi yang sebenarnya, maka struktur dimodelkan secara 3 dimensi dengan program SAP 2000 V.9.03.

Untuk memperoleh kekakuan yang mendekati dengan kondisi realistis, perkerasan kaku tersebut dimodelkan sebagai pelat beton (*slab*) atau *shell element*. Karena perkerasan kaku ini berada di atas tanah atau pondasi granular, maka sistem perletakan dari model struktur perkerasan kaku yang dibuat menggunakan

perletakan pegas (konstanta pegas), yang diletakkan pada joint yang tersebar setiap meter pada model struktur. Sedangkan untuk merepresentasikan kontribusi tanah dasar atau kekangan lateral dari tanah dasar dan material lain yang berada di bawah perkerasan kaku, maka pada landasan perkerasan kaku diterapkan konstanta pegas sebesar $K = 4500 \text{ kN/m}$ untuk arah vertikal (k_z), dan masing-masing sebesar 450 Kn/m atau 10% untuk arah horizontal-Longitudinal (k_x) dan 10% untuk horizontal-Transversal (k_y). Angka 10% adalah maksimum dan didasarkan atas pengalaman lapangan yang realistis.

Isometri dari model perkerasan kaku tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. dan posisi spring ditunjukkan dalam Gambar 5.



Gambar 4 Model elemen perkerasan kaku

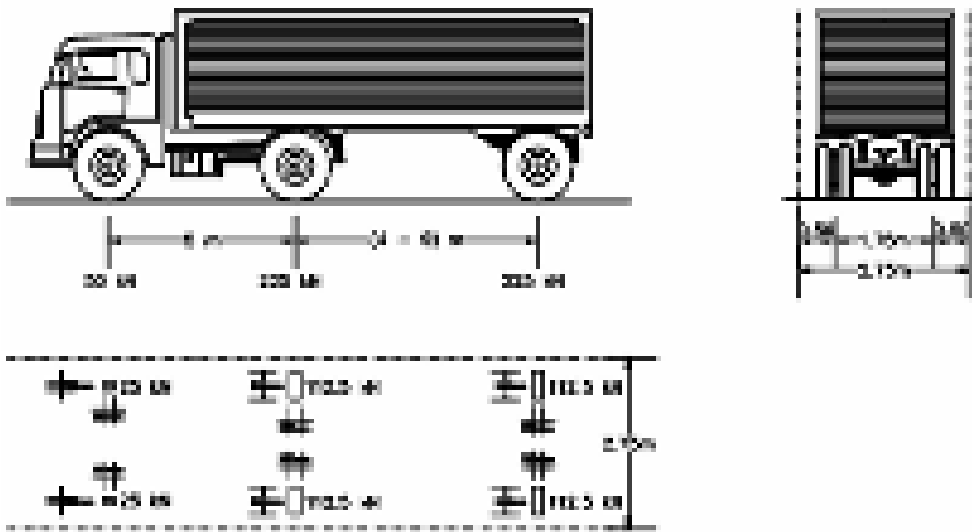


Gambar 5 Konstanta spring pada elemen perkerasan kaku

2.7.1.2.2 Pembebanan

Beban truk yang digunakan adalah beban truk T50, panjang 14 m dan beban total 50 Ton seperti tampak pada Gambar 6 berikut konfigurasi pembebanannya. Pembebanan truk "T" terdiri atas kendaraan truk semi-trailer yang mempunyai susunan dan berat as seperti terlihat dalam Gambar 6. Berat dari setiap as disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 as tersebut bisa diubah-ubah antara 4,0 m dan 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang slab. Beban truk T50 diaplikasikan sebagai beban terpusat pada perkerasan kaku.

Dengan mangacu pembebanan pada jembatan, sesuai dengan pedoman BMS-92, beban rem, yaitu beban horizontal akibat beban lalu lintas pada arah longitudinal diambil sebesar 250 kN per lajur. Beban rem diasumsikan dapat dipikul oleh perkerasan kaku. Beban ini diaplikasikan pada *joint load*.



Gambar 6 Beban Truk Trailer Panjang 14 m dan Berat Total 50 Ton

2.7.1.2.3 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan dengan mengaplikasikan beban-beban pada model struktur serta mengkombinasikannya, maka analisis stabilitas global dapat dilakukan. Pola pembebanan yang digunakan dan kombinasi kondisi pelayanan yang akan dianalisis meliputi berat sendiri slab (*Self Weight, SW*), beban roda tunggal atau *Standard Axle Single Wheel Load*, beban truk trailer (Truk), dan beban rem (Rem), adalah sebagai berikut:

Model-A : (1.0SW + 1.0Truk-1 + 1.0Rem)

Model-B : (1.0SW + 1.0Truk-2 + 1.0Rem)

Model-C : (1.0SW + 1.0Truk-3 + 1.0Rem)

Model-D : (1.0SW + 1.0Truk-4 + 1.0Rem)

Model-E : (1.0SW + 1.0Truk-5 + 1.0Rem)

Model-F : (1.0SW + 1.0Truk-6 + 1.0Rem)

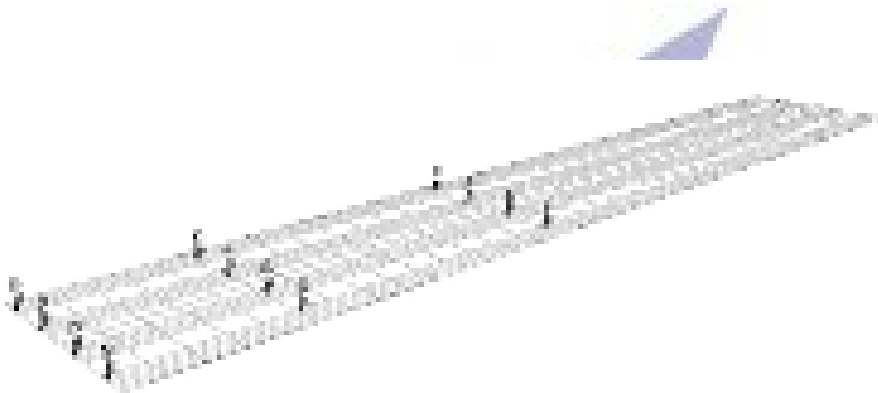
Dengan menganalisis slab sebanyak 3 panel ukuran 1,8 m x 12 m dan dipasang 2 panel arah melintang, perpotongan garis joint melintang dan jarak arah memanjang 1 meter, maka jumlah joint adalah 259 buah, sehingga beban per joint adalah 0,97 kN.

Pola pembebanan divariasikan juga dalam dua kondisi, yaitu:

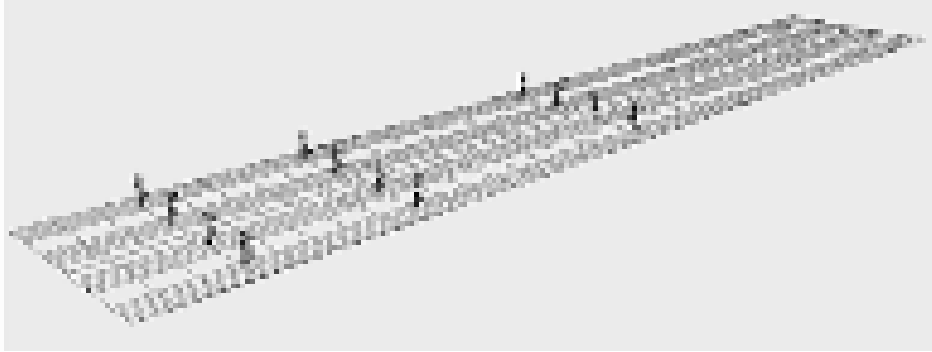
- Kondisi-1, posisi beban truk ada di atas 2 lajur
- Kondisi-2, posisi beban truk ada di atas 1 lajur.

1) Kondisi-1 Beban truck T50 ada di atas 2 lajur

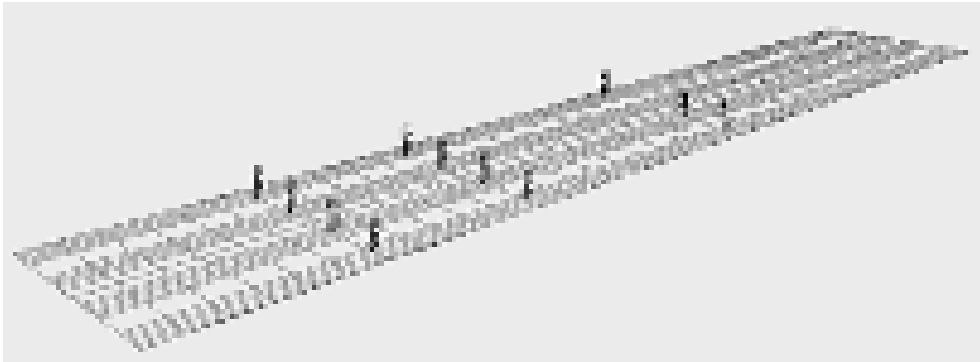
Beban truk T50 ini diaplikasikan sebagai beban terpusat pada perkerasan kaku. Konfigurasi pembebanan pada Kondisi-1 ditunjukkan dalam Gambar 7 sampai dengan Gambar 12. Pola pembebanan akibat gaya rem ditunjukkan dalam Gambar 13.



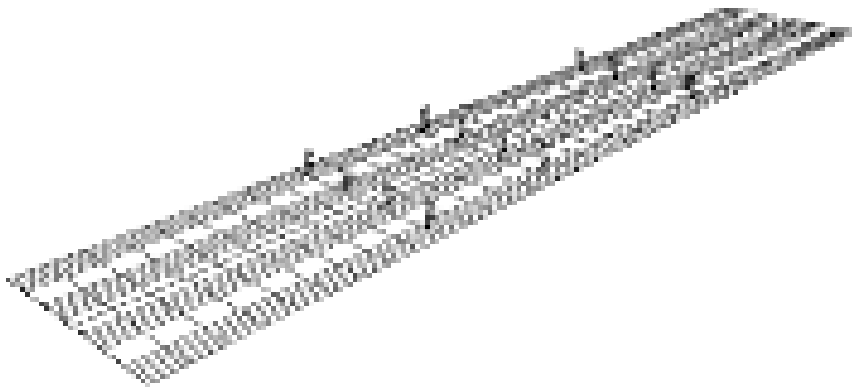
Gambar 7 Pola pembebanan Model-A, Kondisi-1



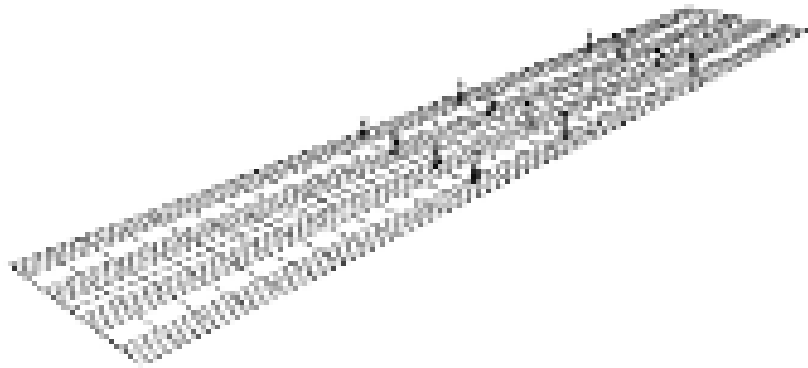
Gambar 8 Pola pembenanan Model-B, Kondisi-1



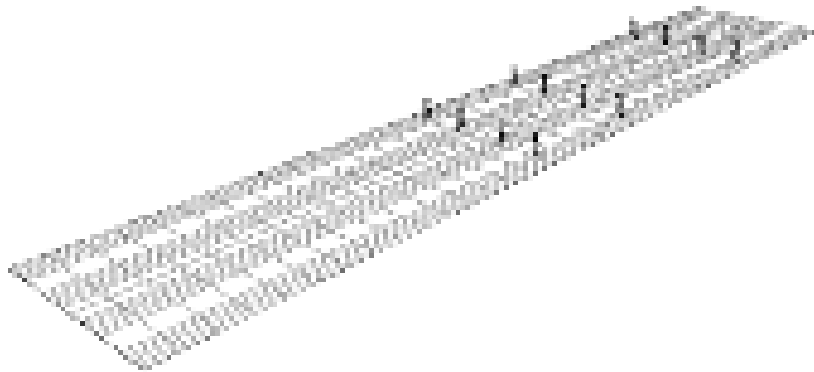
Gambar 9 Pola pembenanan Model-C, Kondisi-1



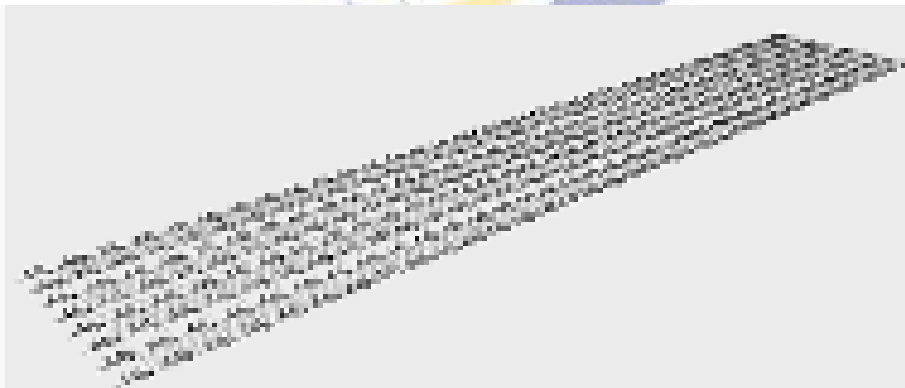
Gambar 10 Pola pembenanan Model-D, Kondisi-1



Gambar 11 Pola pembebanan Model-E, Kondisi-1



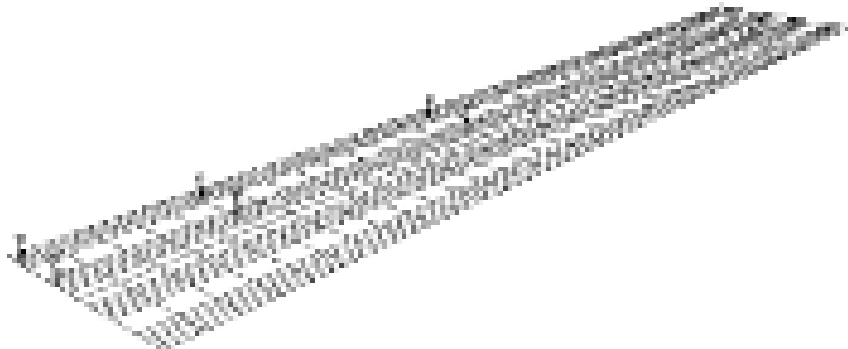
Gambar 12 Pola pembebanan Model-F, Kondisi-1



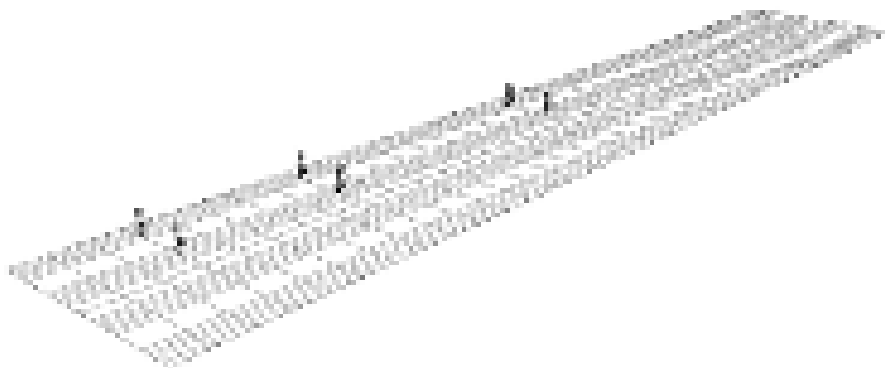
Gambar 13 Pola pembebanan akibat gaya rem, Kondisi-1

2) Kondisi-2, Beban truck T50 ada di atas 1 lajur.

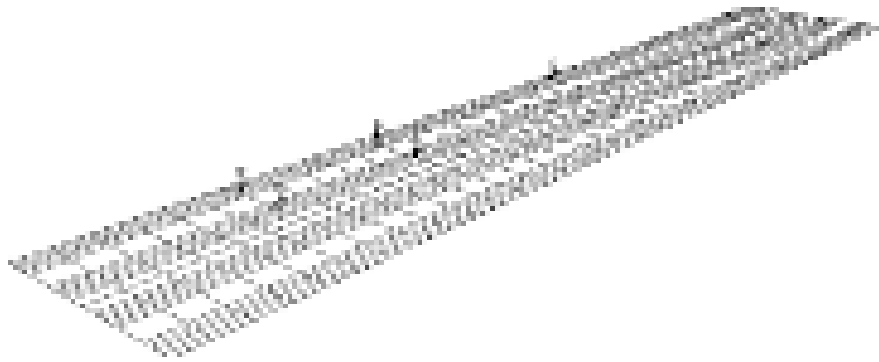
Beban truk T50 ini diaplikasikan sebagai beban terpusat pada perkerasan kaku sebesar 50 ton, dan berada di salah satu lajur saja. Dalam Gambar 14 sampai dengan Gambar 19 diperlihatkan posisi beban truk. Pada Gambar 20 diperlihatkan pola pembebanan akibat gaya rem.



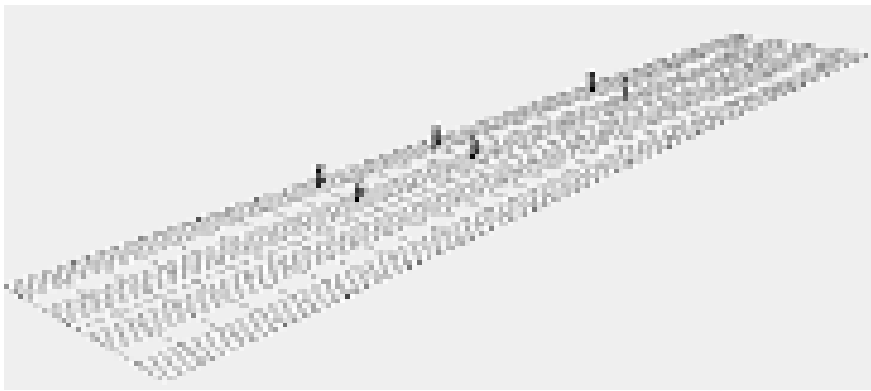
Gambar 14 Pola pembebanan Model-A, Kondisi-2



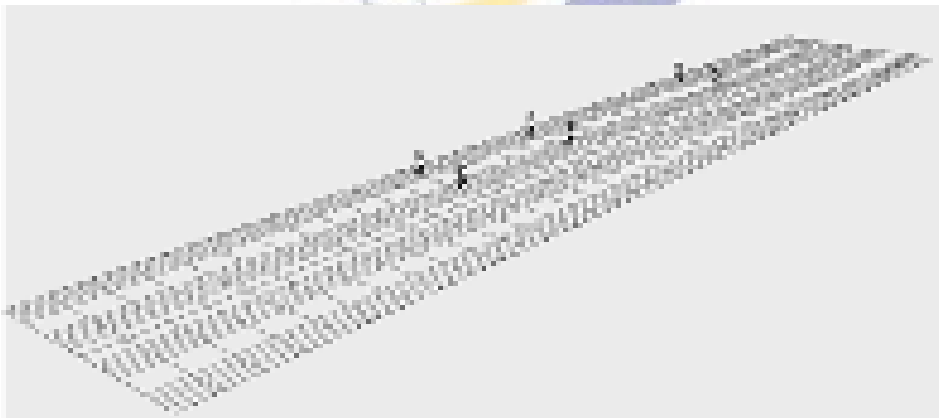
Gambar 15 Pola pembebanan Model-B, Kondisi-2



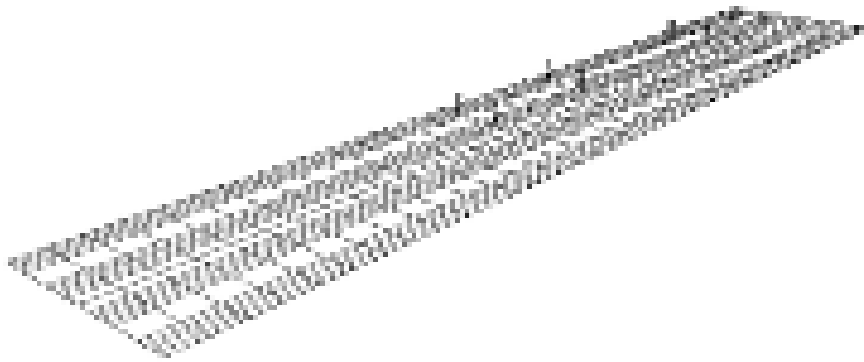
Gambar 16 Pola pembebanan Model-C, Kondisi-2



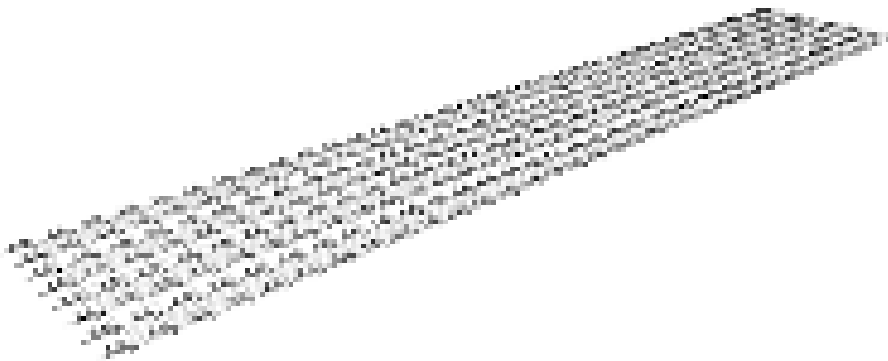
Gambar 17 Pola pembebanan Model-D, Kondisi-2



Gambar 18 Pola pembebanan Model-E, Kondisi-2



Gambar 19 Pola pembebanan Model-F, Kondisi-2



Gambar 20 Pola pembebanan akibat gaya rem, Kondisi-2

2.7.1.2.4 Hasil Analisis

Dari hasil eksekusi dengan program SAP 2000 V.9.03, untuk seluruh model termasuk beban rem yang terjadi, diperoleh deformasi maksimum pada joint perkerasan kaku seperti disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2 *Joint Displacements*

Kondisi	OutputCase	CaseType	StepType	Defleksi
	Text	Text	Text	m
1(Truck 2 Lajur)	ENV-COMB	Combination	Min	-0,005485
2(Truck 1 Lajur)	ENV-COMB	Combination	Min	-0,004905

Gambar 21 dan Gambar 22 menunjukkan momen arah transversal dan longitudinal pada Kondisi-1 dan Kondisi-2.

