

# KAJIAN PERANCANGAN PERKERASAN JALAN BETON PRATEGANG (THE STUDY OF PRESTRESSED CONCRETE PAVEMENT DESIGN)

A. Tatang Dachlan

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan  
Jl. A.H.Nasution 264 Bandung (40294)  
E-mail : atatangd@yahoo.com  
Diterima: 10 Februari 2011; Disetujui: 06 April 2011

## ABSTRAK

*Perancangan perkerasan jalan beton prategang (pre-stressed concrete) untuk jalan raya sampai saat ini belum banyak dikembangkan secara luas di Indonesia, tetapi di beberapa negara maju sudah sejak lama melakukan sejumlah eksperimen dan aplikasi untuk jalan raya. Dalam tulisan ini disajikan kajian perancangan perkerasan beton prategang untuk jalan raya yang direkomendasikan oleh The American Concrete Institute (ACI 325.7R-88). Perancangan ini diaplikasikan pada tahun 2009 dalam suatu uji coba skala penuh yaitu beton cor di tempat yang diberikan gaya prategang dengan sistem pasca tarik (post-tension). Uji coba berlokasi di jalan nasional dengan lalu lintas relatif berat di ruas jalan Buntu-Kebumen, Provinsi Jawa Tengah. Perancangan ini dimaksudkan sebagai alternatif dalam merancang perkerasan beton prategang yang praktis mengikuti rekomendasi ACI 325.7R-88 disesuaikan dengan kondisi musim dan kelembaban di Indonesia. Dalam perhitungan diuraikan contoh menentukan lebar celah ekspansi akibat siklus temperatur dan kelembaban perkerasan beton, serta kesesuaian lendutan vertikal yang aman berdasarkan iterasi tebal panel, kuat tekan beton akibat prategang, tegangan fleksural beton akibat curling, warping, beban lalu lintas, dan tegangan kritis akibat friksi tanah dasar. Hasil monitoring uji coba skala penuh sampai tahun pertama, menunjukkan kinerja yang baik dan belum terlihat masalah rongga di bawah slab dan masalah transfer beban.*

*Kata kunci: beton prategang, kuat tekan, modulus beton, perkerasan beton, prategang pasca-tarik, slab beton*

## ABSTRACT

*Recently, prestressed concrete pavement design for road is not widely developed yet in Indonesia, however, in some developed countries experiments and application of such design have been implemented. The paper describes the study of prestressed concrete design for road pavement as developed and recommended by The American Concrete Institute (ACI 325.7R-88). The design was applied in full-scale trial in 2009 using cast-in-place of concrete and post tension. The trial is located in National road with relatively heavy load traffic, precisely in Buntu-Kebumen road link, central Java Province. The design is intended as an alternative in designing practical prestressed concrete pavement following ACI 325.7R recommendation suited to Indonesian weather condition and humidity. Some examples of expansion width determination as the effect of annual temperature cycle, concrete pavement moisture, conformity of vertical deflection based on the thickness iteration, compressive strength due to prestressing, flexural stress due to curling, warping, traffic load and critical stresses due to subgrade friction are described in the analysis. In the first year monitoring result shows that the slabs and joint have good performance, no problems occurred in voids and load transfer.*

*Keywords : prestressed concrete, compressive strength, concrete modulus, concrete pavements, post – tensioning, concrete slab*

## PENDAHULUAN

### 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 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 (*Prestressed Concrete Pavement, PCP*) 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 belum pernah digunakan di Indonesia.

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*).

Balitbang Kementerian Pekerjaan Umum memiliki Pedoman Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, dalam Pd T-14-2003 (Kementerian Pekerjaan Umum, 2003), tetapi saat ini belum memperkenalkan perancangan perkerasan jalan beton dengan prategang. Tulisan ini bertujuan menyediakan alternatif pedoman dalam merancang perkerasan beton prategang untuk jalan.

## KAJIAN PUSTAKA

### AASHTO (1993)

*American Association State of Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 1993) menyatakan bahwa 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 dan dapat diproduksi lebih panjang sehingga mengurangi jumlah sambungan. Dengan beton prategang akan mengubah perilaku struktur perkerasan beton semen, memperbaiki kemampuan menahan deformasi dan momen sebagai salah satu penyebab retak.

### FHWA (2000)

*Luh M.Chang, Yu-Tzu Chen, Sangwook Lee* (2004) membuat percobaan perkerasan jalan beton prategang dalam bentuk panel pracetak yang dipasang melintang jalan dengan ukuran 36 in x 10 in x 8 in., di Indiana. *David K. Merrit, B.Frank McCullough, Ned H Burns, and Anton K Schindler*. (Merrit, David, K., et al, 2000) U.S. *Department of Transportation (DOT)*, telah melakukan studi kelayakan penggunaan perkerasan beton prategang dalam

bentuk komponen pracetak yang terbukti lebih efisien.

#### ACI (ACI 325.7R-88)

ACI merekomendasikan perhitungan tebal beton prategang untuk jalan raya atau lapangan terbang, sesuai dengan ACI 325.7R-88. Komisi ACI 325 (ACI Committee, 1998) 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 ketebalan slab, maka besar gaya tekan 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 pra-tegang. 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 menghasilkan kemampuan 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:

- 1) 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.

- 2) 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.

#### Sejarah Perkembangan Aplikasi Beton Prategang di Dunia

Dalam Tabel 1 disajikan sejarah perkembangan perkerasan jalan beton prategang.