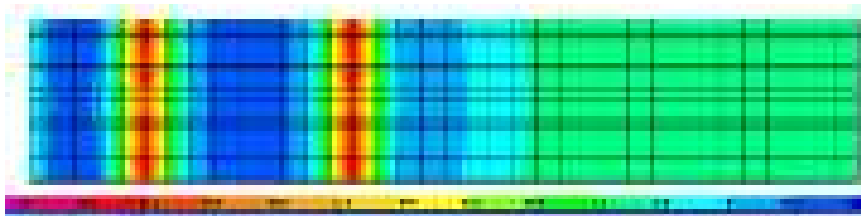
Dilihat dari gaya yang bekerja pada perkerasan kaku, maka perencanaan yang digunakan adalah hasil analisis SAP 2000 pada kondisi 1 (beban truck 2 lajur) sehingga diperoleh hasil maksimum.

Hasil analisis SAP 2000 dari envelope beban yang diterapkan pada struktur perkerasan kaku menghasilkan momen arah transversal (arah melintang jalan) $M_{trans} = 50,867 \text{ Kn/m}$ dan arah longitudinal (arah sejajar lalulintas) $M_{long} = 78,4 \text{ Kn/m}$, dan gaya geser yang terjadi pada struktur perkerasan kaku sebesar $V_u = 99,8 \text{ Kn}$.

Untuk perencanaan dowel pada arah transversal (melintang) dianalisis sebagai perkuatan untuk menahan geser. Analisis disajikan pada Gambar 26.

Dari Gambar 26, dihasilkan bahwa perencanaan dowel yang dipakai adalah menggunakan besi tulangan D25-300 yang dipasang ke arah transversal (melintang).

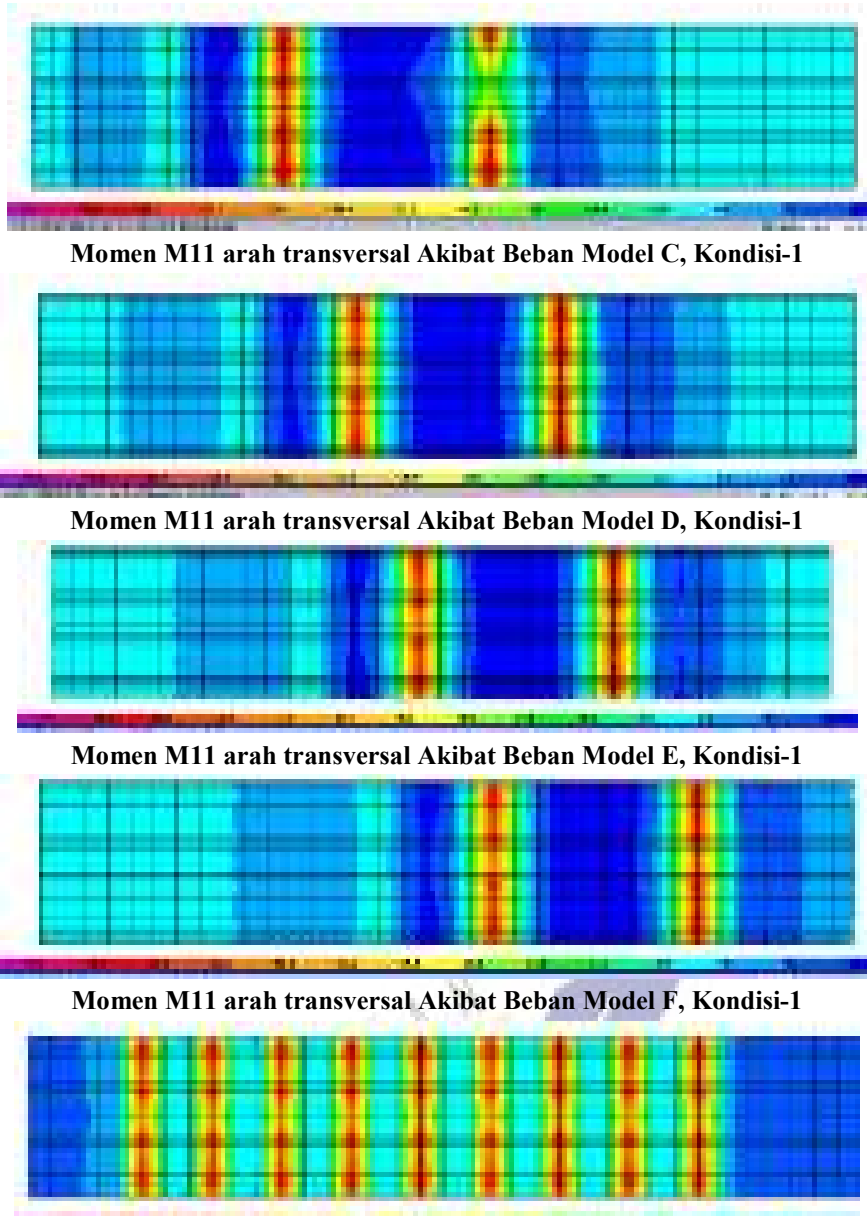
Adapun defleksi yang terjadi pada struktur perkerasan kaku dapat dilihat pada Tabel 3.



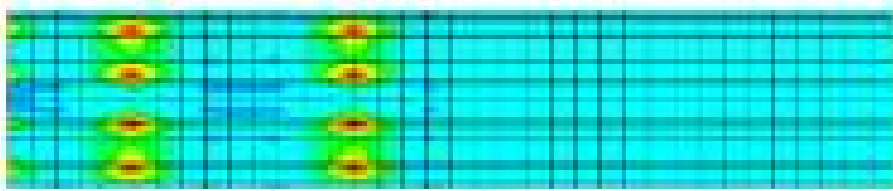
Momen M11 arah transversal Akibat Beban Model A, Kondisi-1



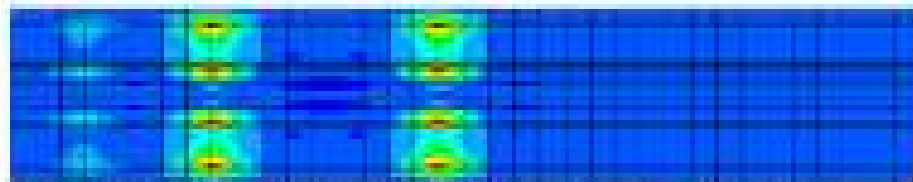
Momen M11 arah transversal Akibat Beban Model B, Kondisi-1



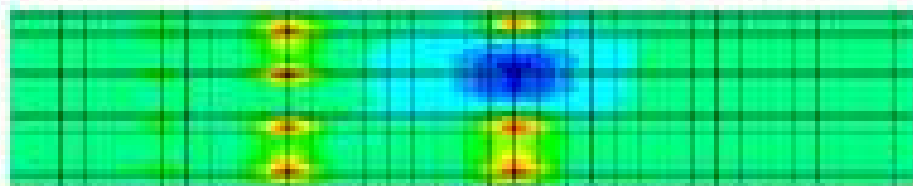
Gambar 21 Momen M11 arah transversal Akibat Beban Envelope (Model A~F) pada Kondisi-1



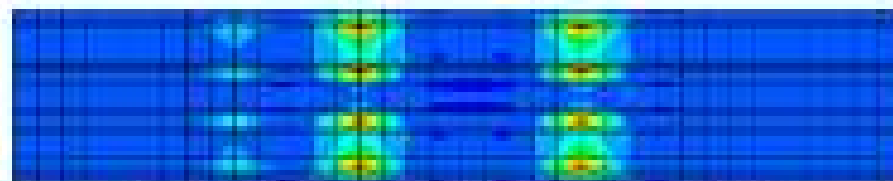
Momen M22 arah longitudinal akibat Model A Kondisi-2



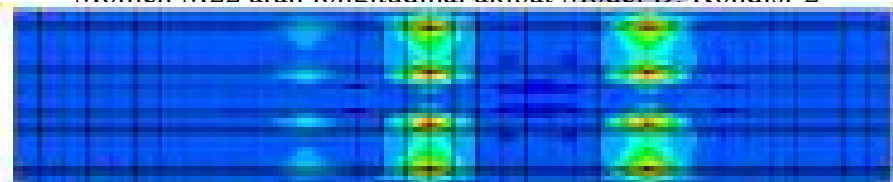
Momen M22 arah longitudinal akibat Model B. Kondisi-2



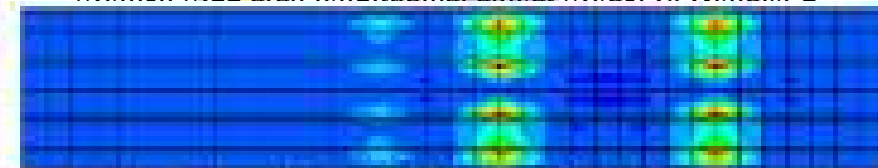
Momen M22 arah longitudinal akibat Model C. Kondisi-2



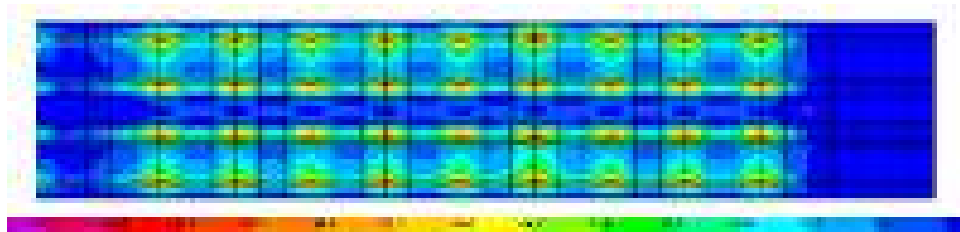
Momen M22 arah longitudinal akibat Model D. Kondisi-2



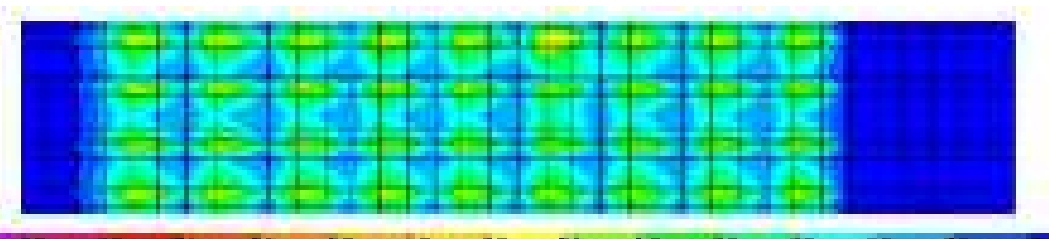
Momen M22 arah longitudinal akibat Model E. Kondisi-2



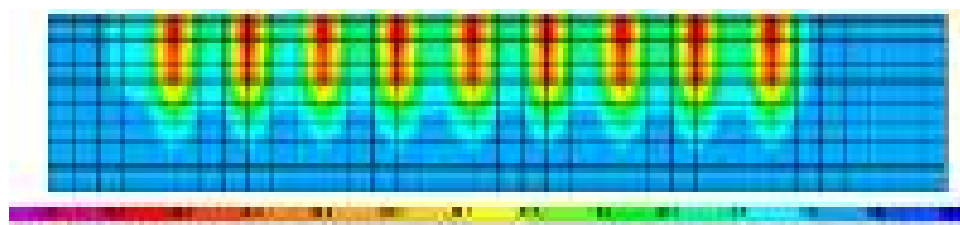
Momen M22 arah longitudinal akibat Model F, Kondisi-2



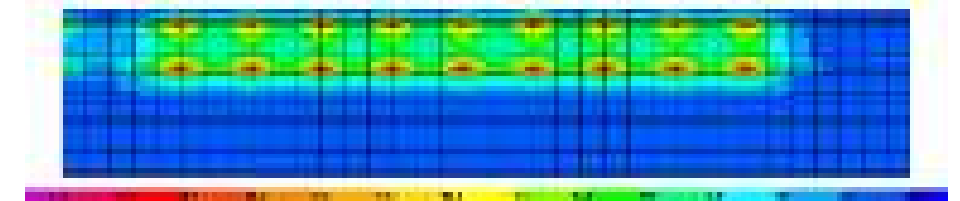
Gambar 22 Momen M22 arah longitudinal Akibat Beban Envelope (model A~F)
Pada Kondisi-2



Gambar 23 Gaya Geser yang terjadi pada struktur Perkerasan kaku

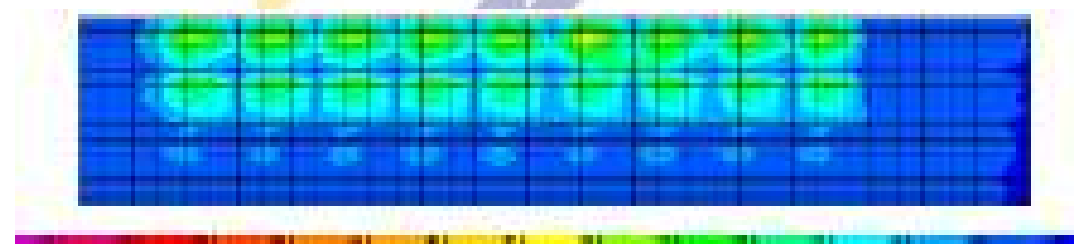


Momen M11 arah transversal Akibat Beban Envelope (Model A~F)



Momen M22 arah longitudinal Akibat Beban Envelope (model A~F)

Gambar 24 Momen M11 dan M22 akibat beban Envelope



Gambar 25 Gaya Geser yang terjadi pada struktur Perkerasan kaku

DATA PERHITUNGAN		DESAIN TULANGAN GESER	
DATA BETON		$\rho_w = \frac{A_s}{b \cdot d}$	0,0168
K	= 400	$0 < \frac{V_u \cdot d}{M_u} \leq 1$	0,1747
fc'	= 33,20 MPa	pers. Vc biasa	
Ec	= 27081137,35 kN/m ²	$V_c = \left(\frac{\sqrt{f_c}}{6} \right) \cdot b \cdot d$	84,03 kN
εc	= 0,003	untuk keamanan diambil Vc terkecil	
β1	= 0,827	$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c$	56,63 mm
DATA TULANGAN		Vs tidak boleh melebihi Vs max di mana status -----	ok
fy	= 400 MPa	spasi = $\frac{d}{4}$ jika $V_s > \left(\frac{\sqrt{f_c}}{3} \right) \cdot b \cdot d$ dan spasi = $\frac{d}{2}$ jika $V_s < \left(\frac{\sqrt{f_c}}{3} \right) \cdot b \cdot d$	
Es	= 200000 MPa	spasi max yang diizinkan untuk nilai Vs di atas adalah -----	43,75 mm
εs	= 0,002	$A_{vmin} = \frac{1}{3} \cdot \frac{b \cdot s}{f_y}$	250,00 mm ²
FAKTOR REDUKSI (φ) SNI 02		$A_v = \frac{V_s \cdot s}{f_y \cdot d}$	485,43 mm ²
LENTUR	0,80	TULANGAN GESER PERLU	
GESEK	0,75	1D25-300	
TORSI	0,75		
DATA PENAMPANG			
Dimensi rencana			
b	= 1000 mm		
h	= 200 mm		
Tulangan rencana			
du	= 25 mm		
ndu	= 3 bh		
ds	= 25 mm		
spasi	= 300 mm		
Selimit beton			
p	= 75 mm		
db	= 112,5 mm		
d	= 87,5 mm		
DATA BEBAN			
Mu	= 50 kNm		
Vu	= 99,8 kN		

Gambar 26 Perhitungan dimensi perkuatan geser

Tabel 3 Hasil analisis dengan SAP-2000

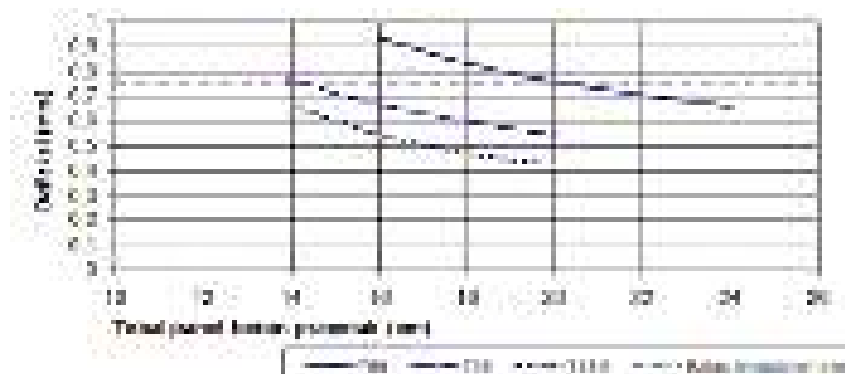
Properties	Vertical Deformation (m)
Min	-0,000205 = - 0,20 mm
Max	-0.005485 = - 5,48 mm
N (Jumlah Join)	849
Std	0,002 = 2 mm
Rata-rata	-0,002845 = -2,84 mm

Pada program ini slab perkerasan beton pracetak dimodelkan dengan tebal slab bervariasi antara 14 cm – 24 cm untuk mengetahui seberapa besar pengaruh ketebalan (h) pada struktur perkerasan beton pracetak. Hasil analisa struktur ini menghasilkan defleksi yang terjadi pada slab dengan beban yang bekerja dikalikan dengan FK sebesar 1,25 sebagai faktor keamanan apabila beban muatan truk pada kenyataannya melebihi muatan atau tonase yang diijinkan. Hasil dari analisis ini bisa dilihat pada Tabel 19.

Tabel 4 Variasi Tebal beton Pracetak dan Beban Terhadap Defleksi pada Sambungan

Tebal Perkerasan Beton Pracetak	Defleksi Maksimum Yang Terjadi pada Perkerasan Beton Pracetak		
	Beban Truk T50 (mm)	Beban Truk T35 (mm)	Beban Truk T13.5 (mm)
14 cm	-	0.763	0.661
16 cm	0.935	0.667	0.545
18 cm	0.834	0.597	0.468
20 cm	0.758	0.546	0.424
24 cm	0.655	-	-

Dilihat dari tabel di atas bahwa perkerasan beton pracetak untuk tebal 14 cm menghasilkan defleksi yang besar dibandingkan dengan perkerasan beton pracetak dengan tebal 24 cm. Sedangkan pada perkerasan beton pracetak dengan tebal 20 cm defleksi yang terjadi sebesar 0.758 mm mendekati syarat defleksi pada joint yang dibatasi maksimum 0,75 mm, sehingga aman untuk lalu lintas. Lihat Gambar 27..



Gambar 27 Defleksi pada sambungan dengan variasi tebal dan beban

Untuk membandingkan perhitungan tebal slab sebagai beton pracetak menggunakan metoda ACI, untuk tebal slab 20 cm, diperoleh defleksi vertikal 0,42 mm < 0,75 mm. Dengan asumsi perbedaan temperatur sebesar 20 °C, maka jarak ekspansi pada sambungan 2,38 cm ~ 2,5 cm untu panjang antara sambungan ekspansi 90 meter.

2.7.1.2.5 Analisis Defleksi pada Beton Pracetak Tanpa Prategang

Untuk beton pracetak yang tidak dirancang dengan prategang, maka dimensi panel dibatasi, sesuai dengan prediksi spasi retak yang akan terjadi, kemampuan crane untuk pengangkatan panel dari cetakan dan pengangkutan ke atas Trailer. Panjang beton pracetak pada umumnya antara 4 m dan 5 m dengan tebal antara 25 cm dan 30 cm. Untuk satu panel pada umumnya dirancang sekitar 10-12 Ton sehingga lebar panel dapat ditentukan. Untuk satu lajur lalu lintas 3,6 meter, panjang panel 5 meter dan tebal slab 28 cm maka berat 1 panel adalah: $5\text{ m} \times 3,6\text{ m} \times 0,28\text{ m} \times 2,4\text{ ton/m}^3 = 12\text{ ton}$.

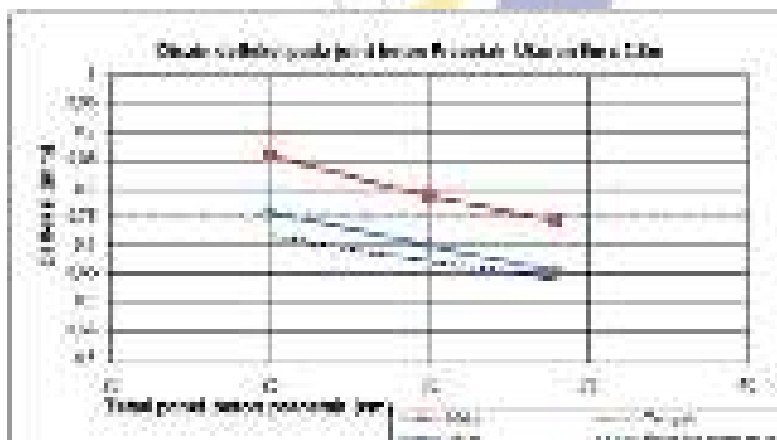
Hasil analisis numerik dengan Program SAP 2000 yang dicoba dengan tebal antara 25 dan 34 cm menghasilkan defleksi seperti ditunjukkan dalam Tabel 5 dan Gambar 28..

Tabel 5 Variasi Tebal beton Pracetak Tanpa Prategang dan Defleksi yang Terjadi

Tebal, cm	Defleksi (mm)		
	Maks	Tengah	Joint
25	0,857	0,716	0,759
30	0,788	0,672	0,700
34	0,743	0,640	0,651

Berdasarkan analisis tersebut maka tebal slab 28 cm akan menghasilkan defleksi pada sambungan sebesar $0,72\text{ mm} < 0,75\text{ mm}$, sehingga aman untuk lalu lintas.

Disain beton pracetak tanpa prategang ini belum dilakukan simulasi di laboratorium, tetapi akan diterapkan sebagai variasi jenis beton pracetak.



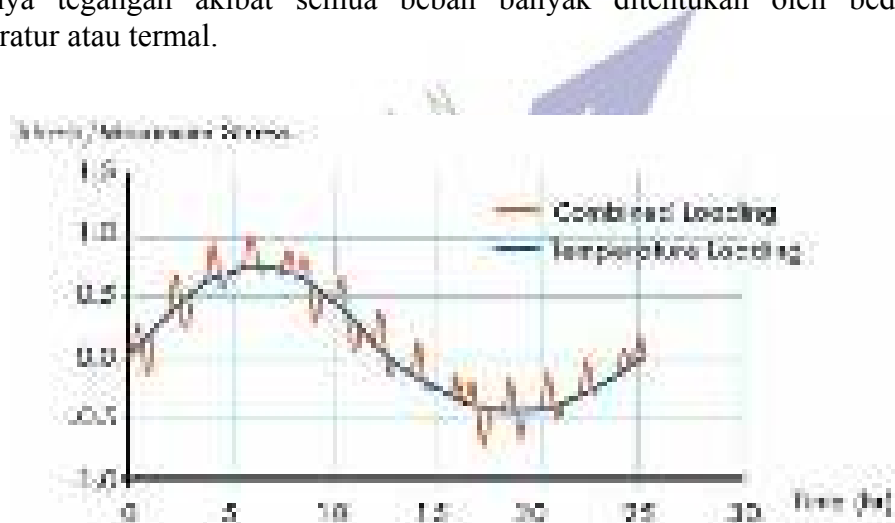
Gambar 28 Disain Defleksi pada beton Pracetak Tanpa Prategang

2.8 Perencanaan dengan Prinsip Mekanistik (PT. Adhi Karya)

2.8.1 Pendahuluan

Pelat perkerasan adalah elemen struktur yang mengalami deformasi lentur sebagai mekanisme respon utama ketika menerima beban. Di samping itu pelat juga dapat mengalami deformasi planar (sejajar bidang). Deformasi lentur dan planar akan menyebabkan tegangan lentur dan planar. Akan tetapi, akibat rasio yang besar antara dimensi planar dan tebalnya, pelat tidak mengalami tegangan yang normal terhadap permukaannya. Perilaku ini lebih dikenal dengan sebutan *plane stress*.

Pelat perkerasan ditumpu oleh tumpuan tidak kaku atau *flexible*. Untuk pelat yang dibebani roda kendaraan model mekanika yang akurat telah dikembangkan oleh Westergaard. Selain beban kendaraan, beban lain yang diperhitungkan dalam desain PPCP adalah beban akibat pengaruh lingkungan atau cuaca. Beban lingkungan yang dianggap penting adalah beban termal atau beda temperatur dan susut beton (*shrinkage*). Semua beban dapat menyebabkan timbulnya tegangan yang berakibat pada keretakan beton. Keretakan pada sistem perkerasan seperti PPCP bukan serta merta berarti pelat kehilangan fungsi strukturalnya. Namun integritas pelat yang sudah retak akan menurun dan pelat mengalami penurunan kemampuan layan. Ilustrasi besarnya tegangan yang terjadi akibat termal saja dan gabungan dari termal dan beban kendaraan dapat dilihat pada gambar di bawah. Dari kedua tegangan pada Gambar 29 nampak bahwa besarnya tegangan akibat semua beban banyak ditentukan oleh beda temperatur atau termal.



Gambar 29 Ilustrasi besarnya tegangan akibat termal dan gabungan termal plus beban kendaraan.

2.8.2 Beban Kendaraan

Ada dua cara yang dapat digunakan untuk menghitung tegangan tarik yang terjadi akibat

beban kendaraan, yaitu dengan:

- 1) Cara Analitis dan
- 2) Metode Elemen Hingga.

Cara Analitis dapat menggunakan model yang dikembangkan oleh Westergaard, sedangkan program Metoda Elemen Hingga dapat menggunakan berbagai program yang tersedia di pasaran atau menggunakan program bebas EverFE.

2.8.2.1 Metode Westergaard (cara analitis)

Westergaard mengasumsikan bahwa pelat perkerasan berada di atas lapisan pondasi cair yang rapat (*dense liquid foundation model*). Pada model ini pondasi direpresentasikan sebagai pegas yang linear, independen serta terdistribusi secara merata seperti terlihat pada Gambar 30.



Gambar 30 Plate on Elastic Foundation

Pegas akan berubah panjang sesuai dengan tegangan vertikal yang bekerja padanya dan tidak bisa menyalurkan gaya geser pada pegas-pegas yang ada disekitarnya, seperti terlihat pada Gambar 31.



Gambar 31 Plate on Dense Liquid Model

Karena pegas hanya mampu memikul gaya aksial dan tidak mampu menyalurkan gaya geser

berarti bahwa pondasi diluar tapak pelat tidak akan mengalami lendutan. Lendutan hanya terjadi dibawah pelat saja dan pada tepi pelat ada diskontinuitas lendutan.

Westergaard memodelkan tiga kasus pembebanan kendaraan, yaitu beban ditengah (Internal Loading), beban ditepi (Edge Loading), dan beban disudut pelat (Corner Loading) seperti terlihat pada Gambar 32.



Gambar 32 Lokasi Roda Kendaraan pada Pelat Westergaard

a) Beban di Tengah (Interior Loading)

Tegangan tarik maksimum yang terjadi adalah sebagai berikut:

$$\sigma_t = \frac{2P(1+\mu)}{2\pi k^2} \left[\ln\left(\frac{2L}{a}\right) - 0.307 \right] = \frac{2P(1+\mu)}{4\pi k^2} \left(\frac{a}{L}\right)^2$$

sedangkan defleksi maksimum yang terjadi adalah :

$$\delta = \frac{0.145P}{k^2 L^2} \left[\ln\left(\frac{L}{2L}\right) - 0.612 \right] \left(\frac{a}{L}\right)^2$$

b) Beban di Tepi (Edge Loading)

Tegangan tarik maksimum yang terjadi adalah sebagai berikut:

$$\sigma_t = \frac{0P(1+\mu)}{k^2} \left[0.450 \log\left(\frac{a}{L}\right) - 0.012 - 0.0063 \left(\frac{a}{L}\right) \right]$$

sedangkan defleksi maksimum yang terjadi adalah :

$$\delta = \frac{0.105(1+\mu)P}{k^2 L^2} \left[1 - 0.770 \left(1 + 0.5\mu\right) \left(\frac{a}{L}\right) \right]$$

c) Beban di Sudut (Corner Loading)

Tegangan tarik maksimum yang terjadi adalah sebagai berikut:

$$\sigma_r = \frac{3P}{\pi} \left[1 - \left(\frac{1.414a}{l} \right)^{0.75} \right]$$

sedangkan defleksi maksimum yang terjadi adalah:

$$\Delta = \frac{P}{k_s} \left[1 - 0.58 \left(\frac{1.414a}{l} \right)^{0.75} \right]$$

Parameter pada persamaan di atas adalah:

l = radius kekakuan relative (radius of relative stiffness) (mm) =

$$l = \sqrt{\frac{2Eh^3}{3(1-\nu^2)k_s}}$$

k_s = modulus reaksi subgrade (MPa/mm)

E = Young's Modulus dari beton (MPa)

h = tebal pelat (mm)

ν = rasio Poisson dari beton

P = beban yang bekerja (N)

a = radius bidang kontak (mm)

2.8.2.2 Metode Elemen Hingga dengan EverFE

Pada Metode Elemen Hingga pondasi diperlakukan sebagai material elastik linear, isotropic dan homogen. Karena itu model ini lebih realistis untuk merepresentasikan perilaku pondasi dibandingkan dengan Dense Liquid Model karena dapat memodelkan adanya distribusi tegangan dari suatu elemen ke elemen-elemen di sekitarnya, seperti terlihat pada Gambar 33. Akibatnya lendutan yang terjadi akan kontinu dan lendutan pada suatu titik bukan hanya disebabkan oleh beban yang bekerja pada titik tersebut tetapi juga dipengaruhi oleh beban yang bekerja pada titik-titik yang lain.



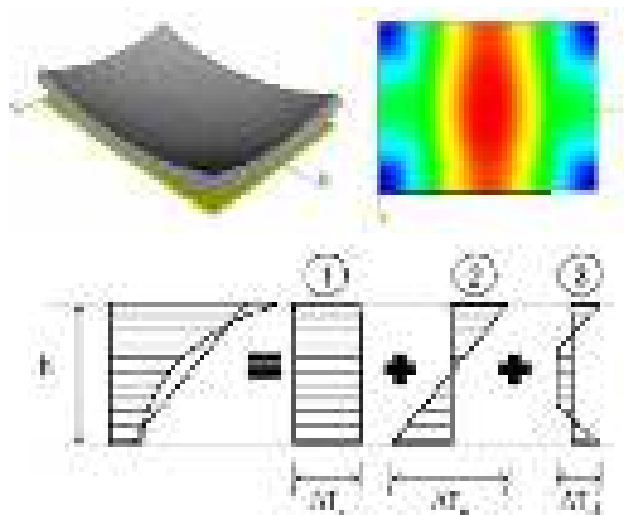
Gambar 33 *Plate on Elastic Solid Model*

Perhitungan tegangan dan defleksi dengan Metode Elemen Hingga dapat dilakukan menggunakan program bebas (freeware) EverFE [...] yang mampu mensimulasikan respon perkerasan rigid akibat beban kendaraan dan beban suhu. Program ini juga dapat memodelkan friksi yang terjadi antara pelat dengan Sub-Base sehingga dapat memprediksi besarnya tegangan tarik yang

terjadi jika pelat beton mengalami perpindahan akibat shrinkage, creep maupun akibat perubahan temperatur.

2.8.3 Beban Termal

Perbedaan temperatur antara siang dan malam hari pada pelat akan menyebabkan terjadinya lenting (*curling*) pada perkerasan beton. Pada siang hari temperatur serat atas pelat beton lebih tinggi daripada serat bawah pelat. Karena itu serat atas akan memuai sedangkan serat bawah akan menyusut yang menyebabkan terjadinya tegangan tekan pada serat atas dan tegangan tarik serat bawah. Hal yang berlawanan akan terjadi pada malam hari, dimana temperatur serat atas pelat beton lebih rendah daripada serat bawah pelat. Karena itu serat atas akan menyusut sedangkan serat bawah akan memuai yang menyebabkan terjadinya tegangan tarik pada serat atas dan tegangan tekan serat bawah. Lihat Gambar 34.



Gambar 34 Distribusi tegangan akibat temperatur pada penampang beton

Gambar 34 memperlihatkan distribusi tegangan akibat temperatur pada suatu penampang

dimana tegangan akibat temperatur dapat dipilah menjadi tiga kelompok sebagai berikut:

1. Tegangan akibat perubahan temperatur yang uniform ΔT_u .
2. Tegangan akibat perubahan temperatur gradien ΔT_g .
3. Tegangan akibat perubahan temperatur yang nonlinear ΔT_{nl} .

Adanya perubahan temperatur positif atau negatif akan menyebabkan timbulnya tegangan tekan atau tarik pada beton. Houben [...] menyatakan bahwa tegangan yang terjadi akibat perubahan temperatur yang uniform ΔT_u umumnya kecil dan dapat diabaikan; sedangkan perubahan temperatur yang nonlinear ΔT_{nl} akan menyebabkan tegangan internal beton yang tidak linear yang perlu diperhatikan jika perkerasan beton mempunyai ketebalan yang besar seperti yang umumnya ditemui pada perencanaan lapangan terbang. Karena PPCP umumnya mempunyai tebal yang relatif tipis dibandingkan dengan perkerasan konvensional maka pengaruh ΔT_{nl} dapat diabaikan.

Sebaliknya, temperatur gradien ΔT_g umumnya akan menimbulkan tegangan lentur yang ordenya sama besar dengan tegangan akibat beban kendaraan dan karena itu tidak dapat diabaikan.

Berbeda dengan negara lain, aplikasi temperatur sebagai pembebanan untuk perencanaan perkerasan beton tidak umum dilakukan di Indonesia. Tabel 6 memperlihatkan Temperatur Gradien yang dipakai di India untuk merencanakan tebal perkerasan beton sedangkan Tabel 7 memperlihatkan Temperatur Gradien Standar dan Distribusi Frekwensinya yang digunakan untuk merencanakan perkerasan beton di Belanda.

Tabel 6 Temperatur Gradien yang direkomendasikan oleh IRC

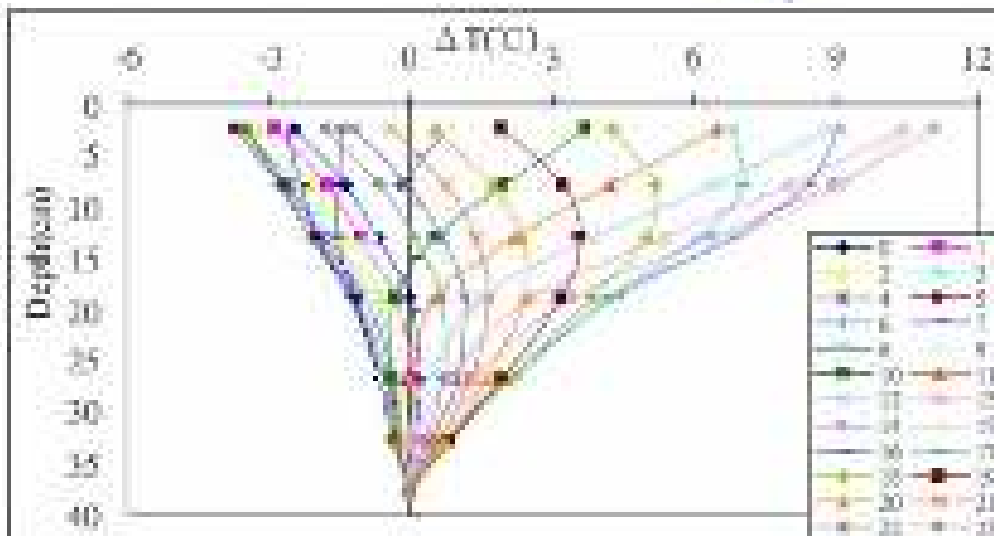
Zona	Status	Temperatur Differential, °C in slab of thickness			
		15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
I	Punjab, J.P., Uttaranchal, Gujarat, Rajasthan, Haryana and North M.P. Excluding hilly regions.	12.8	13.1	14.3	15.5
II	Bihar, Jharkhand, West Bengal, Assam and Eastern Orissa excluding hilly regions and coastal areas.	15.6	16.4	18.6	19.5
III	Madhyastra, Karnataka, South M.P., Chhattisgarh, Andhra Pradesh, Western Orissa and North Tamil Nadu, excluding hilly regions and coastal areas.	17.3	18.0	20.3	21.3
IV	Kerala and South Tamil Nadu excluding hilly regions and coastal areas.	15.0	16.4	17.6	18.1
V	Coastal areas bounded by hills.	14.6	15.3	16.2	17.0
VI	Coastal areas unbounded by hills.	14.6	17.0	18.6	19.2

Dari tabel 6 dapat dilihat bahwa Temperatur Gradien akan bertambah besar jika pelat bertambah tebal.

Tabel 7 Temperatur Gradien dan Distribusi Frekwensinya untuk Perencanaan Perkerasan Beton di Belanda

ΔT_g ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)	Average ΔT_g ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)	Freq. Distribution (%)
0.000 - 0.005	0.0025	50.0
0.005 - 0.010	0.0100	22.0
0.010 - 0.020	0.0200	7.5
0.020 - 0.035	0.0300	5.5
0.035 - 0.045	0.0400	4.5
0.045 - 0.055	0.0500	1.0
0.055 - 0.065	0.0600	0.5

Karena di Indonesia tidak ada data Temperatur Gradien yang dapat dipakai untuk perencanaan perkerasan, maka untuk studi ini akan dipakai hasil penelitian oleh Chou yang melakukan pengukuran temperatur di Bandara Chiang Kai Sek Taiwan, dimana salah satu hasil pengukurannya dapat dilihat pada Gambar 35. Chou mendapatkan bahwa tegangan tarik maksimum yang terjadi akibat beban temperatur adalah sebesar 1,05 Mpa.



Gambar 35 Distribusi Temperatur terhadap Ketebalan Pelat

Berdasarkan hasil pengukuran tersebut, dapat dilihat bahwa:

- a. Temperatur Gradien Maksimum terjadi pada jam 2 siang sebesar $0.03^{\circ}\text{C}/\text{mm}$.
- b. Temperatur Gradien Minimum terjadi pada jam 5 pagi sebesar $-0.01^{\circ}\text{C}/\text{mm}$.

Serupa dengan beban kendaraan, ada dua cara yang dapat digunakan untuk menghitung tegangan tarik yang terjadi akibat beban kendaraan, yaitu 1) dengan menggunakan Cara Analitis dan 2) dengan menggunakan Metode Elemen Hingga. Cara analitis yang paling sering digunakan untuk menghitung tegangan pada pelat beton akibat beban temperature adalah dengan menggunakan Metode Bradbury [Bradbury, 1938]. Pada makalah ini Cara Analitis yang akan digunakan untuk menghitung tegangan pada pelat beton akibat beban temperatur adalah dengan menggunakan simplifikasi Metoda Bradbury, dimana tegangan yang terjadi akibat Temperatur Gradien ΔT_g adalah:

$$\sigma_s = \frac{E_c \Delta T_g}{2(1 - \nu)}$$

KETERANGAN:

E_c = Young's Modulus dari slab (27,100 MPa)

ΔT_g = Temperatur Gradien ($^{\circ}\text{C}$)

ϵ_c = koefisien muai panas beton ($6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

ν = Poisson's Ratio (= 0,15)

2.8.4 Pengaruh Susut dan Rangkak

Creep dan shrinkage merupakan dua aspek yang berpengaruh terhadap stress pada beton dan menyebabkan kehilangan prategang pada tendon (prestress loss). Dalam analisisnya, kedua aspek tersebut dianggap terpisah dan tidak saling bergantung walaupun pada kenyataannya ling berhubungan satu sama lain dan menjadi satu fenomena fisik yang kompleks.

2.8.4.1 Susut

Kontraksi yang terjadi pada pelat akibat terjadinya efek susut atau perubahan suhu yang cukup signifikan menyebabkan tegangan tarik yang cukup besar pada bagian lapisan tengah pelat. Untuk perkerasan beton konvensional, jarak antara joint harus diatur sedemikian rupa sehingga tegangan friksi

terjadi tidak menimbulkan retak pada beton. Tegangan friksi f_f pada pelat beton dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$f_f = \frac{C_f \gamma_c L}{2}$$

KETERANGAN:

C_f = sliding friction coefficient

γ_c = berat jenis beton (= 25 kN/m³)

L = panjang slab (100 m)

Berdasarkan pengujian, nilai $C_f = 0.6$ dapat digunakan untuk PPCP yang menggunakan *polyethylene sheet* sebagai *bond-breaking medium*

2.8.4.2 Rangkak

Konsep yang digunakan dalam manual ini adalah mengubah modulus elastisitas beton menjadi modulus elastisitas yang dikoreksi terhadap faktor creep dan waktu. *Age-adjusted effective modulus* dihitung dengan persamaan di bawah ini.

$$E_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi(t, t_0) + \phi(t, t_0)}$$

KETERANGAN:

$\chi(t, t_0)$ adalah *aging factor* dan $\phi(t, t_0)$ adalah koefisien creep.

Perubahan regangan dalam periode t_0 sampai t didefinisikan sebagai penambahan regangan aksial dan kurvatur yang dinyatakan dengan $\Delta\epsilon_0$ dan $\Delta\psi$. Untuk menentukan kedua nilai ini, langkah pertama adalah perubahan regangan akibat creep dan shrinkage pada beton serta relaksasi pada tendon dianggap seolah-olah ditahan oleh gaya aksial ΔN dan ΔM yang bekerja pada titik referensi O. Setelah itu tahanan tersebut dihilangkan dengan pengaplikasian gaya yang sama tetapi berlawanan pada penampang. Gaya ini menyebabkan perubahan regangan aksial dan kurvatur sebesar:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_0 \\ \Delta\psi \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_c(A' I' - B'^2)} \begin{bmatrix} I' & -B' \\ -B' & A' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta N \\ -\Delta M \end{Bmatrix}$$

KETERANGAN:

A' , B' , dan I' merupakan luas penampang, momen pertama, dan momen kedua terhadap sumbu yang melewati titik referensi O pada saat t .

Gaya yang menyebabkan hilangnya tahanan tersebut dihitung sebagai penjumlahan dari tiga hal:

$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{pmatrix}_{\text{creep}} + \begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{pmatrix}_{\text{shrinkage}} + \begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{pmatrix}_{\text{relaxation}}$$

Gaya yang dibutuhkan untuk menahan deformasi akibat creep dihitung dengan persamaan:

$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{pmatrix}_{\text{creep}} = - \sum_{i=1}^m \left\{ \varepsilon_i \cdot \phi \cdot \begin{bmatrix} A_i & E_i \\ A_i & I_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_i(t_0) \\ \psi(t_0) \end{pmatrix} \right\}_i$$

Gaya yang dibutuhkan untuk menahan shrinkage adalah

$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{pmatrix}_{\text{shrinkage}} = - \sum_{i=1}^m \left\{ \varepsilon_i \cdot e_m \cdot \begin{pmatrix} A_i \\ I_i \end{pmatrix} \right\}_i$$

Sedangkan gaya yang dibutuhkan untuk menahan regangan akibat relaksasi tendon adalah:

$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{pmatrix}_{\text{relaxation}} = \sum_{i=1}^m \begin{pmatrix} \Delta \sigma_{pr} \\ \Delta \sigma_{pr} \cdot e_m \end{pmatrix}_i$$

KETERANGAN:

$\Delta \sigma_{pr}$ adalah tegangan tendon yang hilang akibat relaksasi.

Tegangan pada beton yang dibutuhkan untuk menahan creep dan shrinkage pada penampang dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_{\text{restrained}} = - E_c^1(t, t_0) (\phi(t, t_0) \cdot \varepsilon_c(t, t_0) + \psi(t, t_0))$$

Keterangan:

$\varepsilon_c(t_0)$ adalah regangan saat t_0 .

Persamaan di atas mengasumsikan bahwa semua beban diaplikasikan saat t_0 .

Penambahan tegangan yang berkembang selama t dari t_0 dihitung dengan persamaan:

- pada beton, di semua *level* serat,

$$\Delta \sigma_c = \sigma_{\text{restrained}} + E_c^1(t, t_0) (\Delta \varepsilon_c + \psi \Delta \psi)$$

- pada besi tulangan,

$$\Delta\sigma_c = E_{pc}(\Delta\epsilon_c + \gamma_{pc}\Delta\theta)$$

- pada tendon prestress,

$$\Delta\sigma_{pr} = \Delta\sigma_{pr} + E_{pc}(\Delta\epsilon_c + \gamma_{pc}\Delta\theta)$$

Persamaan terakhir merupakan persamaan yang menghitung *loss* tendon akibat creep, shrinkage, dan relaksasi.

2.8.5 Desain PPCP (PT Adhi Karya)

2.8.5.1 Ketentuan Umum

Tujuan perencanaan sistem PPCP adalah untuk menghasilkan suatu struktur yang stabil, cukup tahan, mampu-layan, durable atau awet, dan memenuhi tujuan-tujuan lainnya seperti ekonomi dan kemudahan pelaksanaan.