#### Aplikasi Beton Prategang di Indonesia

Bina Marga (2006) telah melaksanakan perkerasan beton prategang dengan metoda pracetak (*precast pretension*) yang dipasang memanjang, di Jakarta sekitar 1000 meter, lebar 2 x (3 x 1,8) m, dan metoda tersebut diadopsi dari Indiana (*Luh M.Chang*, 2004) dan cukup kuat menahan beban lalu lintas yang berat dan padat walaupun masalah kerapihan sambungan masih perlu perbaikan. Badan Pengelolaan Jalan Tol (BPJT) juga telah merancang perkerasan beton prategang dengan metoda pracetak prategang (*precast pretension*) yang dipasang melintang, pada tahun 2008, di Jalan tol Kanci-Pejagan sepanjang 35 km, lebar (2 x 8,4) m, dilaksanakan oleh kontraktor (BUMN) dan investor (Semesta Marga Raya, SMR, 2009). Kinerja perkerasan beton prategang di kedua lokasi tersebut sampai saat ini masih dalam pengamatan (Dachlan A.T., 2009, 2010). Pusat Litbang Jalan dan Jembatan melakukan kajian pustaka beberapa aplikasi di luar negeri dan diujicoba secara skala penuh (Dachlan A.T., 2009). Salah satu yang diujicoba adalah perkerasan beton prategang cor di tempat (*cast in place*) yang diberi *post-tension* setelah beton mencapai 80% kekuatan rencana atau sekitar 3 x 24 jam. Panjang segmen yang dicoba tersebut adalah sepanjang 100 m dan 70 m, lebar (2 x 3,7) m. Kondisinya secara struktural dan fungsional dievaluasi dan sampai umur 11

bulan belum terjadi masalah transfer beban dan rongga di bawah sambungan.

**Tabel 1.** Sejarah Perkerasan Jalan Beton 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).
Setelah 1960	Di Eropa. Lapangan terbang militer, luas 3,3 juta m <sup>2</sup> , penegangan arah melintang dan memanjang dengan tulangan kuat tinggi, digROUTING dalam selongsong baja. Overlay tebal (12 – 16) cm. Lapangan terbang sipil, Tebal 18 cm: 1965-1978: <i>Schiphol (Amsterdam Airport)</i> , luas 680.000 m <sup>2</sup> 1960-1968: <i>Cologne-Bonn</i> , 530.000 m <sup>2</sup> . 1972-1978: <i>Rio de Janeiro</i> , 560.000 m <sup>2</sup> .
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 dobel silinder untuk mempercepat proses <i>post-tensioning</i> .
1963	Pengembangan media <i>low-friction</i> dengan dua lapis tipis plastik sebagai membran ( <i>Timms</i> , 1963). Produk komersial dapat membuat media dengan nilai friksi 0,20 (sesuai ASTM D 2103). Di lapangan mungkin dicapai 0,50 atau lebih rendah lagi bila ditambah dengan parafin tipis di antara dua lapis plastik ( <i>US DoT</i> , 1983).
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.
1973-1985	Proyek jalan skala-penuh di <i>Pennsylvania</i> tahun 1973 ( <i>Brunner</i> 1975); di <i>Mississippi</i> tahun 1975 ( <i>Albritton</i> , 1976), <i>Arizona</i> tahun 1977 ( <i>Morris and Emery</i> , 1977).
1985	Overlay beton prategang di <i>Texas</i> , tahun 1985 ( <i>Burns and McCullogh</i> , 1986), dan di <i>Pennsylvania</i> direncanakan overlay tahun 1988 ( <i>Gramling</i> 1986).

Sumber: *American Concrete Institute*, ACI 325-7R-88

## HIPOTESIS

Perkerasan jalan beton dengan prategang, dapat dibuat lebih tipis dan lebih panjang dari pada beton konvensional sehingga mengurangi jumlah sambungan.

## METODOLOGI

### Umum

Perancangan ini merangkum cara perhitungan tebal perkerasan jalan beton prategang yang dikontrol terhadap perubahan panjang slab untuk mengakomodasi lebar celah sambungan muai (*expansion joint*) dan defleksi akibat faktor temperatur, kelembaban, *curling/warping*, dan beban lalu lintas. Ujicoba skala penuh dilakukan di ruas jalan Buntu-Kebumen, Km 197+000 (Semarang) sepanjang 1102 meter. Pengamatan dilakukan secara visual untuk mengetahui kondisi permukaan, dan pengukuran defleksi vertikal dengan alat *Falling Weight Deflecto-meter* (FWD) untuk mengetahui kemungkinan adanya rongga di bawah sambungan dan besarnya efisiensi transfer beban (*Load Transfer Efficiency*). Kriteria defleksi maksimum menurut *The Asphalt Institute MS-17* adalah perbedaan defleksi antara  $d_2$  dan  $d_1$  maksimum 80 mikron, nilai tengah defleksi antara  $d_2$  dan  $d_1$  maksimum 570 mikron. *Load Transfer Efficiency* ( $d_2/d_1$ ) minimum 0,6. Besar  $d_1$  adalah lendutan pada tepi slab yang dibebani (*loaded*) dan  $d_2$  lendutan di bawah tepi slab yang tidak dibebani (*unloaded*).

### Komponen Rancangan Tebal Perkerasan Beton

#### Parameter 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).

### 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 prategang 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.

### Koefisien Termal dan Friksi dalam Siklus Perubahan Panjang

Perubahan panjang perkerasan beton tergantung pada perbedaan temperatur dalam beton, pemuai 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 muai 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  $12,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ( $7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ). Koefisien friksi tidak berpengaruh banyak pada gerakan slab akibat temperatur, tetapi friksi akibat tegangan berperan besar pada perancangan slab beton panjang, yang tidak tergantung pada besarnya penegangan.