Suatu struktur disebut stabil bila ia tidak mudah terguling, miring, atau tergeser, selama umur bangunan yang direncanakan. Suatu struktur disebut cukup tahan dan mampu-layan bila memungkinkan terjadinya kegagalan-struktur dan kehilangan kemampuan layan selama masa hidup yang direncanakan adalah kecil dan dalam batas yang dapat diterima.

Suatu struktur disebut durabel bila struktur tersebut dapat menerima keausan dan kerusakan yang diharapkan terjadi selama umur bangunan yang direncanakan tanpa pemeliharaan yang berlebihan.

2.8.5.2 Kriteria Desain

Kriteria desain atau perancangan secara garis besar didasarkan pada dua kondisi batas (limit state): kegagalan struktural dan kemampuan layan. Lebih lanjut, kondisi batas berdasarkan kegagalan struktural dapat diformulasikan berdasarkan jenis-jenis kegagalan (distress) yang mungkin terjadi. Kegagalan yang diinginkan biasanya tidak terjadi seketika atau tiba-tiba. Setidaknya didahului oleh indikasi tertentu sehingga memungkinkan dilakukan tindakan pencegahan atau perbaikan. Kegagalan akibat kelelahan struktur atau fatigue biasanya tidak terjadi seketika namun sulit dihindari. Sehingga, jenis kegagalan fatigue menjadi kondisi batas yang diutamakan dalam desain perkerasan. Lebih lanjut, kegagalan fatigue diantisipasi terjadi akibat repetisi tegangan lentur pada pelat. Dengan demikian perhitungan tegangan yang bekerja pada pelat perkerasan serta repetisinya perlu diketahui secara akurat.

Pada kenyataannya, sekalipun pelat perkerasan didesain agar tidak gagal terhadap fatigue namun kegagalan tetap saja terjadi. Hal ini tidak lepas dari

keterbatasan pemahaman kita terhadap mekanism pembebanan dan respon pelat. Oleh sebab itu, desain pada dasarnya adalah usaha menghindarkan kegagalan struktur perkerasan secara prematur.

Selain didesain untuk tidak gagal secara prematur, perkerasan juga perlu didesain untuk memberikan kemampuan layan yang memadai. Pada dasarnya aspek ini berhubungan kenyamanan dari pengendara. Perkerasan yang baik dapat menghasilkan kualitas berkendara yang baik dalam artian tidak menyebabkan guncangan dan bunyi yang terlalu berlebihan.

Kualitas berkendara banyak ditentukan pada kondisi joint atau sambungan. Diantara faktor utama yang menentukan kualitas berkendara adalah erosi pumping, faulting dan spalling pada joint.

Berikut ini adalah penjelasan kriteria desain berdasarkan fatigue pada pelat dan kriteria erosi pumping, faulting dan spalling pada joint.

2.8.5.3 Kelelahan (Fatigue)

Kriteria utama pada perencanaan perkerasan beton dengan cara mekanistik adalah mencegah terjadinya Cummulative Damage atau Fatigue Failure akibat adanya penjalaran retak akibat beban yang bekerja. Percobaan di laboratorium menunjukkan bahwa kekuatan beton terhadap fatigue dipengaruhi oleh:

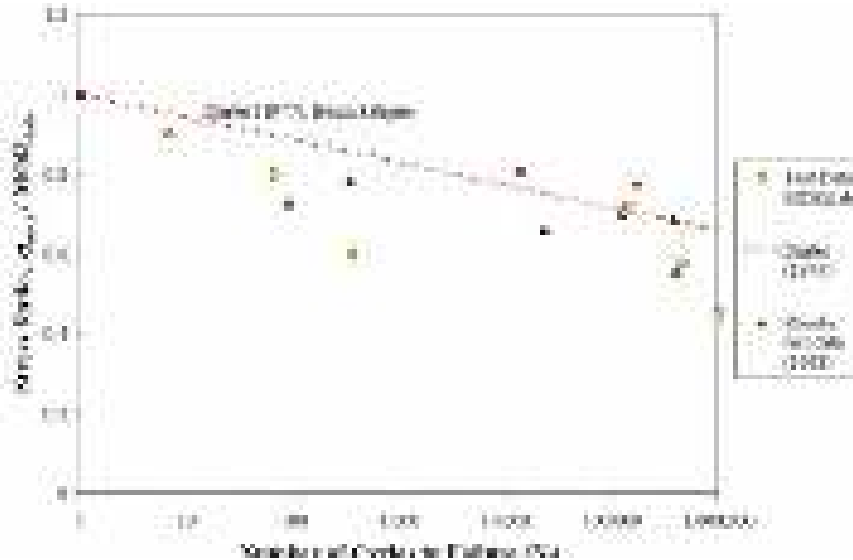
1. Kuat tekan beton
2. Tipe agregat
3. Frekuensi dari repetisi beban
4. Resting time
5. Tegangan minimum dan maksimum yang terjadi beton

Satu Kriteria Perencanaan yang paling sering digunakan untuk menentukan 'Cummulative Damage' adalah dengan cara mencari korelasi antara ratio (σ_T/MOR) dengan $N_{failure}$, dan, σ_T adalah tegangan tarik maksimum, MOR adalah Modulus of Rupture (kuat tarik lentur) dari Beton dan $N_{failure}$ adalah jumlah siklus yang diperlukan beton hingga mengalami kegagalan fatigue.

Gambar 36 memperlihatkan suatu kurva hubungan antara ratio (σ_T/MOR) dengan $N_{failure}$ hasil penelitian yang dilakukan oleh Darter dan Roesler.

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa :

1. Beton akan mengalami kegagalan fatigue setelah N siklus jika diberi tegangan tarik siklik yang lebih kecil dari Kuat Tarik Lentur beton (MOR).
2. Jika rasio σ_1/MOR besar maka beton akan mempunyai kegagalan fatigue yang kecil, atau sebaliknya.



Gambar 36 Kurva Kegagalan Fatigue Pada Slab dan Balok (Darter, Roesler)

Dari Gambar 36 dapat dilihat bahwa pada balok atau pelat beton yang mengalami beban yang berulang, dengan mengatur tegangan tarik maksimum di bawah rasio tertentu kita akan mendapatkan perkerasan dengan Umur Lelah yang lama. Perlu diingatkan disini bahwa persamaan AASHTO untuk menentukan tebal perkerasan diperoleh berdasarkan asumsi bahwa tegangan tarik maksimum yang terjadi sama dengan $0.75 MOR$ dan persamaan ini biasanya digunakan untuk jumlah ESAL N_{18} dengan orde 10^6 . Karena itu persamaan AASHTO tidak reliabel jika digunakan untuk merencanakan perkerasan dengan angka ESAL yang jauh lebih besar.

2.8.5.4 Erosi Pumping, Faulting dan Spalling

2.8.5.4.1 Erosi Pumping

Pumping adalah keluarnya material oleh air di bawah pelat perkerasan sekitar joint. Penyebabnya adalah lendutan pelat ketika menerima beban

kendaraan di sekitar joint yang menimbulkan tekanan pada air yang terkumpul di bawah pelat. Air memompa keluar particle halus yang menjadi bagian dari subbase maupun subgrade yang lama kelamaan menyebabkan erosi pondasi di bawah pelat. Akibat dari erosi adalah hilangnya dukungan tanah terhadap pelat di sekitar joint yang dapat menyebabkan pelat mengalami tegangan yang sangat besar ketika dilewati kendaraan (lihat ilustrasi pada Gambar 37).

Model dari mekanisme pumping sudah dikembangkan oleh Darter et. al., 1985 [...] untuk JRCF. Persamaan yang dapat digunakan untuk memprediksi pumping adalah:

$$PI = (A_{eq})^{0.85} \left[0.0025 + 0.0002(100 - 54)^2 - 0.0001 - 0.1188 + 0.0004p^{0.85} + 0.0001(SI + 7)^{0.85} \right]$$

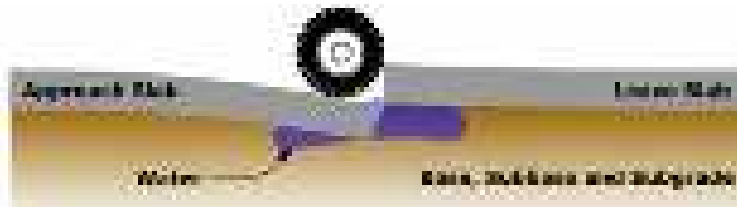
PI : indeks pumping, skala 0-3 (0 tidak ada pumping, 1 low severity pumping, 2 medium severity pumping, dan 3 high severity pumping).

S : tipe tanah subgrade berdasarkan klasifikasi AASHTO.

p : presipitasi annual hujan (cm).

H : tebal pelat (cm)

FI : indeks freezing (derajat-hari)



Gambar 37 Ilustrasi erosi pumping di sekitar joint

2.8.5.4.2 Faulting

Faulting adalah perbedaan elevasi antara pelat perkerasan yang bersebelahan yang dipisahkan oleh joint. Faulting terjadi akibat erosi material pondasi di bawah pelat yang bersifat permanen (lihat Gambar 38 sebagai ilustrasi).

$$FI = (A_{eq})^{0.85} \left[0.0025 - 0.0002(100 - 54)^2 + 0.0001 - 0.1188 + 0.0004p^{0.85} + 0.0001(SI + 7)^{0.85} \right]$$

$$= 1.4116 \times 10^{-4} \left(\frac{10^3}{0.304} \right)^{0.85} + 0.7468 \times 10^{-4} (100)^{0.85} - 0.00000007 - 0.0001(7192 + 0.0002(7.1162)^2)$$

FLT : faulting (mm)

ks : modulus reaksi subgrade (N/m²)

Cd : koefisien drainase AASHTO yang dimodifikasi

σb : tegangan kontak pada pondasi (N/m²)

$$FLT = \frac{1}{k_s} \left[\frac{W_{18} (1 + F) S_{18}}{18 \times 10^6} \right] \left[\frac{1}{1 + 0.00015 \times E_{18}} \right] \left[\frac{1}{1 + 0.00015 \times E_{18}} \right] = \frac{54}{2000 \times 18 \times 1 + 15}$$
$$J = \frac{1}{4} \left(\frac{E}{k_s} \right)^{1/4}$$

l : radius kekakuan relatif (mm)

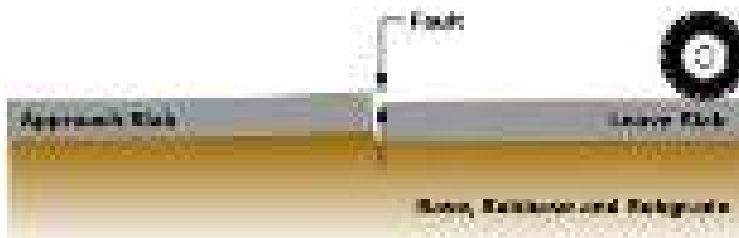
AGE : umur perkerasan (tahun)

JS : jarak joint (m)

BT : 0 untuk base yang tidak distabilisasi, 1 untuk base yang distabilisasi

WL : faktor lebar lajur, 1 untuk lajur yang diperlebar, 0 yang tidak diperlebar

D : diameter dowel (mm)



Gambar 38 Ilustrasi faulting pada joint

2.8.5.4.3 Spalling

Spalling adalah pecah atau lepasnya kepingan beton di tepi joint. Spalling biasanya terjadi sekitar 0,6 m dari joint, baik yang memiliki dowel ataupun tidak. Ilustrasi spalling diberikan pada Gambar 39. Penyebabnya adalah:

- Adanya material diantara joint yang berasal dari erosi pumping atau dari pecahan kerikil dari permukaan perkerasan. Ekspansi pada joint dapat menimbulkan tegangan yang besar pada tepi joint karena adanya material tersebut.
- Mutu concrete yang tidak baik di sekitar joint.
- Kesalahan alinyemen dari dowel akibat korosi.
- Beban kendaraan yang besar.

Spalling dimodelkan dengan:

$$S = \exp\left(\frac{-\gamma_s}{N_s}\right)^{0.5}$$

$$\ln(N_s) = 10.5376 + 0.1137\gamma_s - 0.002009p - 0.1274AGE$$

$$\gamma_s = 0.3447 - 0.516\gamma_c + 0.0000413p - 1.91 \times 10^{-5} AGE$$

S : persentase joint yang mengalami spalling

AGE : umur perkerasan (hari)

H : tebal pelat (cm)

FI : indeks freezing (derajat Fahrenheit-hari)

ft : kuat tarik beton (MPa)



Gambar 39-a Ilustrasi spalling di sekitar joint

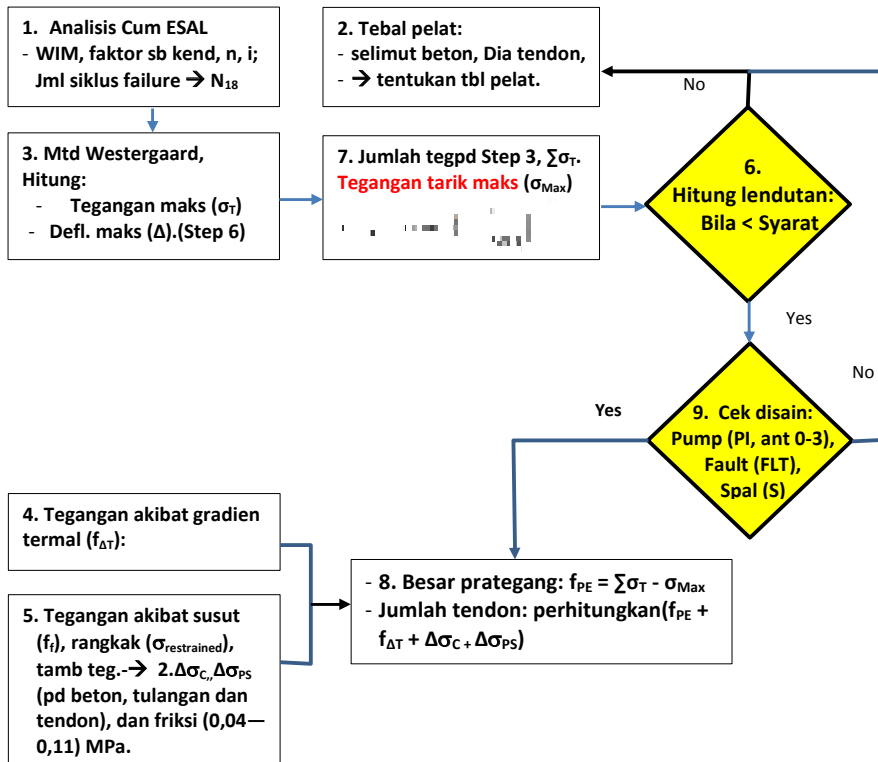
2.8.5.5 Prosedur Perhitungan

Desain PPCP didapat melalui perhitungan besarnya tegangan yang terjadi akibat semua pembebanan dengan memperhatikan kegagalan akibat fatigue. Data beban kendaraan didapat dari pengukuran Weight In Motion (WIM). Langkah-langkah perhitungan adalah sebagai berikut:

1. Data WIM dianalisis untuk klasifikasi jenis/golongan kendaraan. Untuk masing-masing golongan nilai ESAL N_{18} dihitung setelah dikoreksi dengan faktor sumbu roda kendaran lalu nilai kumulatifnya diprediksi sesuai dengan rencana masa layan dari jalan. Nilai kumulatif ESAL kemudian dianggap sebagai jumlah siklus kegagalan akibat fatigue.

2. Tentukan tebal pelat berdasarkan pertimbangan awal bahwa selimut beton setidaknya 3-4 cm. Dengan selimut 3 cm dan diameter tendon, maka paling tidak tebal pelat 15-20 cm.
3. Tegangan akibat beban kendaraan dihitung berdasarkan beban 18 kips (80 kN) sumbu tunggal menggunakan persamaan Westergaard atau dengan metode elemen hingga.
4. Hitung tegangan akibat gradien termal.
5. Hitung tegangan akibat susut dan friksi.
6. Hitung lendutan yang terjadi akibat beban kendaraan. Tebal pelat perlu disesuaikan bila lendutan yang dihasilkan terlalu besar.
7. Jumlahkan tegangan akibat semua pembebanan, dari langkah 1-3. Dari besarnya tegangan total, jumlah siklus kegagalan yang dihitung di langkah 1 dan kriteria fatigue yang digunakan hitung tegangan tarik maksimum yang diperbolehkan.
8. Besarnya tegangan pratekan yang dibutuhkan dihitung dengan mengurangi tegangan total akibat pembebanan dikurangi tegangan tarik maksimum yang diperbolehkan dari langkah 2. Jumlah tendon dihitung berdasarkan besarnya tegangan pratekan setelah memperhitungkan loss atau kehilangan tegangan. Kehilangan tegangan yang utamanya akibat rangkai dan susut dapat dihitung menggunakan metode pendekatan seperti metode *Age Adjusted Effective Modulus* (AAEM).
9. Periksa desain yang ada terhadap permasalahan joint berupa erosi pumping, faulting serta spalling. Pemeriksaan ini juga merupakan upaya mendesain kondisi layan yang menghasilkan kualitas berkendara yang nyaman. Bila batasan erosi pumping, faulting dan spalling terlampaui maka perlu dipertimbangkan upaya-upaya seperti menambah tebal pelat, memperbaiki kekakuan pondasi, meningkatkan mutu beton, menambah jumlah dowel dan tulangan. Upaya ini dapat dilakukan setempat di sekitar joint saja.

Prosedur perhitungan dirangkum dalam bagan alir dalam Gambar 39- a.



Gambar 39- a **Bagan alir perancangan tebal perkerasan beton prategang secara mekanistik**

Berikut ini contoh perhitungan desain PPCP yang lebih lengkap.

2.8.5.5.1 Contoh Perhitungan

a) Desain Berdasarkan Kondisi Fatigue

Contoh perhitungan berikut dilakukan untuk jalan raya jalur Pantai Utara Jawa (Pantura) dan menggunakan beban kendaraan berdasarkan data Weight In Motion (WIM). Tabel 8 memperlihatkan hasil perhitungan berdasarkan Metode *Westergaard* untuk pelat beton dengan tebal $t=200$ mm, beban $P=40$ kN dengan kontak area sebesar 200×200 mm², dan, nilai CBR bervariasi yaitu CBR = 50 %, 25 %, dan 5 %.

Nilai CBR = 50 % diambil untuk melihat perilaku perkerasan beton yang mempunyai Sub-Base berupa Lean Concrete (LCB) dengan tebal 150 mm;

Nilai CBR = 25 % diambil untuk melihat perilaku perkerasan beton yang mempunyai Sub-Base berupa Concrete Treated Base (CTB) dengan tebal 150 mm; sedangkan Nilai CBR = 5 % diambil untuk melihat perilaku perkerasan beton yang tidak mempunyai Sub-Base.

Tabel 8 Hasil Perhitungan Metode Westergaard

	Tegangan Tarik (MPa)			Perubahan Jarak (mm)		
	50%	25%	5%	50%	25%	5%
INTERNAL	1.147	1.338	1.517	0.010	0.011	0.011
EDGE	3.110	0.570	1.810	0.370	0.310	0.500
CORNER	1.400	1.770	1.910	0.604	0.512	1.269

Dari Tabel 8 dapat dilihat bahwa:

- 1) kasus Internal Loading (IL) memberikan tegangan yang paling kecil,
- 2) kasus Edge Loading (EL) memberikan tegangan yang paling besar;
- 3) sedangkan kasus Corner Loading (CL) diantaranya, dan tegangan tarik EL kira-kira dua kali tegangan tarik IL.

Selain itu juga dapat dilihat bahwa tegangan tarik yang terjadi akan mengecil dengan meningkatnya nilai CBR. Walaupun demikian, perubahan tegangan yang terjadi akibat berubahnya nilai CBR tidak besar.

Kecenderungan yang sama juga dapat dilihat pada lendutan yang terjadi, dimana :

- 1) kasus IL memberikan lendutan yang paling kecil,
- 2) kasus EL memberikan lendutan yang paling besar,
- 3) sedangkan kasus CL diantaranya.

Selain itu juga dapat dilihat bahwa lendutan yang terjadi mengecil dengan meningkatnya nilai CBR. Berbeda dengan kasus untuk tegangan, lendutan yang terjadi pada EL maupun CL untuk nilai CBR = 5 % mempunyai harga hampir 2 kali lipat dibandingkan dengan lendutan dengan nilai CBR 50 %. Hasil ini memperlihatkan bahwa dengan memberikan Sub-Base berupa LCB dengan tebal 150 mm akan membuat perkerasan lebih kaku sehingga akan mengurangi lendutan yang terjadi dan karena itu akan memperkecil kemungkinan terjadinya pumping. Dari Tabel 1 juga dapat dilihat bahwa

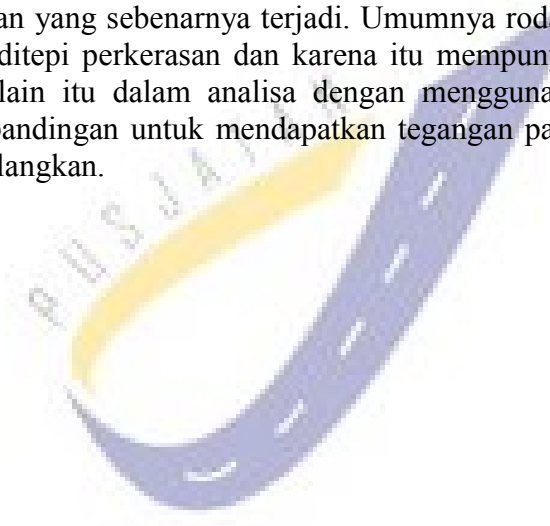
perubahan nilai CBR tidak akan menyebabkan perubahan lendutan yang berarti pada kasus pembebanan IL.

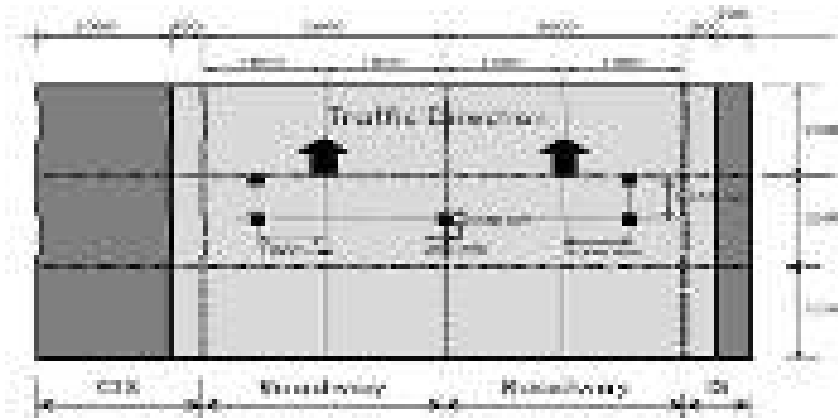
Mengingat beban kendaraan yang melalui jalur Pantura merupakan beban yang sangat berat, maka pada contoh ini akan digunakan PPCP dengan tebal 200 mm dan LCB dengan tebal 150 mm.

Pada perhitungan dengan menggunakan EverFE, hanya 3 panel PPCP yang dimodelkan masing-masing berukuran lebar $2 \times 4,100$ mm, panjang $3 \times 2,500$ mm dan tebal 200 mm, terbuat dari beton dengan mutu K-400; serta Outer Shoulder (OS) dan Inner Shoulder (IS) dengan lebar 2000 mm dan 500 mm, terbuat dari beton dengan mutu K-250 seperti terlihat pada . Dalam pemodelan, diasumsikan bahwa panel-panel dihubungkan dengan dowel dengan spasi 480 mm dan luas 140 mm^2 dimana Load Transfer Efisiensi diasumsikan sebesar 100 % karena adanya strand yang dipasang dalam arah longitudinal.

Sedangkan panel dengan OS maupun IS dihubungkan dengan Tie-bar dengan spasi 680 mm dan luas 98 mm^2 serta Load Transfer Efisiensi sebesar 100 %. Dari Gambar 1 juga dapat dilihat bahwa lebar lajur rencana adalah 2×3600 mm; dan karena itu akan diperoleh lebar OS dan IS aktual sebesar 2500 mm dan 1000 mm. Juga dapat dilihat bahwa dengan mengasumsikan jalur roda berada 1000 mm dari sumbu lajur, maka roda mempunyai jarak sebesar 1300 mm dari tepi perkerasan, baik untuk kasus EL maupun untuk kasus CL.

Penempatan jalur roda seperti disebut diatas adalah untuk memodelkan beban kendaraan yang sebenarnya terjadi. Umumnya roda kendaraan sangat jarang berada ditepi perkerasan dan karena itu mempunyai offset terhadap tepi panel. Selain itu dalam analisa dengan menggunakan EverFE, juga dilakukan perbandingan untuk mendapatkan tegangan pada perkerasan jika OS dan IS dihilangkan.





Gambar 40 Pemodelan posisi interior, edge, dan corner loading

Berikut ini akan disampaikan perbandingan hasil hitungan Westergaard dengan hasil hitungan EverFE. Tabel 2 memperlihatkan tegangan tarik hasil perhitungan berdasarkan Metode Westergaard dan EverFE untuk pelat beton dengan tebal $t = 200 \text{ mm}$, beban $P = 40 \text{ kN}$ dengan luas kontak area sebesar $200 \times 200 \text{ mm}^2$, dimana nilai CBR bervariasi yaitu $\text{CBR} = 50 \%$, 25% dan 5% .

Tabel 9 Perbandingan Tegangan (MPa) Westergaard vs EverFE

CBR		Westergaard			EverFE		
		50 %	25 %	5 %	50 %	25 %	5 %
Interior Loading		1,03	1,71	1,08	1,03	1,08	1,16
	Shoulder				1,15	1,21	1,33
Edge Loading	Shoulder	2,48	2,15	2,06	1,15	1,22	1,33
	Edge				1,34	1,41	1,53
Corner Loading	Shoulder				1,34	1,41	1,53
	Edge	1,68	1,22	1,01	1,07	1,13	1,21

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa:

1. Serupa seperti Metode Westergaard, hasil perhitungan EverFE memberikan tegangan tarik yang paling kecil untuk kasus IL.
2. Berbeda dengan Metode Westergaard, hasil perhitungan EverFE memberikan tegangan tarik yang paling besar untuk kasus CL, sedangkan tegangan tarik EL diantaranya.
3. Tegangan tarik IL dan EL hasil perhitungan EverFE tidak jauh berbeda.

4. Sama seperti Metode Westergaard, hasil perhitungan EverFE memperlihatkan bahwa tegangan tarik yang terjadi akan bertambah besar sesuai dengan bertambah kecilnya nilai CBR. Walaupun demikian perubahan tegangan yang terjadi tidak besar.
5. Tegangan tarik IL maupun CL hasil perhitungan Metode Westergaard dan EverFE tidak jauh berbeda.
6. Adanya shoulder akan menyebabkan berkurangnya tegangan tarik yang terjadi untuk semua kasus pembebanan.

Untuk perhitungan EverFE, posisi roda mempunyai jarak yang cukup jauh yaitu sebesar 1300 mm dari tepi perkerasan, baik untuk kasus EL maupun untuk kasus CL. Karena itu tidak mengherankan jika tegangan yang terjadi untuk kasus EL maupun kasus CL tidak jauh berbeda dengan tegangan tarik IL karena posisi roda cukup jauh dari tepi perkerasan.

Tabel 10 memperlihatkan tegangan tarik hasil perhitungan Metode Westergaard dan EverFE untuk kasus EL, dimana posisi roda untuk Metode Westergaard maupun EverFE sama-sama dikerjakan tepat ditepi pelat.

Tabel 10 Perbandingan Tegangan (MPa) : Westergaard vs EverFE (Flush Loading)

CBR	Westergaard			EverFE		
	50%	25%	5%	50%	25%	5%
Edge Loading	3.44	3.59	3.84	3.09	3.17	3.41

Dari Tabel 10 dapat dilihat bahwa: 1) serupa seperti Metode Westergaard, hasil perhitungan EverFE memberikan tegangan tarik yang paling besar untuk kasus EL, sedangkan tegangantarik CL diantaranya, dan 2) tegangan tarik EL hasil perhitungan Metode Westergaard dan EverFE tidak jauh berbeda.

Hasil perhitungan di atas memperlihatkan bahwa:

1. Hasil perhitungan dengan EverFE selalu menghasilkan tegangan tarik yang lebih kecil dibandingkan dengan tegangan tarik Westergaard. Hal ini terjadi karena pondasi bisa menyalurkan gaya geser dan karena itu pada EverFE akan diperoleh luas bidang kontak yang lebih luas dibandingkan dengan Metode Westergaard.

2. Kita akan mendapatkan umur perkerasan yang lebih lama dengan memberikan lebar lajur yang besar dan dengan menambah shoulder di masing-masing tepi lajur karena kedua hal ini akan menyebabkan tegangan tarik yang lebih kecil pada perkerasan. Perencanaan perkerasan di Jerman mensyaratkan bahwa lebar perkerasan ditambah minimal 0.5 meter diluar traffic lane untuk mereduksi tegangan yang terjadi akibat Edge Loading [Hansen, 2007].
3. Untuk kondisi normal dimana beban roda selalu mempunyai offset terhadap tepi perkerasan, maka CL akan memberikan tegangan tarik yang terbesar.

Perlu disampaikan bahwa formula tebal perkerasan beton dari AASHTO menggunakan persamaan Spangler untuk kasus CL. Persamaan Spangler memberikan tegangan tarik maksimum yang terjadi pada suatu perkerasan dengan ketebalan tertentu akibat beban roda, *Young's Modulus* dan *Poisson's Ratio* dari beton, *Modulus of Subgrade Reaction* k_s dan *Load Transfer Efisiensi* dari Joint.

Kecenderungan yang sama juga dapat dilihat pada lendutan yang terjadi seperti terlihat pada Tabel 11, yaitu bahwa:

- 1) kasus IL memberikan lendutan yang paling kecil,
- 2) kasus EL memberikan lendutan yang paling besar,
- 3) sedangkan kasus CL diantaranya.

Selain itu juga dapat dilihat bahwa lendutan yang terjadi mengecil dengan meningkatnya nilai CBR.

Berbeda dengan kasus untuk tegangan, lendutan yang terjadi pada EL maupun CL untuk nilai CBR = 5 % mempunyai harga hampir 2 kali lipat dibandingkan dengan lendutan dengan nilai CBR 50 %. Hasil ini memperlihatkan bahwa dengan memberikan base berupa LCB dengan tebal 150 mm akan membuat perkerasan lebih kaku sehingga akan mengurangi kemungkinan terjadinya erosi pada Sub-Base yang dapat menimbulkan terjadinya pumping. Seperti dapat diduga, perubahan nilai CBR tidak akan menyebabkan perubahan lendutan yang berarti pada IL.

Perbandingan hasil analisis defleksi menunjukkan bahwa hasil dari EverFE juga lebih kecil dibandingkan hasil Metode *Westergaard*. Ini disebabkan oleh adanya pengaruh interaksi antara slab dengan base yang mampu dimodelkan oleh EverFE. Sedangkan pemodelan *Westergaard* menganggap bahwa lapisan di bawah slab adalah dense liquid.

Tabel 11 Perbandingan Lendutan (mm) : Westergaard vs EverFE

CBS		Westergaard			EverFE		
		50 %	25 %	5 %	50 %	25 %	5 %
Integral Loading		0.010	0.011	0.011	0.110	0.158	0.275
	Dengan Shoulder				0.124	0.184	0.311
Edge Loading		0.270	0.240	0.153	0.165	0.166	0.290
	Tanpa Shoulder				0.150	0.177	0.247
Corner Loading		0.600	0.612	1.588	0.152	0.204	0.361
	Dengan Shoulder						

Pada contoh ini, perhitungan beban temperatur diambil Temperatur Gradien maksimum sebesar 0,02 °C/mm pada siang hari dan Temperatur Gradien minimum sebesar -0.01 °C/mm pada malam hari. Tabel 12 memperlihatkan perbandingan antara tegangan hasil perhitungan analitis dan hasil perhitungan EverFE untuk beberapa Temperatur Gradien.

Tabel 12 Perbandingan Tegangan Akibat Beban Suhu (MPa):
Analitis vs EverFE

ΔT (°C)	$f_{T, \text{PPC}}$	
	Analitis	EverFE
2	1,26	1,40
0	0,04	0,07
-2	0,42	0,47
-4	0,42	0,44

Dari hasil perhitungan EverFE dapat dilihat bahwa Temperatur Gradien sebesar 0.02 °C/mm pada siang hari ($\Delta_T = 4$ °C) akan memberikan tegangan tarik yang signifikan yaitu sebesar 0.45 MPa.

Dalam Studi ini tebal Pelat PPCP ditentukan sebesar 200 mm dengan menimbang beberapa hal sebagai berikut:

1. Tersedianya mould untuk mencetak panel dengan tebal 200 mm.
2. Meminimalkan Temperatur Gradien karena pelat yang makin tebal akan mempunyai temperatur gradien yang lebih besar. Untuk tebal pelat sebesar 200 mm, gradient temperatur yang direkomendasikan adalah sebesar 0.02 °C/mm atau $\Delta_T = 4$ °C.

3. Memaksimalkan Kuat Lentur beton karena Kuat Lentur pelat yang makin tebal akan makin kecil. Berdasarkan NEN-6720 dan Eurocode 2, dapat dilihat bahwa Kuat Lentur merupakan fungsi dari ketebalan pelat, yaitu:

$$f_{l,t,d} = 1,083 \times \frac{1600 - h}{1000} \left[0,5 + 0,05(f_{c,d} + 8) \right]$$

Tabel 13 memperlihatkan Kuat Lentur Beton untuk berbagai mutu dan tebal pelat beton berdasarkan NEN-6720. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa beton yang lebih tebal akan memiliki Kuat Tarik Lentur MOR yang lebih kecil.

Tabel 13 Properti Beton Berdasarkan Kuat Tekan

Property	Concrete quality		
	C20/25 (25)	C25/30 (30)	C30/35 (35)
Characteristic cube compressive strength after 28 days for loading of short duration, $f_{c,d}$ (N/mm ²)	32	42	52
Mean value compressive strength after 28 days for loading of short duration, f_{cm} (N/mm ²)	43	53	63
Mean tensile strength after 28 days for loading of short duration, $f_{ct,d}$ (N/mm ²)	3,47	4,67	4,95
Mean tensile flexure strength after 28 days for loading of short duration, f_{ctm} (N/mm ²)			
Concrete modulus of elasticity, E_c (N/mm ²)	29,82	30,89	31,89
Density (ρ_{con})	h = 210 mm	2305	2320
	h = 240 mm	2371	2345
	h = 270 mm	2407	2371
Modulus of elasticity, E_c (N/mm ²)	29,82	30,89	31,89
Density (ρ_{con})	2305 - 2420		
Moisture ratio, w	0,10 - 0,10		
Coefficient of linear thermal expansion, α (1/°C)	1,10 ⁻⁵ - 1,2,10 ⁻⁵		
Non-shrinkage, ϵ_{ns}			

Tabel 14 memperlihatkan bahwa tegangan tarik akibat friksi yang terjadi pada PPCP adalah sebesar 0,38 MPa, hampir sama besar dengan tegangan tarik akibat temperatur. Sebagai pembandingan, juga dilakukan perhitungan tegangan friksi pada perkerasan konvensional (JPCP) dengan panjang 5 m, 10 m, dan 15 m. Dapat dilihat bahwa tegangan friksi pada JPCP cukup

signifikan karena dapat menyebabkan terjadinya *Early-Age Crack* pada beton.

Tabel 14 Tegangan Friksi pada JPCP dan PPCP

PAVEMENT TYPE	Length [m]	Frictional Stress [MPa]
JPCP	5.00	0.04
	10.00	0.07
	15.00	0.11
PPCP	100.00	0.30

Ringkasan perhitungan

1. Tabel 14 memperlihatkan perhitungan ESAL Number N_{18} berdasarkan data WIM untuk jalur Pantura. Untuk Design Life 20 tahun dan growth rate 1 % diperoleh $N_{18} = 509,000,000$.
2. Berdasarkan persamaan fatigue model yang dikembangkan oleh Vesic yaitu:

$$\log N = \log 22,500 - 4 \log \left(\frac{\sigma_T}{3,000} \right) \text{ atau } \sigma_T = 3,000 \times \left(\frac{N}{22,500} \right)^{-0.25}$$
 , maka akan diperoleh Tegangan Tarik Siklik Maksimum σ_T sebesar 0.37 MPa jika kita menggunakan beton dengan mutu K-400 (MOR = 4.5 MPa). Perlu disampaikan bahwa pada studi ini σ_T dihitung menggunakan pemodelan dari Vesic karena model ini mempunyai damage factor sama seperti AASHTO yaitu eksponensial 4. Jika diinginkan, Model Darter atau model kegagalan fatigue lainnya dapat digunakan.
3. Tabel 15 memperlihatkan Tegangan Prestress Effective f_{pe} dan Tegangan Jacking Prestress f_{pj} yang dibutuhkan. Mengingat terbatasnya ruang pembahasan maka perhitungan untuk mendapatkan Δf_{pe} akan disampaikan pada suatu makalah tersendiri.

Tabel 15 Tegangan Prestress Effective dan Jacking Stress yang dibutuhkan (MPa)

Shoulder Type	WIM Loading (MPa)	Tinggi Gradasi (MPa)	Nilai Perata (MPa)	Alas Teras (MPa)	Effective Strength (MPa)	Loading Stress (MPa)
with shoulder	1.34	0.45	0.38	0.07	1.81	2.26
without shoulder	1.47	0.45	0.38	0.07	1.96	2.43

4. Jika : $A_{panel} = 8200 \times 200 \text{ mm}^2$, $A_{strand} = 140 \text{ mm}^2$, $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$, maka jumlah strand yang dibutuhkan adalah:

Shoulder Type	Jumlah Strand
with Shoulder	18
without Shoulder	20

2.8.5.5.2 Perhitungan N18 Berdasarkan Data WIM

Perhitungan nilai ESAL N18 berdasarkan data Weight In Motion (WIM) untuk jalur Pantai Utara Jawa (Pantura) dapat dilihat pada

Tabel 16 di bawah.

Tabel 16 Perhitungan Nilai ESAL N₁₈ Jalur Pantura

No. Item	Ekuivalen	Jenis Beban	VBR	VBR	Jarak Perantara	ESAL	ESAL (N18)		
							ESAL	ESAL	ESAL
4	12	2.01	1.14	1.807	0.04500	1.811.883	16.948271	81.078282	171.008184
		0.71							
5	1.32	0.84	0.31	1.610	0.04500	1.837.384	11.007.879	91.110.628	78.1347.093
		18.33							
6	1.20	0.88	0.88	1.9	0.04500	1.770.000	8.940.000	11.100.000	81.760.134
		20.20							
9	1.20	0.11	0.11	1.84	0.04500	1.809.000	11.100.000	10.100.179	181.907.047
		18.42							
		73.48							
11	1.20	0.71	0.11	1.84	0.04500	1.809.000	10.000.000	10.100.179	181.907.047
		20.00							
		10.00							
						$\Sigma ESAL$	64.000.000	1.000.000.000	480.000.000
						$\Sigma ESAL$	17.100.483	1.07.004.079	241.000.476

2.8.5.5.3 Kriteria Fatigue

Sudah banyak percobaan yang dilakukan pada balok atau pelat beton yang mengalami pembebanan yang mengakibatkan tegangan tarik siklik σ_T untuk mengestimasi jumlah siklus kegagalan N (*Number of Cycles to Failure*). Beberapa model kriteria fatigue yang telah dikembangkan adalah sebagai berikut:

- *Portland Cement Association (PCA)*

$$\frac{\sigma_T}{f_{cm}} = 0.45 - 0.0001825 N^{0.25} \quad \text{for } N \leq 1000$$

$$\frac{\sigma_T}{f_{cm}} = 0.45 - 0.0001825 \left(\frac{N}{1000} \right)^{0.25} \quad \text{for } N > 1000$$

$$\frac{\sigma_T}{f_{cm}} = 0.45 - 0.0001825 N^{0.25} \quad \text{for } N \leq 1000$$

$$\frac{\sigma_T}{f_{cm}} = 0.45 - 0.0001825 \left(\frac{N}{1000} \right)^{0.25} \quad \text{for } N > 1000$$

$$\frac{\sigma_T}{f_{cm}} = 0.45 - 0.0001825 N^{0.25} \quad \text{for } N \leq 1000$$

$$\frac{\sigma_T}{f_{cm}} = 0.45 - 0.0001825 \left(\frac{N}{1000} \right)^{0.25} \quad \text{for } N > 1000$$

- AASHTO dan Shi et al.

AASHTO dan Shi memberikan estimasi harga N berdasarkan beberapa nilai Probability of Failure seperti terlihat pada Tabel 17.

Tabel 17 Persamaan Fatigue Berdasarkan AASHTO dan Shi et. al.

EQUATION	Probability of Failure		
	30%	20%	5%
AASHTO	$233(\log \sigma_T)^{-0.41184}$	$189(\log \sigma_T)^{-0.41184}$	$143(\log \sigma_T)^{-0.41184}$
Shi et al	$103.8 \sigma_T^{-0.000022}$	$100.7 \sigma_T^{-0.000022}$	$96.1 \sigma_T^{-0.000022}$

Gambar 41 memperlihatkan plot (σ_T/MOR) vs $N_{failure}$ berdasarkan Model Kegagalan Fatigue diatas. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa persamaan empiris yang dikeluarkan AASHTO berbeda dengan persamaan yang diperoleh berdasarkan hasil percobaan di laboratorium. Hal ini terjadi

dilakukan rekayasa material untuk perkerasan yang direncanakan dengan ESAL Number yang sangat besar agar diperoleh perkerasan yang optimum.

Berdasarkan perbandingan persamaan kegagalan fatigue maka diperoleh beberapa kesimpulan seperti berikut ini:

- a) Persamaan fatigue AASHTO lebih konservatif dan menghasilkan umur layan perkerasan yang lebih pendek. Ini terjadi karena adanya kalibrasi terhadap hasil AASHO Road Test dalam menentukan tebal perkerasan. Perlu dicatat bahwa beban temperatur tidak ditinjau secara eksplisit dalam persamaan tebal perkerasan AASHTO.
- b) Persamaan PCA merupakan persamaan yang juga konservatif, karena persamaan ini mengasumsikan 5% probabilitas terjadinya retak.

Persamaan lainnya, yang tidak dikalibrasikan terhadap kondisi lapangan, memiliki umur layan perkerasan yang lebih panjang.

Model dari PCA, Darter, dan AASHTO mengasumsikan bahwa tegangan minimum yang terjadi adalah nol. Ini dapat berlaku ketika kondisi tegangan yang terjadi hanya diakibatkan oleh beban kendaraan saja. Tetapi tegangan yang terjadi pada permukaan perkerasan umumnya diakibatkan oleh temperatur dan karena itu tegangan minimum tidak akan pernah sama dengan nol. Konsekwensi dari asumsi ini adalah persamaan ini akan memprediksi umur layan perkerasan yang lebih singkat dibandingkan dengan kondisi aktual.