Besar friksi pada perkerasan beton dapat dirancang sebesar 0,5 untuk panjang beton prategang maksimum 180 meter menggunakan dua lapis plastik di atas *subbase* yang padat dan rata. Di negara beriklim dingin, retak pada beton terjadi bervariasi. Di Dulles, menurut Friberg dan Pasko, 1973, retak terjadi pada fluktuasi temperatur antara  $14^{\circ}\text{C}$  sampai minus  $9^{\circ}\text{C}$ .

### Perumusan Perubahan Panjang Beton Prategang

Berikut ini simbol komponen perhitungan perubahan panjang dan rumus-rumus yang digunakan.

#### • Data Perkerasan Beton

Tebal Slab, in. :  $t$   
 Panjang Slab, ft. :  $L$   
 Berat volume beton,  $\text{lb/ft}^3$  :  $G$   
 Modulus elastis beton, psi :  $E_c$

#### • Perubahan Panjang pada $> 27^{\circ}\text{C}$ ( $80^{\circ}\text{F}$ )

Temp Permukaan Maksimum,  $^{\circ}\text{F}$  :  $T_{S-\text{Max}}$   
 Koefisien Termal  $> 80^{\circ}\text{F}$ ;  $\text{in}/^{\circ}\text{F}$  :  $e_{>80\text{F}}$

Koef Friksi :  $C_{f>80\text{F}}$   
 Gradient temperatur  $> 80^{\circ}\text{F}$ ;  $^{\circ}\text{F}/\text{in.}$  :  $T_{G>80\text{F}}$

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

$$T_{\text{av}>80\text{F}} = T_{S-\text{Max}} - (e_{>80\text{F}} \times T_{G>80\text{F}})/2 \dots\dots (2)$$

Muai tak-terkendali (*unrestrained*); In.:

$$EX_{UR>80\text{F}} = (T_{\text{av}>80\text{F}} - 80) \times e_{>80\text{F}} \times (L \times 12) \dots (3)$$

Tegangan friksi, tengah bentang; psi:

$$S_{\text{Mid}} = (C_{f>80\text{F}} \times L/2 \times 1 \times t/2 \times G)/(12 \times t) (4)$$

Kekangan muai di setiap tepi; in:

$$EX_{R-\text{Edge}} = \{(S_{\text{Mid}}/2) - (L \times 12/2)\}/E_c \dots (5)$$

Muai penuh seluruh panjang; in:

$$EX_{Full>80F} = EX_{UR>80F} - (2 \times EX_{R-Edge}) \dots\dots\dots (6)$$

• **Perubahan Panjang pada < -7 °C (<20 °F)**

Temp permukaan Min. Rata-rata; °F :

Koefisien Termal <20 °F; in/°F :  $e_{<20F}$

Koef Friksi pada temp < 20 °F) :  $C_{f<20}$

Gradient temp <20 °F; °F/in :  $T_{G-<20F}$

Temperatur rata-rata di bawah 20 °F:

$$T_{av<20F} = T_{S-Min} - (e_{<20F} \times T_{G-<20F})/2 \dots\dots\dots (7)$$

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

$$EX_{UR<20F} = (T_{av<20} - 20) \times e_{<20F} \times (L \times 12) \dots\dots(8)$$

Tegangan friksi, tengah bentang; psi :

$$S_{Mid} = (C_{f<20} \times L/2 \times 1 \times t/2 \times G)/(12 \times t) \dots\dots\dots (9)$$

Kekangan muai di setiap tepi; in.

$$EX_{R-Edge} = \{(S_{Mid}/2) - (L \times 12/2)\}/E_c \dots\dots\dots (10)$$

Kontraksi penuh seluruh panjang, in.

$$EX_{R-Full<20F} = EX_{UR<20F} - (2 \times EX_{R-Edge}) \dots\dots\dots(11)$$

• **Total Perubahan Panjang pada**

**Temperatur (20 - 80)°F atau (- 7 - +27)°C**

Koefisien Termal Rata-rata; in/°F:  $e_{Avg}$

Faktor perubahan panjang akibat kelembaban pada (20 - 80) °F atau (- 7 - 27) °C; in/in :

$e_{Ex-Moist}$

Muai antara (20 & 80) °F (-7 & 27) °C; in:

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

Pengurangan panjang akibat kelembaban; in:

$$EX_{Moist} = e_{Ex-Moist} \times L \times 12 \dots\dots\dots (13)$$

Penyesuaian panjang; in:

$$L_{adj} = EX_{UR-Avg} - EX_{Moist} \dots\dots\dots (14)$$

Muai antara (80-130) °F (27-55) °C; in:

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

Kontraksi ant.(- 20 & +20) °F(-29 & -7) °C; in:

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

Total perubahan panjang Tahunan; in:

$$EX_{Tot-Ann} = L_{Adj} + EX_{R-Full>80F} + EX_{R-Full<20F} \dots\dots\dots (15)$$

Contoh perhitungan perubahan panjang di daerah beriklim sub-tropis dan iklim tropis disajikan dalam Tabel 4 dan Tabel 5.