2.8.5.5.4 Perhitungan Susut dan Age Adjusted Effective Modulus (AAEM)

a) Regangan Susut dengan CEB-90

Regangan susut ϵ_{cs} pada beton dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan di bawah.

$$\epsilon_{cs}(t, t_1) = \epsilon_{cs} B_s (t - t_1)$$

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cs}(f_{cm}) \beta_{RH}$$

$$\epsilon_{cs}(f_{cm}) = \left[160 + 100 \left(0 - \frac{f_{cm}}{f_{cm}} \right) \right] \times 10^{-6}$$

$$\beta_{RH} = -1.90 \left[1 - (RH)^{0.01} \right], \quad 40\% \leq RH \leq 85\%$$

$$\beta_{RH} = 0.28, \quad RH \geq 90\%$$

$$B_s(t - t_1) = \left[\frac{(t - t_1) / t_1}{3800 (\Delta t / t_1)^2 + (t - t_1) / t_1} \right]^{0.01}$$

b) Koefisien Rangkap $\phi(t, t_0)$ dengan CEB-90

Age Adjusted Effective Modulus (AAEM) $E_c'(t, t_0)$ diekspresikan sebagai:

$$E_c'(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \phi(t, t_0) \cdot \phi(t, t_0)}$$

Koefisien rangkap beton $\phi(t, t_0)$ dapat dihitung menggunakan persamaan di berikut.

$$\begin{aligned} \phi(t, t_0) &= \eta_m R_c (1 - \chi) \\ \eta_m &= \eta_{sm} F(t, t_0) F(\chi) \\ \eta_{sm} &= 1 + \frac{t - t_0}{Q + (t - t_0)^n} \\ F(t, t_0) &= \left(\frac{t - t_0}{Q + (t - t_0)^n} \right)^m \\ F(\chi) &= \frac{1}{1 + \beta_1 \chi + \beta_2 \chi^2} \\ \eta &= 28.7 \chi \\ E_c(t, t_0) &= \left[\frac{E_c(t_0) (1 - \chi)}{1 + \beta_1 \chi + \beta_2 \chi^2} \right]^n \\ E_c &= 180 \left[1 + \left(t - \frac{7M}{100} \right)^{0.2} \right] \frac{1}{L_c} \quad (M \leq 1400) \end{aligned}$$

c) Koefisien Aging $\chi(t, t_0)$

Koefisien aging $\chi(t, t_0)$ dapat dihitung dari tabel korelasi aging koefisien terhadap koefisien creep rekomendasi Bazant. Koefisien tersebut dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18 *Aging Coefficient $\chi(t, t_0)$ menurut Bazant*

$t - t_0$	$\phi(t, t_0)$	Maturity			
		$t_0 = 1E$	$t_0 = 10E$	$t_0 = 100E$	$t_0 = 10^4$
10^4 hari	1.1	0.461	0.631	0.916	0.991
	1.5	0.791	0.914	0.968	0.972
	2.0	0.776	0.948	0.972	0.976
	3.3	0.805	0.955	0.977	0.980

2.9 American Concrete Institute (ACI)

2.9.1 Komponen rancangan tebal perkerasan beton prategang

Parameter perancangan tebal perkerasan beton prategang yang direkomendasikan ACI 325 didasarkan atas persamaan *Sargious*, 1975, sebagai berikut:

$$(f_t + f_p) > (f_{(c+w)} + f_F + f_L) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

f_p = tegangan tekan beton akibat prategang.

f_t = tegangan fleksural beton ijin = (*modulus of rupture*, MR)/(faktor keamanan, FS),

$f_{(c+w)}$ = tegangan fleksural kritis akibat *curling* dan *warping*,

f_F = tegangan tarik kritis akibat friksi tanah dasar.

f_L = tegangan fleksural ijin akibat beban lalu lintas.

Modulus of Rupture diuji dengan *the third point loading*, sesuai dengan SNI 03-2823. Faktor keamanan (FS) antara 1,5 dan 2,0 untuk jalan raya, dan antara 1,4 dan 1,75 untuk lapangan terbang. Lokasi paling kritis dalam analisis adalah pada penampang bawah dan tepi slab akibat tingginya tegangan tarik akibat friksi dan beban, serta lokasi pada permukaan atas beton akibat *curling* dan *warping*. Akibat friksi tegangan tarik maksimum, maka prategang di setiap penampang pada perkerasan harus minimum 100 psi (690 kPa).

2.9.2 Persyaratan Tebal Perkerasan

Penggunaan konsep ini dapat menghasilkan tebal slab yang lebih tipis dari pada cara konvensional untuk beban dan kondisi tanah dasar yang sama. Namun demikian defleksi yang terjadi pada slab harus dicek untuk mencegah defleksi yang berlebihan. Komisi ACI 325 memberi rekomendasi sebagai berikut:

- Tanah dasar atau pondasi bawah harus mempunyai modulus reaksi tanah dasar k minimum 300 pci ($81,6 \text{ MN/m}^3$) atau CBR 30% (Austroad, 1992). Bila nilai k lebih rendah, maka untuk sistem perkerasan jalan harus menggunakan bahan yang tidak mudah tererosi.
- Tebal minimum perkerasan beton pra-tegang untuk jalan raya adalah 0,65 tebal beton konvensional untuk jalan raya, sedangkan untuk lapangan terbang, 0,60.
- Defleksi pada tepi slab di bawah beban rencana maksimum 0,75 mm untuk jalan raya dan 1,25 mm untuk lapangan terbang.

2.9.3 Koefisien Termal dan Friksi dalam Siklus Perubahan Panjang

Perubahan panjang perkerasan beton tergantung pada perbedaan temperatur dalam beton, pemuaian beton selama cuaca dingin karena perubahan kadar air, serta tahanan gesek karena friksi dengan tanah dasar.

Koefisien termal pada agregat kasar yang mengandung batu kapur sampai batu silika bervariasi dari $(4,5 \times 10^{-6} - 11,7 \times 10^{-6}) / ^\circ\text{C}$ ($2,5 \times 10^{-6} - 6,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$). Koefisien termal beton semen tergantung pada umur, temperatur, dan kadar air. Makin sedikit kadar semen, maka koefisien termal lebih besar. Koefisien termal minimum beton dengan batu kapur $5,4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ($3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$) dan dengan batu silika $10,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ($6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$). Pada musim panas masing-masing meningkat menjadi $7,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ($4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$) dan $13,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ($7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$).

Koefisien friksi tidak berpengaruh banyak pada gerakan slab akibat temperatur, tetapi friksi akibat tegangan berperan besar pada pemertamaan slab beton panjang yang tidak tergantung pada besarnya pemertangan.

Batas friksi pada permukaan beton dapat dirangsang sebesar 0,5 untuk panjang beton pemertangan maksimum 100 meter menggunakan dua lapis plastik di atas permukaan yang padat dan rata.

Di negara beriklim dingin, retak pada beton terjadi bervariasi. Di Dallas, menurut Friberg dan Panko, 1973, retak terjadi pada fluktuasi temperatur antara 14°C sampai minus 9°C .

2.B.4 Pemertaman Perubahan Panjang Beton Pemertang

Berikut ini simbol-konvensi perhitungan pemertaman panjang dan rumus-rumus yang digunakan.

2.B.4.1 Data Perencanaan Beton

- Tebal Slab, in. : t
- Panjang Slab, ft. : L
- Berat volume beton, lb/ft³ : G
- Modulus elastis beton, psi : E_c

2.B.4.2 Perubahan Panjang pada $> 37^\circ\text{C}$ (80°F)

- Temp. Permukaan Maksimum $^\circ\text{F}$: T_{max}
- Koefisien Termal $> 80^\circ\text{F}$; in/ $^\circ\text{F}$: α_{max}
- Koef. Friksi : C_{max}
- Gradien temperatur $> 80^\circ\text{F}$; $^\circ\text{F/in}$: T_{grad}

Temperatur rata-rata $> 80^\circ\text{F}$:

$$T_{\text{rata-rata}} = T_{\text{max}} - (0,6_{\text{max}} \times T_{\text{grad}}) / 2$$

Mulai tak-terkendali (assumed) in.:

$$E_{\text{maks}} = (T_{\text{rata-rata}} - 80) \times \alpha_{\text{max}} \times (L \times 12)$$

Tegangan friksi, tegangan bentang, psi:

$$S_{\text{friksi}} = (C_{\text{max}} \times 1/2 \times 1 \times 0,2 \times 10^6) / 12 \times t$$

Kekangan awal di setiap tepi, in.:

$$E_{\text{maks}} = [(S_{\text{maks}}/2) - (L \times 12/2)] / E_c$$

Muai penuh seluruh panjang; in:

$$EX_{Full>80F} = EX_{UR>80F} - (2 \times EX_{R-Edge})$$

2.9.4.3 Perubahan panjang pada $< -7^{\circ}C$ ($<20^{\circ}F$)

Temp permukaan Min. Rata-rata; $^{\circ}F: T_{S-Min}$

Koefisien Termal $<20^{\circ}F$; in/ $^{\circ}F$: $e_{<20F}$

Koef Friksi pada temp $< 20^{\circ}F$: $C_{f<20}$

Gradient temp $<20^{\circ}F$; $^{\circ}F/in$: $T_{G-<20F}$

Temperatur rata-rata di bawah $20^{\circ}F$:

$$T_{av<20F} = T_{S-Min} - (e_{<20F} \times T_{G-<20F})/2$$

Kontraksi tak-terkendali (*unrestrained*); in. :

$$EX_{UR<20F} = (T_{av<20F} - 20) \times e_{<20F} \times (L \times 12)$$

Tegangan friksi, tengah bentang; psi :

$$S_{Mid} = (C_{f<20} \times L/2 \times 1 \times t/2 \times G)/(12 \times t)$$

Kekangan muai di setiap tepi; in.

$$EX_{R-Edge} = \{(S_{Mid}/2) - (L \times 12/2)\}/E_c$$

Kontraksi penuh seluruh panjang, in. :

$$EX_{R-Full<20F} = EX_{UR<20F} - (2 \times EX_{R-Edge})$$

2.9.4.4 Total Perubahan Panjang pada Temperatur (20 - 80) $^{\circ}F$ atau (- 7 - +27) $^{\circ}C$

Koefisien Termal Rata-rata; in/ $^{\circ}F$: e_{Avg}

Faktor perubahan panjang akibat kelembaban pada (20 - 80) $^{\circ}F$ atau (- 7 - 27) $^{\circ}C$;

in/in : $e_{Ex-Moist}$

Muai antara (20 & 80) $^{\circ}F$ (-7 & 27) $^{\circ}C$; in:

$$EX_{UR-Avg} = (T_{R-E>80F} - 20) \times e_{Avg} \times (L \times 12)$$

Pengurangan panjang akibat kelembaban; in:

$$EX_{Moist} = e_{Ex-Moist} \times L \times 12$$

Penyesuaian panjang; in:

$$L_{adj} = EX_{UR-Avg} - EX_{Moist}$$

Muai antara (80-130) $^{\circ}F$ (27-55) $^{\circ}C$; in:

$$EX_{R-Full>80F} = \text{Dari (5)}$$

Kontraksi ant. (- 20 & +20) $^{\circ}F$ (-29 & -7) $^{\circ}C$; in:

$$EX_{R-Full<20F} = \text{Dari (10)}$$

Total perubahan panjang Tahunan; in:

$$EX_{Tot-Ann} = L_{Adj} + EX_{R-Full>80F} + EX_{R-Full<20F}$$

Contoh perhitungan perubahan panjang di daerah beriklim sub-tropis dan iklim tropis disajikan dalam Tabel 21 dan Tabel 22.

2.9.5 Langkah Perhitungan

- a. Asumsi tebal panel sebesar minimum 0,65 kali untuk jalan raya dan 0,6 kali untuk bandara terhadap beton konvensional.
- b. Panjang perkerasan beton prategang antara 90 m dan 180 m. Untuk daerah panas disarankan lebih pendek.
- c. Tegangan tarik:
Di permukaan slab (arah melintang):
 - 1) Hitung $f_{(c+w)}$ atau tegangan fleksural kritis akibat curling dan warping, (Lihat Tabel 19)
 - 2) Hitung f_F atau tegangan tarik kritis akibat friksi tanah dasar. (Lihat Tabel 19). Untuk iklim tropis seperti di Indonesia, faktor dalam Tabel 19 dapat menggunakan kondisi musim panas.
 - 3) Hitung f_L = tegangan fleksural ijin akibat beban lalu lintas. (Gambar 42)Di bawah slab (arah memanjang):
 - 1) Hitung $f_{(c+w)}$ atau tegangan fleksural kritis akibat curling dan warping, (Lihat Tabel 20)
 - 2) Hitung f_F atau tegangan tarik kritis akibat friksi tanah dasar. (Tabel 19)
 - 3) Hitung f_L = tegangan fleksural ijin akibat beban lalu lintas. (Gambar 42)Ambil nilai tegangan tarik terbesar, di permukaan atau di bawah slab.
- d. Tetapkan faktor keamanan. Jalan raya utama gunakan 2,0, jalan raya sekunder 1,5, dan bandara 1,75 (*taxi ways* dan ujung *runways*), dan 1,40 untuk daerah tidak kritis (*runways interior*).
- e. Tentukan tegangan fleksural beton ijin:
 $f_t = MR/FS$.
MR dapat diestimasi dengan rumus $MR = 9\sqrt{f'_c}$
 f'_c : kuat tekan beton setelah 28 hari dalam satuan psi, atau
 $MR = 0,75\sqrt{f'_c}$
 f'_c : kuat tekan beton setelah 28 hari dalam satuan MPa.
- f. Cek bahwa prategang pada penampang perkerasan akibat friksi tegangan tarik f_F adalah berlebih (*exceeds*) minimum 100 psi (690 kPa): $(f_F + 100) < f_P$
- g. Gunakan rumus (1): $(f_t + f_P) > (f_{(c+w)} + f_F + f_L)$ untuk menghitung f_P .
Jika $f_P > 650$ psi (4485 kPa), tambah ketebalan dan ulangi perhitungan. Batas 650 psi diambil sebagai dasar penetapan jarak tendon yang praktis secara ekonomis.
- h. Hitung nilai gaya prategang per unit lebar perkerasan dan tentukan jarak antara strand sesuai dengan kapasitas strand. Strand ditempatkan di bawah setengah-tebal (*center-line*) sejauh $1/12$ tebal panel.

- i. Hitung perubahan panjang slab untuk menentukan lebar celah sambungan, sesuai dengan iklim atau Rumus (2) sampai dengan Rumus (15).
- j. Hitung defleksi vertikal di ujung slab sesuai dengan grafik hubungan antara nilai modulus reaksi tanah dasar *k-Value* dan tebal slab dalam Gambar 42.

Tabel 19. Tegangan Tarik Pada Permukaan Slab *)

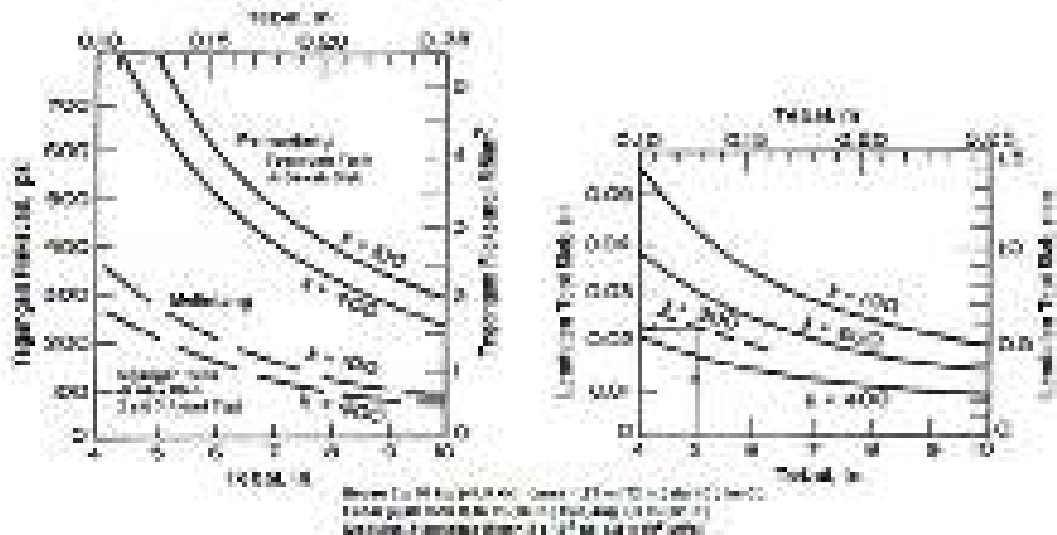
$E = 28.000 \text{ kg/cm}^2$ atau $4 \times 10^6 \text{ psi}$ ($28 \times 10^3 \text{ MPa}$), $k = 300 \text{ pci}$ (82 MN/m^3).

Tipe Tegangan	Musim	Koef Termal Muai e, atau Swelling, w	Termal Gradien $^{\circ}\text{C/cm}$ ($^{\circ}\text{F/in.}$)	Tegangan pada Slab								
				15 cm (6 in.)			20 cm (8 in.)					
				Kg/cm ²	psi	kPa	Kg/cm ²	psi	kPa			
f_c	Curling Malam	Panas	$e = 6 \times 10^{-6}$	0,25 (1)	5,04	72	497	6,72	96	662		
		Dingin	$e = 4 \times 10^{-6}$	0,50 (2)	6,86	98	676	8,96	128	883		
f_w	Warping Awal (1 Bln)	Panas	$w = 250 \times 10^{-6}$		14,7	210	1450	17,5	250	1725		
		Dingin	$w = 100 \times 10^{-6}$		5,74	82	565	7,7	110	759		
	Umur Renc.	Panas	$w = 300 \times 10^{-6}$		14	200	1380	16,8	240	1656		
f_{C+w}	Maks Total	Panas			19,74	282	1932	24,2	346	2380		
		Dingin			12,6	180	1242	12,6	180	238		
Efek Friksi Musim Panas dan Musim Dingin				Tegangan Tarik Pada Permukaan Slab								
f_F	Panjang Slab (m)	Musim	Koef Friksi	Tegangan Friksi			15 cm (6 in.)			20 cm (8 in.)		
				Kg/cm ²	psi	kPa	Kg/cm ²	psi	kPa	Kg/cm ²	psi	kPa
	120	Panas	0,5	7	100	690	26,6	380	2620	31,15	445	3070
		Dingin	0,7	9,8	140	966	22,4	320	2208	26,46	378	2608
	180	Panas	0,5	10,5	150	1035	30,1	430	2967	34,65	495	3415
		Dingin	0,7	14,7	210	1450	27,3	390	2691	31,36	448	3091

*) Faktor untuk kondisi tropis dapat menggunakan kondisi musim panas.

Tabel 20. Batas Tegangan pada Dasar Slab

Musim	Tegangan Batas pada Dasar Slab Tebal						
	15 cm			20 cm			
	Kg/cm ²	psi	kPa	Kg/cm ²	psi	kPa	
f_w Tegangan Warping	Panas,	-23,8	-340	2346	-28	-400	2760
	Dingin,	-14,7	-210	1449	-16,1	-230	1587
	Dingin, UR	-7,7	-110	759	-9,1	-130	897
F_{C+W} : Kombinasi tegangan curling dan warping pada dasar slab	Panas,	-3,5	-50	345	-1,4	-20	138
	Dingin,	-4,9	-70	483	-2,8	-40	276
	Dingin, UR	2,1	30	207	4,2	+60	414



Gambar 42 Tegangan Fleksural Maksimum pada arah Memanjang dan Melintang, dan Lendutan Tepi pada Beban Sumbu 20 kip (90 kN).

2.9.6 Siklus Perubahan Panjang Tahunan pada Perkerasan

2.9.6.1 Di Daerah Sub-Tropis

Data perhitungan perubahan panjang pada siklus tahunan di negara sub-tropis yang mengalami musim panas (*summer*) dan musim dingin (*winter*), meliputi:

- Tebal slab, t ; in.
- Panjang slab, L ; ft.
- Modulus elastisitas beton E_C ; psi.
- Berat volume beton, G ; lb/cf.
- Temperatur permukaan beton maksimum di atas 80°F , $T_{S-\text{Max}}$; $^\circ\text{F}$,
- Temperatur permukaan minimum rata-rata di bawah 20°F , $T_{S-\text{Min}}$; $^\circ\text{F}$,
- Gradien temperatur di atas 80°F , $T_{G>80\text{F}}$; in/ $^\circ\text{F}$.
- Gradien temperatur di bawah 20°F , $T_{G<20\text{F}}$; in/ $^\circ\text{F}$.
- Faktor friksi di atas 27°C (80°F), $C_{F>80\text{F}}$.
- Faktor friksi di bawah 20°F , $C_{F<20\text{F}}$.
- Koefisien termal beton:
 - musim panas $e_{>80\text{F}}$; in/ $^\circ\text{F}$.
 - musim dingin $e_{<20\text{F}}$; in/ $^\circ\text{F}$.

Contoh perhitungan perubahan panjang disajikan dalam Tabel 21. Dalam Gambar 47 diperlihatkan hubungan antara temperatur dan muai-susut panel beton panjang 100 m, tebal 20 cm, pada temperatur minimum rata-rata tetap sebesar minus 20°F (-7°C).

2.9.6.2 Di Daerah Tropis

Untuk daerah tropis seperti di Indonesia, fluktuasi temperatur udara dan temperatur perkerasan beton dengan tebal panel 20 cm ditunjukkan dalam **Error! Reference source not found.** (A.Tatang Dachlan, Balitbang PU 2010). Temperatur terendah sekitar 22°C dan tertinggi 42°C . Perbedaan temperatur efektif terjadinya *curling* atau *warping* secara efektif sekitar 4°C pada siang hari dan 9°C pada petang dan malam hari.

Untuk kondisi di Indonesia, kondisi temperatur di atas 27°C (80°F), parameter yang digunakan dalam Tabel 21 dapat digunakan. Untuk kondisi di bawah temperatur minus 4°C (20°F) tidak pernah

terjadi. Karena itu perhitungan tahap 6 sampai dengan tahap 10 dalam Tabel 21 tidak digunakan, sehingga data untuk perhitungan perubahan panjang perkerasan beton di daerah tropis menjadi terdiri atas:

- a. Tebal slab, t ; in.
- b. Panjang slab, L ; ft.
- c. Modulus elastisitas beton E_C ; psi.
- d. Berat volume beton, G ; lb/cf.
- e. Temperatur permukaan beton maksimum di atas 80°F , $T_{S-\text{Max}}$; $^\circ\text{F}$,
- f. Temperatur permukaan minimum rata-rata di bawah 20°F , $T_{S-\text{Min}}$; $^\circ\text{F}$,
- g. Gradien temperatur di atas 80°F , $T_{G>80\text{F}}$; in/ $^\circ\text{F}$.
- h. Faktor friksi di atas 80°F , $C_{F>80\text{F}}$.
- i. Koefisien termal beton $e_{>80\text{F}}$; in/ $^\circ\text{F}$.

Contoh perhitungan perubahan panjang di daerah tropis (Buntu-Kebumen) disajikan dalam

Tabel 22 dan tipikal fluktuasi temperatur dan muai-susut perkerasan beton disajikan dalam Gambar 47.

2.9.7 Kombinasi Tegangan Kritis Pada Permukaan Atas Slab

Batas tegangan yang menyebabkan tarikan pada permukaan slab adalah batas tegangan curling malam hari dan batas tegangan warping. Dalam Tabel 19 ditunjukkan nilai tegangan tarik pada permukaan slab tebal 0,15 m dan 0,20 m panjang 183 m serta koefisien friksi pada musim panas dan musim dingin. Modulus elastisitas beton 28.000 kg/cm^2 atau 4×10^6 psi (28×10^3 MPa).

2.9.8 Kombinasi Tegangan Kritis Di Bawah Slab

Tegangan warping di bawah slab adalah dalam kondisi tekan, dan besarnya bervariasi dari musim panas ke musim dingin dengan gradien warping 250×10^{-6} sampai 100×10^{-6} , dengan kuat tekan minimum $10,5 \text{ kg/cm}^2$ atau 150 psi (1035 kPa). Kombinasi tegangan batas relatif kecil seperti ditunjukkan dalam Tabel 20. Kontrol tegangan tarik menjadi tekanan yang disebabkan friksi saja dan tertinggi selama musim dingin.