**Langkah Perhitungan**

- Asumsi tebal panel sebesar minimum 0,65 kali untuk jalan raya dan 0,6 kali untuk bandara terhadap beton konvensional.
- Panjang perkerasan beton prategang antara 90 m dan 180 m. Untuk daerah panas disarankan lebih pendek.
- Tegangan tarik:

**Di permukaan slab (arah melintang):**

- Hitung  $f_{(c+w)}$  atau tegangan fleksural kritis akibat *curling* dan *warping*, (Lihat Tabel 2)
- Hitung  $f_F$  atau tegangan tarik kritis akibat friksi tanah dasar. (Lihat Tabel 2). Untuk iklim tropis seperti di Indonesia, faktor dalam Tabel 2 dapat menggunakan kondisi musim panas.
- Hitung  $f_L$  = tegangan fleksural ijin akibat beban lalu lintas. (Gambar 1)

**Di bawah slab (arah memanjang):**

- Hitung  $f_{(c+w)}$  atau tegangan fleksural kritis akibat *curling* dan *warping*, (Lihat Tabel 3)
- Hitung  $f_F$  atau tegangan tarik kritis akibat friksi tanah dasar. (Tabel 2)
- Hitung  $f_L$  = tegangan fleksural ijin akibat beban lalu lintas. (Gambar 1)  
Ambil nilai tegangan tarik terbesar, di permukaan atau di bawah slab.
- 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*).
- Tentukan tegangan fleksural beton ijin:  
 $f_t = MR/FS$  ..... (16)  
MR dapat diestimasi dengan rumus  
 $MR = 9\sqrt{f'_c}$  ..... (17)  
 $f'_c$  : kuat tekan beton setelah 28 hari dalam satuan psi, atau  
 $MR = 0,75\sqrt{f'_c}$  ..... (18)  
 $f'_c$  : kuat tekan beton setelah 28 hari dalam satuan MPa.
- Cek bahwa prategang pada penampang perkerasan akibat friksi tegangan tarik  $f_F$  adalah berlebih (*exceeds*) minimum 100 psi (690 kPa):  $(f_F + 100) < f_p$  .....(19)
- 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.
- 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).

Hitung defleksi vertikal di ujung slab sesuai dengan grafik hubungan antara nilai modulus reaksi tanah dasar *k-Value* dan tebal slab dalam Gambar 1.

### Siklus Perubahan Panjang Tahunan pada Perkerasan

#### • 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  $80^\circ\text{F}$ ,  $T_{S-\text{Max}}$ ;  $^\circ\text{F}$ ,
- Temperatur permukaan minimum rata-rata di bawah  $20^\circ\text{F}$ ,  $T_{S-\text{Min}}$ ;  $^\circ\text{F}$ ,
- Gradien temperatur di atas  $80^\circ\text{F}$ ,  $T_{G>80\text{F}}$ ;  $\text{in}/^\circ\text{F}$ .
- Gradien temperatur di bawah  $20^\circ\text{F}$ ,  $T_{G<20\text{F}}$ ;  $\text{in}/^\circ\text{F}$ .
- Faktor friksi di atas  $27^\circ\text{C}$  ( $80^\circ\text{F}$ ),  $C_{F>80\text{F}}$ .
- Faktor friksi di bawah  $20^\circ\text{F}$ ,  $C_{F<20\text{F}}$
- Koefisien termal beton:
  - musim panas  $e_{>80\text{F}}$ ,  $\text{in}/^\circ\text{F}$ .
  - musim dingin  $e_{<20\text{F}}$ ,  $\text{in}/^\circ\text{F}$ .

**Tabel 2.** Tegangan Tarik Pada Permukaan Slab \*)

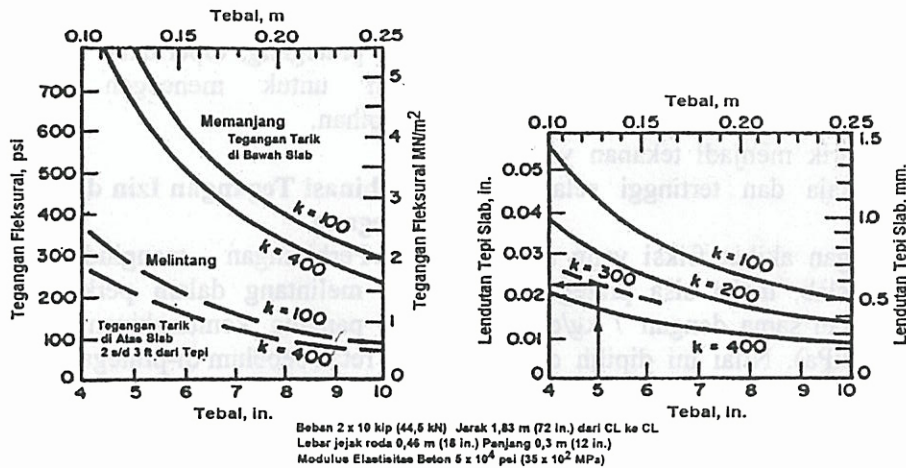
$E = 28.000 \text{ kg/cm}^2$  atau  $4 \times 10^6 \text{ psi}$  ( $28 \times 10^3 \text{ MPa}$ ),  $k = 300 \text{ pci}$  ( $82 \text{ MN/m}^3$ ).

Tipe Tegangan	Musim	Koef Termal Muai $e$ , atau Swelling, $w$	Termal Gradien $^\circ\text{C}/\text{cm}$ ( $^\circ\text{F}/\text{in.}$ )	Tegangan pada Slab								
				15 cm (6 in.)			20 cm (8 in.)					
				Kg/cm <sup>2</sup>	psi	kPa	Kg/cm <sup>2</sup>	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								
Panjang Slab (m)	Musim	Koef Friksi	Tegangan Friksi			15 cm (6 in.)			20 cm (8 in.)			
			Kg/cm <sup>2</sup>	psi	kPa	Kg/cm <sup>2</sup>	psi	kPa	Kg/cm <sup>2</sup>	psi	kPa	
$F_p$	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 3.** Batas Tegangan pada Dasar Slab

Musim	Tegangan Batas pada Dasar Slab Tebal						
	15 cm			20 cm			
	Kg/cm <sup>2</sup>	psi	kPa	Kg/cm <sup>2</sup>	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 <i>curling</i> dan <i>warping</i> 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



Sumber: American Concrete Institute (ACI 325.7R-88-16)

Gambar 1. Tegangan Fleksural Maksimum pada arah Memanjang dan Melintang, dan Lendutan Tepi pada Beban Sumbu 20 kip (90 kN)

Contoh perhitungan perubahan panjang disajikan dalam Tabel 4. Dalam Gambar 6 diperlihatkan hubungan antara temperatur dan muai-susut panel beton panjang 100 m, tebal 20 cm, pada temperatur minimum rata-rata tetap sebesar minus  $20^{\circ}\text{F}$  ( $-7^{\circ}\text{C}$ ).

• **Di Daerah Tropis**

Untuk daerah tropis seperti di Indonesia, fluktuasi temperatur udara dan temperatur perkerasan beton dengan tebal panel 20 cm ditunjukkan dalam Gambar 5. (A.Tatang Dachlan, Balitbang PU 2010). Temperatur terendah sekitar  $22^{\circ}\text{C}$  dan tertinggi  $42^{\circ}\text{C}$ . Perbedaan temperatur efektif terjadinya *curling* atau *warping* secara efektif sekitar  $4^{\circ}\text{C}$  pada siang hari dan  $9^{\circ}\text{C}$  pada petang dan malam hari. Untuk kondisi di Indonesia, kondisi temperatur di atas  $27^{\circ}\text{C}$  ( $80^{\circ}\text{F}$ ), parameter yang digunakan dalam Tabel 4 dapat digunakan. Untuk kondisi di bawah temperatur minus  $4^{\circ}\text{C}$  ( $20^{\circ}\text{F}$ ) tidak pernah terjadi. Karena itu perhitungan tahap 6 sampai dengan tahap 10 dalam Tabel 4 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  $80^{\circ}\text{F}$ ,  $T_{S-\text{Max}}$ ;  $^{\circ}\text{F}$ ,
- f. Temperatur permukaan minimum rata-rata di bawah  $20^{\circ}\text{F}$ ,  $T_{S-\text{Min}}$ ;  $^{\circ}\text{F}$ ,
- g. Gradien temperatur di atas  $80^{\circ}\text{F}$ ,  $T_{G>80^{\circ}\text{F}}$ ; in/ $^{\circ}\text{F}$ .
- h. Faktor friksi di atas  $80^{\circ}\text{F}$ ,  $C_{F>80^{\circ}\text{F}}$ .
- i. Koefisien termal beton  $e_{>80^{\circ}\text{F}}$ , in/ $^{\circ}\text{F}$ .

Contoh perhitungan perubahan panjang di daerah tropis (Buntu-Kebumen) disajikan dalam Tabel 5 dan tipikal fluktuasi temperatur dan muai-susut perkerasan beton disajikan dalam Gambar 6.

**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 2 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  $28.000 \text{ kg/cm}^2$  atau  $4 \times 10^6 \text{ psi}$  ( $28 \times 10^3 \text{ MPa}$ ).

**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  $250 \times 10^{-6}$  sampai  $100 \times 10^{-6}$ , dengan kuat tekan minimum  $10,5 \text{ kg/cm}^2$  atau  $150 \text{ psi}$  ( $1035 \text{ kPa}$ ). Kombinasi tegangan batas relatif kecil seperti ditunjukkan dalam Tabel 3. 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  $7 \text{ kg/cm}^2$  atau  $100 \text{ psi}$  ( $690 \text{ kPa}$ ). Nilai ini dipilih dari pengalaman untuk mengurangi atau memperkecil perubahan retak melintang di tengah bentang slab. Artinya tegangan minimum pada ujung slab  $240 \text{ psi}$  ( $1656 \text{ kPa}$ ) untuk panjang slab  $120 \text{ m}$ , dan  $310 \text{ psi}$  ( $2140 \text{ kPa}$ ) untuk panjang slab  $180 \text{ m}$  (lihat di bagian bawah Tabel 2). Tegangan akibat friksi di musim dingin  $140 \text{ psi}$  dan  $210 \text{ psi}$ , masing-masing untuk panjang slab  $400 \text{ ft}$  dan  $600 \text{ ft}$ . Prategang minimum adalah proporsional terhadap panjang slab, Jika koefisien friksi yang ada lebih besar maka tingkat prategang harus dinaikkan lebih tinggi.

#### Tegangan Akibat Beban Lalu Lintas

Tegangan fleksural pada arah melintang dan memanjang pada slab tebal ( $10\text{-}23 \text{ cm}$  ( $4\text{-}9 \text{ in.}$ ) lebar  $3,65 \text{ m}$  ( $12 \text{ ft}$ ) dengan beban  $90 \text{ kN}$  ( $20 \text{ kip}$ ) beban sumbu tunggal ditunjukkan dalam Gambar 1. Grafik dikembangkan menggunakan metoda iterasi *sector analysis* (Friberg 1957). Metoda lainnya dengan *multylayer 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  $20 \text{ kip}$  ( $90 \text{ kN}$ ). Untuk tepi perkerasan jalan, lendutan maksimum izin adalah  $0,75 \text{ mm}$  ( $0,03 \text{ in.}$ ). Dalam Gambar 1, disyaratkan agar lendutan yang terjadi kurang dari  $0,75 \text{ mm}$  ( $0,03 \text{ in.}$ ) dengan modulus reaksi tanah  $k = 300 \text{ pci}$  ( $81,6 \text{ MN/m}^3$ ) atau CBR 30% (Austroad, 1992) diperoleh tebal  $13 \text{ cm}$  ( $5 \text{ in.}$ ) sebagai contoh tebal minimum.