Setelah tegangan akibat friksi yang ada bekerja di tengah slab, maka sisa prategang harus lebih besar atau sama dengan 7 kg/cm^2 atau 100 psi (690 kPa). Nilai ini dipilih dari pengalaman untuk mengurangi atau memperkecil perubahan retak melintang di tengah bentang slab. Artinya tegangan minimum pada ujung slab 240 psi (1656 kPa) untuk panjang slab 120 m, dan 310 psi (2140 kPa) untuk panjang slab 180 m (lihat di bagian bawah Tabel 19). Tegangan akibat friksi di musim dingin 140 psi dan 210 psi, masing-masing untuk panjang slab 400 ft dan 600 ft). Prategang minimum adalah proporsional terhadap panjang slab, Jika koefisien friksi yang ada lebih besar maka tingkat prategang harus dinaikkan lebih tinggi.

2.9.9 Tegangan Akibat Beban Lalu Lintas

Tegangan fleksural pada arah melintang dan memanjang pada slab tebal (10-23) cm (4-9) in. lebar $3,65$ m (12 ft) dengan beban 90 kN (20 kip) beban sumbu tunggal. Grafik dikembangkan menggunakan metoda iterasi *sector analysis* (Friberg 1957). Metoda lainnya dengan *multilayer elastic analysis* atau *finite element approach* mungkin memberikan hasil yang berbeda.

Pada perkerasan jalan dengan lebar lajur normal, tegangan tarik fleksural di bagian atas tepi slab lebih rendah dari pada tegangan tarik di bagian tengah-bawah slab, diuji dengan beban standar 20 kip (90 kN). Untuk tepi perkerasan jalan, lendutan maksimum izin adalah $0,75$ mm ($0,03$ in.), disyaratkan agar lendutan yang terjadi kurang dari $0,75$ mm ($0,03$ in.) dengan modulus reaksi tanah $k = 300$ pci ($81,6 \text{ MN/m}^3$) atau CBR 30% (Austroad, 1992) diperoleh tebal 13 cm (5 in.) sebagai contoh tebal minimum.

Sambungan melintang pada perkerasan beton prategang, diperlukan penyaluran beban efektif untuk mencegah lendutan yang berlebihan.

2.9.10 Kombinasi Tegangan Izin dalam Perkerasan Prategang

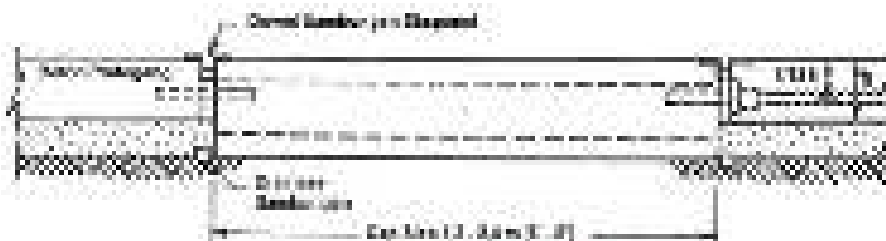
Perhitungan mengindikasikan bahwa retak melintang dalam perkerasan prategang yang panjang kemungkinan kecil, jika slab tidak retak sebelum di-prategang, dan jika friksi tegangan tarik bekerja, maka sisa prategang di tengah slab minimum harus di atas 100 psi (690 kPa). Retak melintang mungkin terjadi akibat salju di daerah sub-tropis. Retak melintang mungkin ditahan prategang selama pelayanan normal, yang menahan paling sedikit sama dengan beban pada sambungan melintang yang dipasang dowel. Prategang yang ada juga bekerja untuk mengurangi efek fatik akibat repetisi beban (Burns and McCullough 1986, ACI 325-7R 88).

2.9.11 Sambungan Perkerasan Beton Prategang

2.9.11.1 Dimensi Perkerasan Beton Prategang

Dimensi perkerasan beton prategang umumnya dirancang dengan panjang 120 m sampai 180 m. Pada sambungan melintang cukup dipasang gap-slab pendek dengan lebar 0,6 m tetapi secara struktural antara 1,8 m dan 2,4 m. *Strand* dipasang sejauh 12,5 mm ($\frac{1}{2}$ in.) di bawah garis eksentrisitas slab agar diperoleh tekanan yang lebih besar di bagian bawah dan mencegah *warping* di ujung slab. Komisi ACI merekomendasikan agar *strand* dipasang dengan jarak $\frac{1}{12}$ x tebal slab di bawah garis eksentrisitas. Bila tebal slab 200 mm maka *strand* dapat dipasang sejauh $\frac{200}{12} + \frac{200}{12} = 117$ mm dari permukaan slab.

Panjang strand (7 untaian kawat baja) mempunyai elongasi sekitar 0,75 m/100 m (9 in/100 ft) atau 0,75% untuk penarikan penuh 80% kuat tarik ultimit baja 270.000 psi (1850 MPa). Bila gap-slab digunakan, harus dibiarkan beberapa waktu setelah penegangan penuh agar terjadi pemendekan akibat pengeringan, susut, dan *creep* (akibat kompresi prategang), serta mengurangi lebar celah sambungan ekspansi. Setelah sambungan muai dipasang, maka gap slab dicor. Gap slab dapat digunakan dengan sistem sambungan ganda seperti dalam Gambar 43 dan sambungan tunggal dalam Gambar 44.



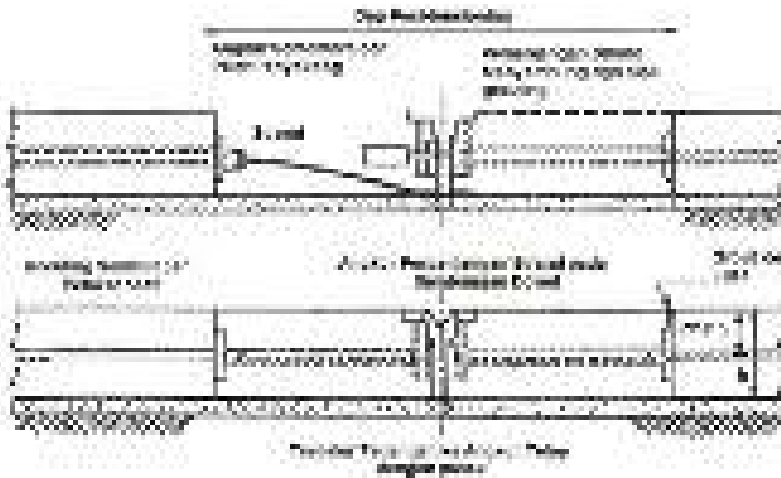
Gambar 43 Sambungan Ganda pada Kontruksi Perkerasan Prategang. Gap-slab ditempatkan setelah Post-Tensioning Slab Utama Selesai

2.9.11.2 Pelaksanaan Sambungan Ganda

Dua sambungan ekspansi dapat dilakukan pada *gap-slab* yang menghubungkan antara dua slab prategang yang panjang. *Gap-slab* pada umumnya diperkuat dengan tulangan baja tetapi tidak dilakukan prategang sehingga harus lebih tebal dari pada slab prategang. Perhitungan tebal *gap-slab* sesuai dengan cara konvensional. Kedua sambungan ekspansi harus dipasang dowel yang cukup dengan diameter dan jarak yang sesuai dengan perhitungan konvensional. Penggunaan dowel akan dapat mengurangi kebutuhan landasan slab (*sleeper*) di ujung slab dan bawah gap-slab. Landasan slab diletakkan untuk mendukung ujung slab prategang dan kedua gap-slab, serta menyediakan kontinuitas pada sambungan melintang. Lihat Gambar 43.

Dengan sambungan ganda pada sambungan muai di setiap ujung gap-slab pendek lebih baik dari pada sambungan tunggal yang mempunyai gerakan kecil (gerakan ekspansi sekitar setengahnya bila dengan sambungan tunggal. Lebar sambungan mirip dengan konvensional. Untuk mencegah gerakan

yang besar dapat digunakan *gap-slab* tebal yang mengunci pada pondasi bawah. Lihat Gambar 43 *Gap-slab* yang pendek lebih menguntungkan karena *warping* memanjang yang terjadi tidak terlalu signifikan. Angkur akan menahan *warping* dan mengurangi defleksi akibat *warping* dan *curling*.



Gambar 44 Sambungan Tunggal pada Konstruksi Perkerasan Prategang untuk Memperoleh Slab Prategang Panjang

2.9.11.3 Pelaksanaan Sambungan Tunggal

Pelaksanaan sambungan tunggal mungkin dilakukan dengan sejumlah cara di antara slab beton prategang yang panjang. Rancangan sekarang telah divariasikan dengan teknik *gap-slab*. Teknik *gap* dihilangkan dan penegangan diperbesar melalui *gap-slab* sampai pekerjaan sambungan tunggal. Dalam Gambar 43 diperlihatkan *gap-slab* dihilangkan antara slab prategang. Kedua ujung slab prategang merupakan pekerjaan sambungan sementara dengan angkur sementara pada strand prategang. Satu sambungan muai dibuat kemudian pada tengah atau salah satu ujung *gap-slab*. Slab beton pendek menjadi bagian dari slab prategang dengan mentransfer gaya tendon ke angkur tetap pada sambungan muai kedepannya pada saatnya nanti. Hanya satu strand memanjang diperlukan pada proses ini. Uraian rinci tentang sistem sambungan tunggal dapat ditemukan dalam pustaka Brunner (1975).

Variasi penggunaan *gap-slab* termasuk penempatan sambungan tunggal bergerak pada tengah panjang slab atau pada salah satu *gap-slab*. Strand diperpanjang sampai sambungan bergerak untuk dilakukan penegangan akhir atau, sebagai alternatif, salah satu dapat menggunakan batang baja khusus dari muka sambungan pelaksanaan ke muka sambungan. Pertama prategang penuh (200 psi) memegang perangkat dengan kencang ke muka sambungan. Hal ini membantu mencegah kerusakan yang sering terlihat pada sambungan jembatan yang penutupnya telah ditarik. Kedua, penegangan tinggi dapat digunakan untuk memegang ujung-ujung slab mencip-takan suatu sistem struktur yang lebih baik. Ketiga, prategang mengurangi jumlah baja yang berlawanan dengan jumlah yang digunakan untuk *gap-slab* yang tidak diprategang. Baja dapat dikurangi sebanyak 50%, tetapi tidak signifikan dalam harga total perkerasan. Pada sisi negatif, perangkat khusus harus dirancang dan dipasang dengan seksama agar bagian-bagian yang dirancang sempurna.

Dalam perkerasan prategang untuk lapangan terbang, penggunaan sambungan terbuka dapat digunakan khususnya untuk mengakomodasi drainase air yang melintasi perkerasan yang luas. Sambungan harus dicegah dari sisa bongkaran atau pecahan dan harus mudah dibersihkan.

2.9.11.4 Aplikasi prategang

Dalam ACI 325, beton prategang pasca-tarik (*post-tensioning*) yaitu perkerasan beton di-*stressing* setelah beton mengeras. Waktu yang kritis pada pekerjaan ini adalah pada malam pertama setelah pembetonan khususnya waktu beton dicor pada temperatur tinggi yang akan turun pada malam hari pertama. Pada periode tersebut belum ada *stressing* untuk menahan retak dan susut, karena itu diperlukan perawatan beton dengan cara memberikan penutup permukaan beton dengan *curing membrane* yang cukup agar dapat menghambat penurunan temperatur.

Penting diperhatikan bahwa beton harus segera diberikan *stressing* awal (*initial prestress*) setelah mencapai kekuatan yang cukup dengan ukuran tendon yang memadai untuk mencegah tegangan yang berlebihan saat *stressing* pada anker. Untuk memperoleh prategang awal yang cukup, perkerasan beton harus menggunakan beton mutu tinggi dengan f_c' minimal 4500 psi (31 MPa) atau minimal K-325 pada umur 28 hari. Setelah mencapai periode *curing* dan angkur selesai, tendon ditarik sampai mencapai 80% kekuatan baja ultimit. Tendon harus ditarik dari kedua ujung panel. Besar gaya tendon akan bertambah karena friksi strand selama penegangan.

2.9.11.5 Lebar Celah Sambungan

Masalah pada slab prategang yang panjang adalah menyediakan ruang pada sambungan antar slab untuk mengakomodasi gerakan slab. Ukuran sambungan tergantung pada panjang slab, koefisien termal beton, umur beton, besar prategang dan variasi iklim. Siklus temperatur harian menyebabkan kontraksi dan muai yang dikekang oleh friksi antara slab panjang. Pada kajian oleh ACI 325, 1959, perubahan panjang akibat temperatur dianggap terjadi tanpa kekangan oleh friksi tersebut.

Di Indonesia pada umumnya hanya tergantung atas panjang slab dan koefisien termal serta perbedaan temperatur tertinggi dan terendah.

Di iklim sub-tropis, sambungan menjadi lebar pada musim dingin, dan merapat pada musim panas, yang mungkin dapat merusak penutup sambungan (*joint seal*) atau terjadi *spalling* pada sambungan. Sambungan muai antara slab yang panjang pada umumnya bergerak seperti pada sambungan di jembatan, seperti ditunjukkan dalam Gambar 44a dan Gambar 44b. Jika lebar sambungan ekspansi kurang dari 32 mm seperti untuk sambungan ganda, dapat ditutup dengan penekanan *sealant* jenis *cellular neoprene*, seperti ditunjukkan dalam Gambar 44c.

Perubahan dimensi slab terbesar biasanya terjadi pada awal umur rencana. Rangkaian terjadi karena perkerasan yang menyebabkan sambungan melebar. Menyusut sebanding dengan besarnya prategang, dan berkurang karena umur.

2.9.12 Dimensi Penutup Sambungan

Sambungan kontraksi pada perkerasan beton prategang diperlukan untuk sambungan memanjang. Untuk memelihara sambungan dengan penutup yang efektif, bentuk penutup harus mempunyai faktor bentuk yang dinyatakan dengan rasio dalam:lebar (W/T) celah minimum. Kedalaman bahan penutup minimum di bawah permukaan adalah 3 mm (1/8 in.). Rasio kedalaman-lebar celah, W/T atau faktor bentuk harus minimum antara 1 : 1 dan 1 : 2 untuk bahan penutup tuang panas, dan 2 : 1 untuk bahan penutup terbuat dari silikon. Di bawah bahan penutup disarankan dipasang *backer rod* padat. Kedalaman bahan penutup dari permukaan tergantung atas *recess* bahan penutup, tebal bahan penutup dan tebal *backer rod* padat. (Bahan *workshop*, Tommy E Nantung, AASHTO, 2010). Bila lebar celah 3 mm, maka kedalaman bahan penutup dari permukaan antara 3 mm dan 6 mm. Kedalaman minimum bahan penutup yang harus dibenamkan adalah 10 mm ($3/8$ in.) dan 12,5 mm (1/2 in.) masing masing untuk sambungan memanjang dan melintang. (AASHTO 1993, Seksi 3.3.3; II-30).

Lebar sambungan sebagai jarak celah maksimum yang terjadi pada temperatur minimum. Gerakan horizontal dapat dihitung dengan mempertimbangkan musim dan siklus temperatur serta susut beton. Besar jarak celah didasarkan atas temperatur, kelembaban, jarak sambungan atau jarak retak, friksi antara panel dan dasar slab, kondisi alat transfer beban dan lain-lain. Untuk perhitungan, sambungan melintang dapat diperkirakan dihitung dengan rumus berikut:

$$\Delta L = \frac{CL(\alpha_c \times \Delta T + Z)}{S} \times 100$$

ΔL = Joint opening, in.

S = Regangan izin bahan penutup. Pada umumnya antara 25% dan 35%.

C = Faktor penyesuaian: untuk fondasi granular 0,8 dan untuk stabilisasi 0,65)

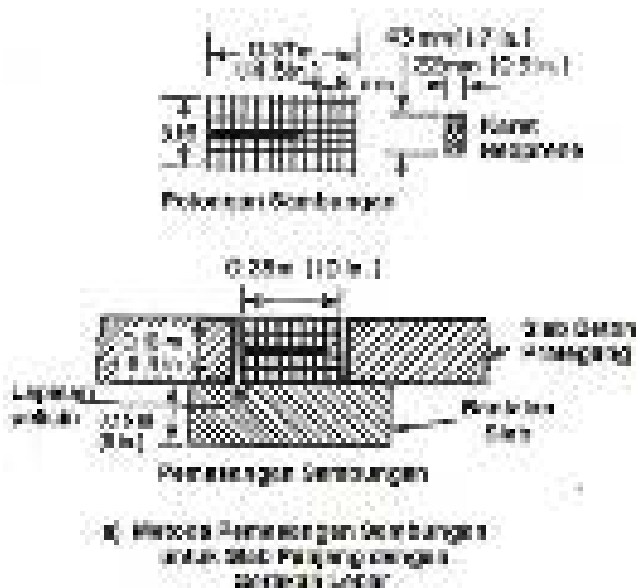
L = Jarak sambungan, in.

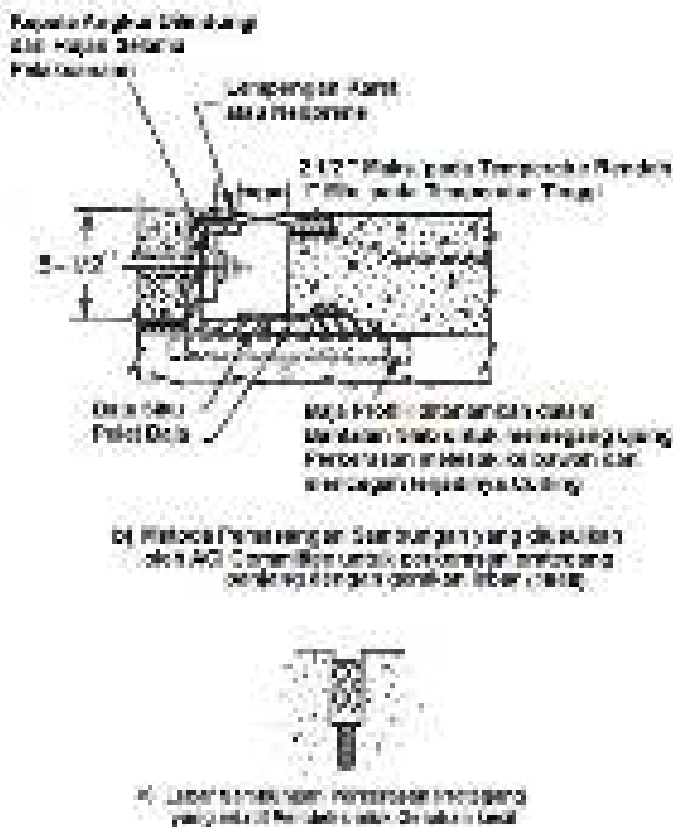
$\alpha_c = e_c$ = Koefisien termal $(3,8 - 6,6) \times 10^{-6}$, in./in. $^{\circ}$ F.

ΔT = Perbedaan temperatur $^{\circ}$ F.

Z = Koefisien susut kering $(2 - 8) \times 10^{-4}$ in./in.

Lebar sambungan muai harus didasarkan atas pengalaman, dan mungkin lebih besar dari pada sambungan kontraksi. Untuk bahan penutup yang sudah jadi (*pre mold*) harus ditekan sampai antara 20% dan 50% lebar celah nominal. Bahan penutup harus dipasang di bawah permukaan sedalam 3 mm sampai 12,5 mm. Lebar gergajian sambungan *reservoir* maksimum 19 mm.





Gambar 45 Detil Sambungan Muai dalam Perkerasan Beton Prategang

2.9.13 Contoh Perhitungan

2.9.13.1 Contoh Perhitungan Perubahan Panjang, Daerah Sub-tropis

Data teknis slab beton di daerah sub-tropis:

- Tebal slab 15 cm (6 in.).
- Panjang slab 120 m dan 180 m (400 ft dan 600 ft).
- Modulus elastisitas $E_c = 3.000.000$ psi.
- Berat volume 2310 kg/cm^3 (144 lb/cf).
- Temperatur permukaan beton maksimum 27°C (80°F) = 54°C (130°F),
- Temperatur di bawah -7°C (20°F): -14°F .
- Gradien temperatur di atas 27°C (80°F): $0,09 \text{ mm}^\circ\text{C}$ ($4 \text{ in}^\circ\text{F}$) dan
- Gradien temperatur di bawah -4°C (20°F): $0,045 \text{ mm}^\circ\text{C}$ ($2 \text{ in}^\circ\text{F}$).
- Faktor friksi di atas 27°C (80°F): 0,5.
- Faktor friksi di bawah -7°C (20°F): 0,7.
- Koefisien termal beton:
 - Di atas 27°C (80°F) = $11 \times 10^{-6} \text{ mm}^\circ\text{C}$ ($6 \times 10^{-6} \text{ in}^\circ\text{F}$).
 - Di bawah -7°C (20°F) = $7 \times 10^{-6} \text{ mm}^\circ\text{C}$ ($4 \times 10^{-6} \text{ in}^\circ\text{F}$).

Dalam Tabel 21 ditunjukkan tahap per-hitungan perubahan panjang. Dalam Gambar 47 diperlihatkan hubungan antara temperatur dan muai-susut panel beton panjang 100 m, tebal 20 cm, pada temperatur minimum rata-rata tetap sebesar minus 7°C (20°F).