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

#### 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  $100 \text{ psi}$  ( $690 \text{ kPa}$ ). 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 (ACI Committee, 1998).

#### Sambungan Perkerasan Beton Prategang

##### Dimensi Perkerasan Beton Prategang

Dimensi perkerasan beton prategang umumnya dirancang dengan panjang  $120 \text{ m}$  sampai  $180 \text{ m}$ . Pada sambungan melintang cukup dipasang gap-slab pendek dengan lebar  $0,6 \text{ m}$  tetapi secara struktural antara  $1,8 \text{ m}$  dan  $2,4 \text{ m}$ . *Strand* dipasang sejauh  $12,5 \text{ mm}$  ( $\frac{1}{2} \text{ in.}$ ) 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  $\frac{1}{12} \times$  tebal slab di bawah garis eksentrisitas. Bila tebal slab  $200 \text{ mm}$  maka *strand* dapat dipasang sejauh  $200/12 + 200/12 = 117 \text{ mm}$  dari permukaan slab.

Panjang *strand* (7 untaian kawat baja) mempunyai elongasi sekitar  $0,75 \text{ m}/100 \text{ m}$  ( $9 \text{ in}/100 \text{ ft}$ ) atau  $0,75\%$  untuk penarikan penuh  $80\%$  kuat tarik ultimit baja  $270.000 \text{ psi}$  ( $1850 \text{ MPa}$ ). 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 2 dan sambungan tunggal dalam Gambar 3.

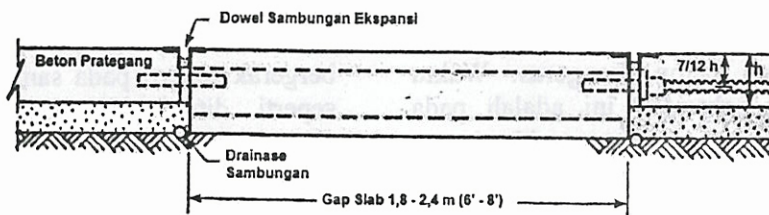
### Pelaksanaan Sambungan Ganda

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 2.

Dengan sambungan ganda pada sambungan muai di setiap ujung *gap-slab* pendek lebih baik dari pada sambungan tunggal

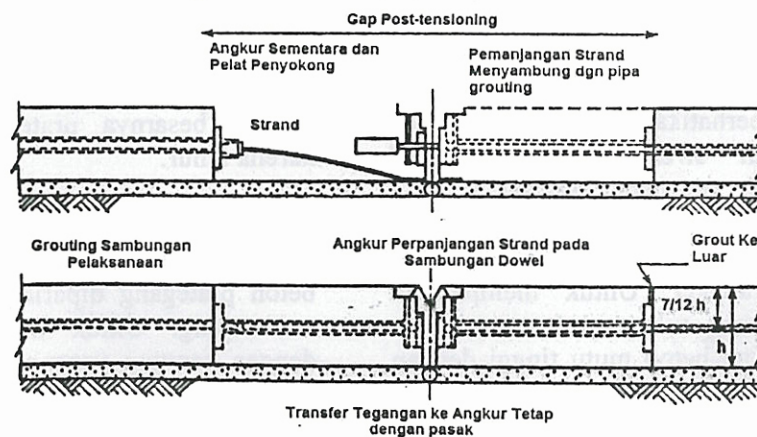
yang mempunyai gerakan kecil (gerakan ekspansi sekitar setengahnya bila dengan sambungan tunggal. Lebar sambungan mirip dengan konvensional. Untuk mencegah gerakan yang besar dapat digunakan *gap-slab* tebal yang mengunci pada pondasi bawah. Lihat Gambar 2. *Gap-slab* yang pendek lebih menguntungkan karena *warping* memanjang yang terjadi tidak terlalu signifikan. Angkur akan menahan *warping* dan mengurangi defleksi akibat *warping* dan *curling*.

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.



Sumber: American Concrete Institute (ACI 325.7R-88-10)

**Gambar 2.** Sambungan Ganda pada Kontruksi Perkerasan Prategang. *Gap-slab* ditempatkan setelah Post-Tensioning Slab Utama Selesai



Sumber: American Concrete Institute (ACI 325.7R-88-16)

**Gambar 3.** Sambungan Tunggal pada Konstruksi Perkerasan Prategang untuk Memperoleh Slab Prategang Panjang

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 menciptakan 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.

#### 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 angker. 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.

#### 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.

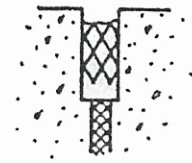
Di iklim sub-tropis, sambungan menjadi lebar pada musim dingin, dan merapat pada musim panas, yang mungkin dapat merusak penutup sambungan (*joint seal*) atau terjadi *spalling* pada sambungan. Sambungan muai antara slab yang panjang pada umumnya bergerak seperti pada sambungan di jembatan, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4a dan Gambar 4b. Jika lebar sambungan ekspansi kurang dari 32 mm seperti untuk sambungan ganda, dapat ditutup dengan penekanan *sealant* jenis *cellular neoprene*, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4c.

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

#### 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. (Nantung, 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 ( $\frac{3}{8}$  in.) dan 12,5 mm ( $\frac{1}{2}$  in.) masing masing untuk sambungan memanjang dan melintang. (AASHTO 1993, Seksi 3.3.3; II-30).



c) Lebar Sambungan Perkerasan Prategang yang relatif Pendek untuk Gerakan kecil

Sumber: American Concrete Institute (ACI 325.7R-88-13)

Gambar 4. Detil Sambungan Muai dalam Perkerasan Beton Prategang

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 (20) berikut:

$$\Delta L = \frac{CL(\alpha_c \times \Delta T + Z)}{S} \times 100 \dots\dots\dots (20)$$

- $\Delta L$  = 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.
- $\Delta T$  = Perbedaan temperatur  $^{\circ}$ F.
- Z = Koefisien susut kering  $(2 - 8) \times 10^{-4}$  in./in.

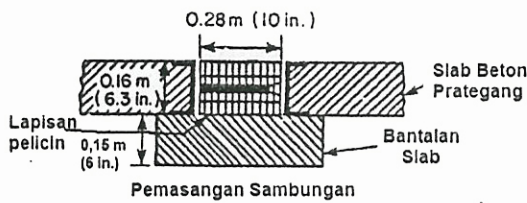
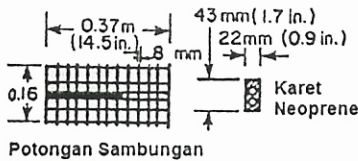
Lebar sambungan muai harus didasarkan atas pengalaman, dan mungkin lebih besar dari pada sambungan kontraksi. Untuk bahan penutup yang sudah jadi (*pre mold*) harus ditekan sampai antara 20% dan 50% lebar celah nominal. Bahan penutup harus dipasang di bawah permukaan sedalam 3 mm sampai 12,5 mm. Lebar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

**Contoh Perhitungan**

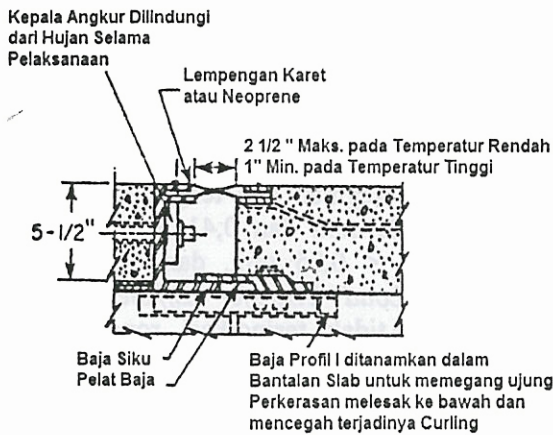
**Contoh Perhitungan Perubahan Panjang, Daerah Sub-tropis**

Data teknis slab beton di daerah sub-tropis:

- a. Tebal slab 15 cm (6 in.).



a) Metoda Pemasangan Sambungan untuk Slab Panjang dengan Gerakan Lebar



b) Metoda Pemasangan Sambungan yang diusulkan oleh ACI Committee untuk perkerasan prategang panjang dengan gerakan lebar (1968)

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

Dalam Tabel 4 ditunjukkan tahap per-hitungan perubahan panjang. Dalam Gambar 6 diperlihatkan hubungan antara temperatur dan muai-susut panel beton panjang 100 m, tebal 20 cm, pada temperatur minimum rata-rata tetap sebesar minus  $7^\circ\text{C}$  ( $20^\circ\text{F}$ ).

#### 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  $\rightarrow f'_c = 0,83 \times 400 = 332 \text{ kg/cm}^2 = 4742,9 \text{ psi}$

Modulus Elastisitas =  $E_c = 57000 \sqrt{f'_c} = = 3.925.499 \text{ psi}$

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

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

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

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

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

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

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  $27^\circ\text{C}$  sebesar  $7 \text{ mm}$ , dan akibat musiman setelah dikurangi penyesuaian panjang muai akibat kelembaban, minus  $1,0 \text{ mm}$  ( $-0,39 \text{ in.}$ ) sehingga total perubahan panjang tahunan menjadi minus  $2,3 \text{ mm}$ . Lihat Tabel 5. Dalam Gambar 5 diilustrasikan perubahan panjang akibat temperatur dan kelembaban, yang diukur langsung di lapangan.

Bila kondisi muai penuh, panjang panel dalam Tabel 4 untuk iklim sub-tropis dan pada Tabel 5 untuk iklim tropis, dihitung dengan Rumus (20), maka lebar celah sambungan (*joint opening*), adalah sebagai berikut:

#### Sub-tropis:

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

#### Tropis:

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

Dalam Gambar 6 diperlihatkan perbedaan muai-susut panjang slab untuk mengakomodasi lebar celah sambungan muai. Muai-susut di daerah tropis (Buntu-Kebumen) dengan temperatur beton  $50^\circ\text{C}$ , 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  $0,21 \text{ mm}$  dan  $0,41 \text{ mm}$ , atau rata-rata  $0,28 \text{ mm} < 0,75 \text{ mm}$ , dan efisiensi transfer beban (*Load Transfer Efficiency*)  $> 82\%$ , sehingga tidak terindikasi rongga di bawah sambungan yang menyebabkan *pumping*. Dalam Gambar 7 diperlihatkan pemasangan tendon memanjang pada ujicoba skala penuh di Buntu-Kebumen dan kondisi visual sampai umur satu tahun.