Tabel 21 Contoh Perhitungan Perubahan Panjang Tahunan Slab Beton (Sub-Tropis)

Parameter	Symbol	Formula	Satuan	Hasil Perhitungan	
Tebal Slab	t		in	6	
Panjang Slab	L		ft	400	
Berat volume Beton	G		lb/ft ³	144	
Modulus elastis beton	E _c		psi	3.000.000	
Temperatur muai terkendali, > 27 °C (80 °F)				°F	80
Temp Permukaan Maksimum	T _{S-Max}		°F	130	
Koefisien Termal musim panas	e _{>80F}		in/°F	0,000006	
Koef Friksi	C _{F-80F}			0,5	
Gradient temp. musim panas	T _{G-80F}		°F/in	4	
1 Temperatur rata-rata > 80 °F	T _{av>80 F}	(T _{S-Max} - (e _{>80F} x T _{G-80F}))/2	°F	118	
2 Muai tak-terkendali (<i>unrestrained</i>)	EX _{UR>80F}	(T _{av>80 F} - 80) x e _{>80F} x (L x 12)	in	1,094	
3 Tegangan friksi, tengah bentang	S _{Mid}	(C _{F-80F} x L/2 x 1 x t/2 x G)/(12 x t)	psi	100	
4 Kekangan muai di setiap tepi	EX _{R-Edge}	{(S _{Mid} /2) - (L x 12/2)}/E _c	in	0,04	
5 Muai penuh seluruh panjang	EX _{Full>80F}	EX _{UR>80F} - (2 x EX _{R-Edge})	in	1,014	
			mm	25,8	
Temperatur kontraksi terkendali, < -7 °C (20 °F)				°F	20
Temp permukaan Min. Rata-rata	T _{S-Min}		°F	-20	
Koefisien Termal musim dingin	e _{<20F}		in/°F	0,000004	
Koef Friksi pada temp < 20 °F)	C _{F-20F}			0,7	
Gradient temp musim dingin	T _{G-<20F}		°F/in	2	
6 Temperatur rata-rata < 20 °F	T _{av<20 F}	(T _{S-Min} - (e _{<20F} x T _{G-<20F}))/2	°F	-14	
7 Kontraksi tak-terkendali (<i>unrestrained</i>)	EX _{UR<20F}	(T _{av<20} - 20) x e _{<20F} x (L x 12)	in	-0,653	
8 Tegangan friksi, tengah bentang	S _{Mid}	(C _{F-20F} x L/2 x 1 x t/2 x G)/(12 x t)	psi	140	
9 Kekangan muai di setiap tepi	EX _{R-Edge}	{(S _{Mid} /2) - (L x 12/2)}/E _c	in	0,056	
10 Kontraksi penuh seluruh panjang	EX _{R-Full<20F}	EX _{UR<20F} - (2 x EX _{R-Edge})	in	-0,541	
			Mm	-13,7	
Perubahan panjang rata-rata tak-terkendali musiman untuk Temperatur antara +20 °F dan +80 °F (- 7 °C dan 27 °C)					
Koefisien Termal Rata-rata	e _{Avg}		in/°F	0,000005	
Faktor perubahan panjang akibat kelembaban pada Sum-Win	e _{Ex-Moist}		in/in	0,0001	
11 Muai antara (20 & 80) °F (-7 & 27) °C	EX _{UR-Avg}	(T _{R-E-80F} - 20) x e _{Avg} x (L x 12)	in	1,44	
12 Pengurangan panjang akibat kelembaban	EX _{Moist}	e _{Ex-Moist} x L x 12	in	-0,48	
13 Penyesuaian panjang	L _{adj}	EX _{UR-Avg} - EX _{Moist}	in	0,96	
Muai antara (80-130) °F (27-55) °C	EX _{R-Full-80F}	Dari 5	in	1,014	
Kontraksi ant. (- 20 & +20) °F(-29 & -7) °C	EX _{R-Full<20F}	Dari 10	in	0,541	
14 Total perubahan panjang Tahunan	EX _{Tot-Ann}	L _{Adj} + EX _{R-Full-80F} + EX _{R-Full<20F}	in	2,515	
			mm	64	

2.9.13.2 Contoh Perhitungan Perubahan Panjang, Daerah Tropis, di Buntu-Kebumen (Studi Kasus)

Contoh studi kasus perkerasan jalan beton prategang di jalan ujicoba skala penuh Buntu-Kebumen, Jawa Tengah dengan data sebagai berikut:

Mutu beton K-400 → $f'_c = 0,83 \times 400 = 4742,9$ psi

$$\text{Modulus Elastisitas} = E_c = 57000 \sqrt{f'_c} = 3925499 \text{ psi}$$

$$\text{Berat volume beton} = 2400 \text{ kg/cm}^3 = 149,6 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{Tebal} = 0,20 \text{ m} = 8 \text{ inci}$$

$$\text{Panjang yang ditinjau} = 100 \text{ meter} = 328 \text{ ft}$$

$$\text{Temperatur permukaan maksimum di atas rata} = 42^\circ\text{C} (80^\circ\text{F}) = 107,6^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatur permukaan minimum rata-rata} = 26^\circ\text{C} = 78,8^\circ\text{F}$$

$$\text{Gradien temperatur} = (107,6 - 78,8) / (20 / 2,54)^\circ\text{C/in} = 3,7^\circ\text{F/in}$$

$$\text{Koefisien termal beton} = 6 \times 10^{-6} \text{ in/in}^\circ\text{F}$$

Dengan perhitungan yang sama, perubahan panjang slab 100 meter akibat muai terkendali (*Restrained expansion temperature*) di atas temperatur 27°C sebesar 7 mm, dan akibat musiman setelah dikurangi penyesuaian panjang muai akibat kelembaban, minus 1,0 mm (-0,39 in.) sehingga total perubahan panjang tahunan menjadi minus 2,3 mm. Lihat

Tabel 22. Dalam diilustrasikan perubahan panjang akibat temperatur dan kelembaban, yang diukur langsung di lapangan.

Tabel 22 Contoh Perhitungan Perubahan Panjang Tahunan Slab Beton di Buntu-Kebumen (Tropis)

Parameter	Symbol	Formula	Satuan	Hasil Perhitungan	
Tebal Slab	t		in	8	
Panjang Slab	L		ft	328,1	
Berat volume Beton	G		lb/ft ³	149,6	
Modulus elastis beton	E _c		psi	4.353.589	
Temperatur muai terkendali, > 27 °C (80 °F)				°F	80
Temp permukaan Maks. rata-rata	T _{CS-Max}		°F	108	
Temp permukaan Min. Rata-rata	T _{S-Min}		°F	78,73	
Koefisien Termal musim panas	e _{>80F}		in/°F	0,000006	
Koef Friksi	C _{F-80F}			0,5	
Gradient temp musim panas	T _{G-80F}		°F/in	3,67	
1 Temperatur rata-rata > 80 °F	T _{av>80 F}	(T _{S-Max} - (e _{>80F} x T _{G-80F}))/2	°F	92,9	
2 Muai tak-terkendali (<i>unrestrained</i>)	EX _{UR>80F}	(T _{av>80 F} - 80) x e _{>80F} x (L x 12)	in	0,31	
3 Tegangan friksi, tengah bentang	S _{Mid}	(C _{F-80F} x L/2 x 1 x t/2 x G)/(12 x t)	psi	63,91	
4 Kekangan muai di setiap tepi	EX _{R-Edge}	{(S _{Mid} /2) - (L x 12/2)}/E _c	in	0,01	
5 Muai penuh seluruh panjang	EX _{Pull-80F}	EX _{UR>80F} - (2 x EX _{R-Edge})	in	0,28	
			mm	7,0	
Perubahan panjang rata-rata tak-terkendali musiman untuk Temperatur antara +20 °F dan +80 °F (- 7 °C dan 27 °C)					
Koefisien Termal Rata-rata	e _{Avg}		in/°F	0,000006	
Faktor perubahan panjang akibat kelembaban pada Sum-Win	e _{Ex-Moist}		in/in	0,0001	
6 Muai ant (20 & 80) °F	EX _{UR-Avg}	(T _{R-E>80F-20}) x e _{Avg} x (L x 12)	in	0,03	
7 Pengurangan panjang akibat kelembaban	EX _{Moist}	e _{Ex-Moist} x L x 12	in	-0,39	
8 Penyesuaian panjang	L _{adj}	EX _{UR-Avg} - EX _{Moist}	in	-0,37	
9 Muai antara (80-130) °F (27-55) °C	EX _{R-Full-80F}	Dari 5	in	0,28	
10 Kontraksi ant. (- 20 & +20) °F (-29 & -7) °C	EX _{R-Full<20F}	Dari 10	in	0,00	
11 Total perubahan panjang Tahunan	EX _{Tot-Ann}	L _{Adj} + EX _{R-Full>80F} + EX _{R-Full<20F}	in	-0,09	
			mm	-2,3	

Bila kondisi muai penuh, panjang panel dalam Tabel 21 untuk iklim sub-tropis dan pada Tabel 22 untuk iklim tropis, dihitung dengan Rumus (20), maka lebar celah sambungan (*joint opening*), adalah sebagai berikut:

Sub-tropis:

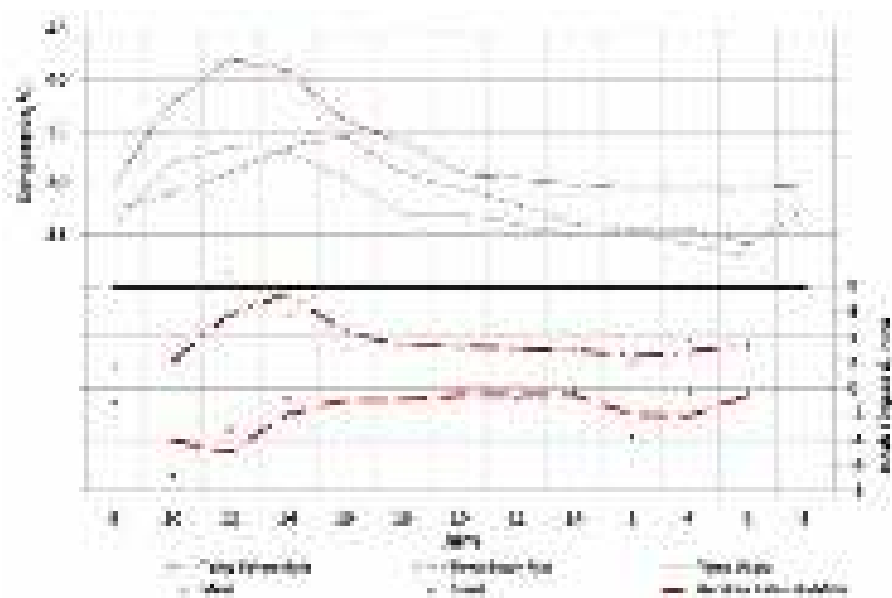
$$\Delta L = \{0,65 \times (10000/2,54) \times (6,0 \cdot 10^{-6} \times ((130+20) + 2 \cdot 10^{-4}) \times 100/25 = 23,4 \text{ mm} \sim 25,8 \text{ mm (Lihat Tabel 21)}$$

Tropis:

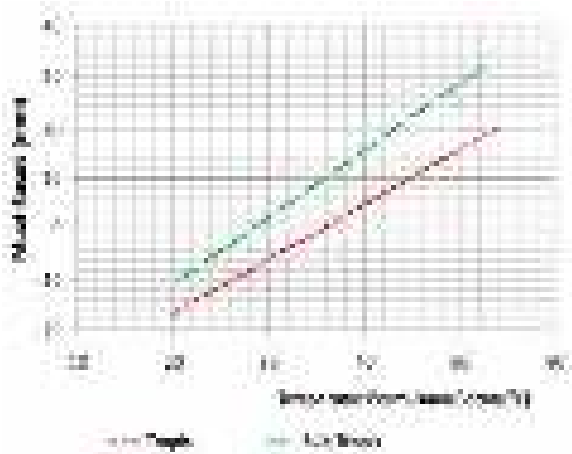
$$\Delta L = \{0,65 \times (10000/2,54) \times (6,0 \cdot 10^{-6} \times ((42-26) * 1,8+32) + 2 \cdot 10^{-4}) \times 100/25 = 9,5 \text{ mm} \sim 7 \text{ mm (Lihat Tabel 22)}$$

Dalam Gambar 47 diperlihatkan perbedaan muai-susut panjang slab untuk mengakomodasi lebar celah sambungan muai. Muai-susut di daerah tropis (Buntu-Kebumen) dengan temperatur beton 50 °C, relatif lebih rendah (15/30 = 50%) dari pada di iklim sub-tropis.

Berdasarkan hasil pengukuran dengan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD), defleksi pada tepi segmen dan tengah-tengah bentang, antara 0,21 mm dan 0,41 mm, atau rata-rata 0,28 mm < 0,75 mm, dan efisiensi transfer beban (*Load Transfer Efficiency*) > 82%, sehingga tidak terindikasi rongga di bawah sambungan yang menyebabkan *pumping*. Dalam Gambar 48 diperlihatkan pemasangan tendon memanjang pada ujicoba skala penuh di Buntu-Kebumen dan kondisi visual sampai umur satu tahun.



Gambar 46 Tipikal Fluktuasi Temperatur dan Muai-Susut pada Sambungan di Buntu-Kebumen (September 2010).



Gambar 47 Tipikal Trend Muai-susut di Sub-Tropis dan Tropis, Variasi Temperatur Permukaan Beton



Gambar 48 Pemasangan Tendon pada Ujicoba Skala Penuh (atas), dan Kondisi Umur Satu Tahun (bawah), Buntu-Kebumen (Des 2010)

2.9.13.3 Contoh Perhitungan Perkerasan Beton Prategang

Perkerasan beton prategang untuk jalan raya utama, dengan data sebagai berikut:

- Kuat tekan beton umur 28 hari, $f'_p = 5000$ psi (34.500 kPa), 350 kg/cm².
- Modulus elastisitas beton, $E_c = 4 \times 10^6$ psi (28 x 106 kPa), 28 x 104 kg/cm².
- *Modulus of subgrade reaction* di atas lapisan subbase, $k = 300$ pci (82 MN/m³).

Solusi:

- Anggap panjang slab beton prategang dengan jarak muai $t = 150$ m (500 ft), dan jenis konstruksi sambungan ganda digunakan.
- Coba tebal 0,178 m (7 in.).

Tegangan tarik di atas dan ujung slab arah melintang:

$$f'_{(c+w)} = (282+346)/2 = 314 \text{ psi}$$

Menentukan f'_F , untuk $L = 150$ m (500 ft): (dari Tabel 19, interpolasi antara tebal 6 inci dan 8 inci diambil nilai pada musim panas):

$$- f'_F \text{ untuk tebal 6 in.: } (380 + 430)/2 = 405 \text{ psi.}$$

$$- f'_F \text{ untuk tebal 8 in.: } (445+495)/2 = 470 \text{ psi.}$$

$$- f'_F \text{ untuk tebal 7 in.: } (405 + 470)/2 = 437,5 \text{ psi.}$$

$$f'_L = 150 \text{ psi (dari gambar 42).}$$

$$f'_{(c+w)} + f'_F + f'_L = 314 + 437,5 + 150 \\ = 901,5 \text{ psi.}$$

Tegangan tarik di bawah ujung slab arah memanjang:

$$f'_{(c+w)} = (30 + 60)/2 = 45 \text{ psi (dari Tabel 20, interpolasi)}$$

$$f'_F = (140+210)/2 = 175 \text{ psi (dari Tabel 19)}$$

$$f'_L = 425 \text{ psi (dari gambar 42)}$$

$$f'_{(c+w)} + f'_F + f'_L = 45 + 175 + 425 = 645 \text{ psi.}$$

Dalam hal ini bagian atas lebih kritis dari pada di bawah tepi slab, karena itu akan dipertimbangkan dalam rencana.

$$MR = 9\sqrt{f'_c} = 9\sqrt{5000} = 636 \text{ psi}$$

$$FS = 2$$

$$f_t = M_R/F_S = 636/2 = 318 \text{ psi}$$

$$\text{dari rumus (1) : } (f_t + f_p) > (f'_{(c+w)} + f'_F + f'_L)$$

$$f_t + f_p = 901,5, \text{ maka}$$

$$f_p = 901,5 - f_t = 901,5 - 318 = 583,5 \text{ psi (4084,5 kPa)} < 650 \text{ psi (OK)}$$

Cek bahwa prategang pada penampang perkerasan akibat friksi tegangan tarik adalah minimum 100 psi (690 kPa).

Prategang minimum rencana:

$$f'_F + 100 = 175 + 100$$

$$= 275 \text{ psi} < f_p = 583,5 \text{ psi (OK)}$$

Gaya prategang diperlukan per kaki :

$$f_p \times t \times 1 = 583,5 \text{ psi} \times 7 \text{ in.} \times 12$$

$$= 49.014 \text{ lb}$$

Gaya prategang per meter :

$$f_p \times t \times 1,0 = 4084,5 \text{ kPa} \times 0,178 \text{ m} \times 1,0 \\ = 727 \text{ kN/m.}$$

Posisi strand diletakkan sejauh $1/12$ tebal slab di bawah garis tengah atau $(0,5 \times 17,8) + (1/12 \times 17,8) = 8,9 + 1,5 = 10,4 \text{ cm}$ dari permukaan slab.

Dengan cara yang sama dalam Tabel 21, untuk $E_c = 4.000.000 \text{ psi}$, panjang slab 150 m (500 ft) dan tebal 17,8 cm (7 in.), maka lebar celah sambungan di antara sambungan muai sama dengan $3,08 / 2 = 1,54 \text{ in.}$ atau 39 mm.

Dari gambar 42 (untuk tebal 7 in. dan $k = 300 \text{ pci}$), lendutan yang terjadi 0,015 in. = 0,38 mm < 0,75 mm (0,03 in.) sehingga cukup aman terhadap deformasi vertikal.



3. PENUTUP

Metode penelitian yang dilakukan pada kegiatan ini adalah metode eksperimental, yaitu metode penelitian dengan mengkaji perancangan perkerasan beton semen prategang dari pengalaman negara-negara maju, evaluasi jalan beton prategang di dalam negeri, dan kesuaiannya antara rancangan dari daerah beriklim sub-tropis dengan iklim tropis seperti di Indonesia.

Salah satu pendekatan untuk mengurangi masalah sambungan antara lain adalah penggunaan perkerasan beton tanpa sambungan melintang yaitu dengan perkerasan beton bertulang menerus (*Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP*). Pendekatan lainnya adalah menggunakan beton prategang (*Pre-stressed Concrete Pavement, PSCP*) dengan jarak sambungan yang relatif lebih panjang lagi dari pada CRCP (AASHTO, 1993).

Beberapa instansi di negara maju melaporkan bahwa pada CRCP, jarak sambungan atau dimensi slab lebih panjang, dan masih ditemukan kerusakan retak melintang walaupun telah diberikan perkuatan tulangan baja memanjang yang rapat untuk menahan retak. Sejalan dengan waktu, bila terjadi *spalling* dan retak lebar pada permukaan beton, maka akan banyak mengurangi kenyamanan berkendara (ACI 325.7R-88). Sampai saat ini, CRCP baru digunakan terbatas di jalan tol Tangerang-Merak (1,0 Km).

Kemampuan perkerasan jalan beton semen meningkat bila dirancang dalam kondisi pra-tegang (*prestressed*) (*American Association State of Highway and Transportation Officials, AASHTO, 1993*). Beton Prategang adalah beton yang tegangan tariknya pada kondisi pembebanan tertentu dihilangkan atau dikurangi sampai batas aman dengan pemberian gaya tekan permanen, dan baja prategang (*strand*) dilakukan pra-tarik (*pre-tension*) sebelum beton mengeras atau dilakukan pasca-tarik (*post-tension*) setelah beton mengeras.

Dengan prategang, tebal perkerasan beton menjadi lebih tipis 35% - 40% dari pada konvensional pada kondisi lapisan dasar dan lalu lintas yang sama (*American Concrete Institute, ACI 325.7R-88*).



DAFTAR PUSTAKA

- Adhi Karya, PT (2010), *Manual Perencanaan Perkerasan Jalan Raya*. Sistem Perkerasan Beton Pracetak Pratekan (Prestressed Precast Concrete Pavement). Jakarta 2010.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- American Concrete Institute, ACI (ACI 325.7R-88. *Recommendation for Designing Prestressed Concrete Pavements*).
- American Concrete Pavement Association (ACPA). 1997. *The Concrete Pavement Restoration Guide*. Technical Bulletin TB020P. American Concrete Pavement Association, Skokie, IL
- Anal Sheth.2012. Designing Thickness Of Prestressed Concrete Pavements. Author: Ms. ANAL Sheth.2012, Lecture, Faculty of technology,CEPT University, Ahmedabad;http://www.cept.ac.in/index.php?option=com_content&view=article&id=185&itemid=341.
- Anderson, D. A., R. S. Huebner, J. R. Reed, J. C. Warner, and J. J. Henry. 1998. *Improved Surface Drainage of Pavements*. Final Report, NCHRP Project 1-29. NCHRP Web Document 16. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Asphalt Institute (MS-17, 2000). *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*. The Asphalt Institute Manual Series 17 (MS-17). Reserach Park Drive.PO Box 14052. Lexington Kenyutcky.
- Center for Transportation Research, University of Texas, Austin (By William N. Nickas, P.E. ; FHWA, 2002). **East-Coast projects demonstrate overnight installations of durable pavement**. P.O. Box 1528 Fayetteville, AR 72702-1528. Ph: 800.466.6275. Fax:800-842-1560. info@zweigwhite.com; www.zweigwhite.com
- Dachlan, A.T. *Laporan Akhir Tahun 2009, Kajian dan Pengawasan Uji Coba Skala Penuh Teknologi Perkerasan Jalan Beton Semen dengan Metoda Pracetak*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. 2009.
- Dachlan, A.T. *Laporan Akhir Tahun 2010, Monitoring dan Evaluasi Pemanfaatan Perkerasan Beton dan Beton Pracetak di Indonesia*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. 2010.

- Dachlan, A.T. *Laporan Akhir Tahun 2011. Pemanfaatan perkerasan jalan beton pracetak-prategang dan perkerasan beton*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. 2011.
- David K. Merritt, Richard B. Rogers, Robert Otto Rasmussen (FHWA-HIF-08-009, 2008). Construction of a Precast Prestressed Concrete Pavement Demonstration Project on Interstate 57 near Sikeston, Missouri
- David K. Merritt, B.Frank McCullough, Ned H Burns, and Anton K Schindler. (FHWA, 2000). The Feasibility of Using Precast Concrete Panels to Expedite Highway Pavement Construction. U.S. Department of Transportation (DOT),
- Grant C. Luckenbill, E.I. July 2009. Dr. Vellore S. Gopalaratnam, P.E., Thesis Advisor. Evaluation Of The Service Performance Of An Innovative Precast Prestressed Concrete Pavement. A Thesis. Presented To The Faculty Of The Graduate School. University Of Missouri – Columbia
- Leksminingsih, Dra (2008). *Penelitian Joint Sealant untuk Sambungan Perkerasan Beton Semen*. Jurnal Jalan dan Jembatan. Volume 26 No. 2, Agustus 2009. ISSN: 1907-0284
- Luh M.Chang, Yu-Tzu Chen, Sangwook Lee (FHWA, 2004). Using Precast Concrete Panels for Pavement Construction in Indiana. Purdue University dan Indiana DoT, laporan nomor FHWA /IN/JTRP-2003/26
- Strategic Highway Research Program (SHRP). 1993. *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project*. SHRP-P-338. Washington DC 1993.
- Supriya Alagarsamy, Cesar Ivan Medina Chavez, David Fowler, and B. Frank McCullough. (FHWA, 2004). *Application Of PSCP 3.0 Program To Predict Stresses In Prestressed Concrete Pavements*. FHWA/TX-05/0-4035-2. Center for Transportation Research The University of Texas at Austin 3208 Red River, Suite 200. Austin, TX 78705-2650.