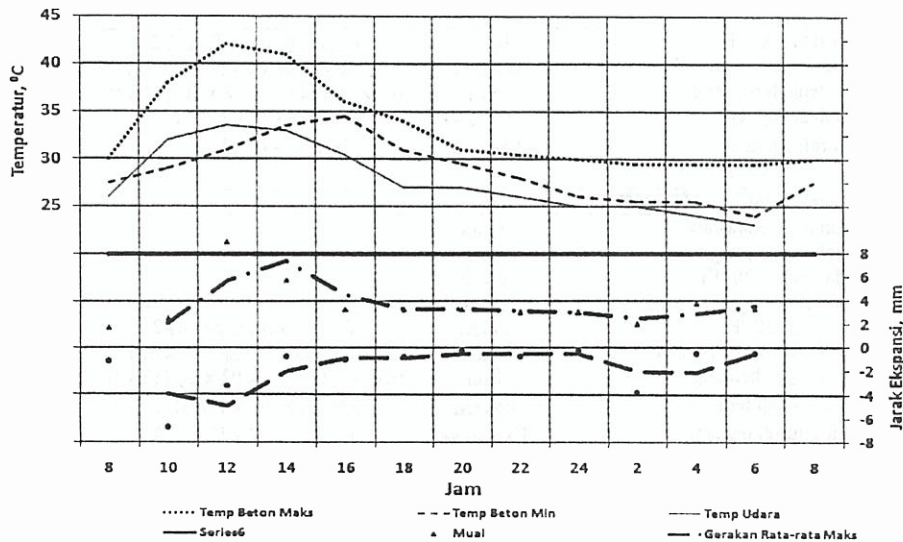
**Tabel 4.** Contoh Perhitungan Perubahan Panjang Tahunan Slab Beton (Sub-Tropis)

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

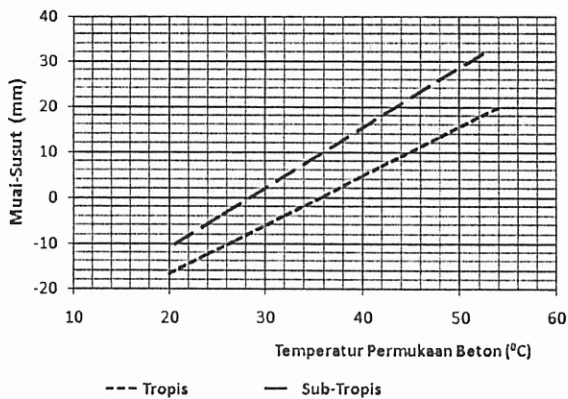
**Tabel 5.** Contoh Perhitungan Perubahan Panjang Tahunan Slab Beton di Buntu-Kebumen (Tropis)

Parameter	Simbol	Formula	Satuan	Hasil Perhitungan
Tebal Slab	t		in	8
Panjang Slab	L		ft	328,1
Berat volume Beton	G		lb/ft <sup>3</sup>	149,6
Modulus elastis beton	E <sub>c</sub>		psi	4.353.589
<b>Temperatur muai terkendali, &gt; 27 °C (80 °F)</b>				
Temp permukaan Maks. rata-rata	T <sub>CS-Max</sub>		°F	80
Temp permukaan Min. Rata-rata	T <sub>S-Min</sub>		°F	108
Koefisien Termal musim panas	e <sub>&gt;80F</sub>		in/°F	0,000006
Koef Friksi	C <sub>F-80F</sub>			0,5
Gradient temp musim panas	T <sub>G-&gt;80F</sub>		°F/in	3,67
1 Temperatur rata-rata > 80 °F	T <sub>av&gt;80 F</sub>	$T_{S-Max} - (e_{>80F} \times T_{G->80F})/2$	°F	92,9
2 Muai tak-terkendali ( <i>unrestrained</i> )	EX <sub>UR-&gt;80F</sub>	$(T_{av>80 F} - 80) \times e_{>80F} \times (L \times 12)$	in	0,31
3 Tegangan friksi, tengah bentang	S <sub>Mid</sub>	$(C_{F-80F} \times L/2 \times 1 \times t/2 \times G)/(12 \times t)$	psi	63,91
4 Kekangan muai di setiap tepi	EX <sub>R-Edge</sub>	$\{(S_{Mid}/2) - (L \times 12/2)\}/E_c$	in	0,01
5 Muai penuh seluruh panjang	EX <sub>Full-&gt;80F</sub>	$EX_{UR->80F} - (2 \times EX_{R-Edge})$	in	0,28
<b>Perubahan panjang rata-rata tak-terkendali musiman untuk Temperatur antara +20 0F dan +80 0F (- 7 0C dan 27 0C)</b>				
Koefisien Termal Rata-rata	e <sub>AvG</sub>		in/°F	0,000006

Parameter	Simbol	Formula	Satuan	Hasil Perhitungan
Faktor perubahan panjang akibat kelembaban pada Sum-Win	$C_{Ex-Moist}$		in/in	0,0001
6 Muai ant (20 & 80) °F	$EX_{UR-Avg}$	$(T_{R-E>80F}-20) \times C_{Avg} \times (L \times 12)$	in	0,03
7 Pengurangan panjang akibat kelembaban	$EX_{Moist}$	$C_{Ex-Moist} \times L \times 12$	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



Gambar 5. Tipikal Fluktuasi Temperatur dan Muai-Susut pada Sambungan di Buntu-Kebumen (per September 2010)



Gambar 6. Tipikal Trend Muai-susut di Sub-Tropis dan Tropis, Variasi Temperatur Permukaan Beton

### 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/cm<sup>2</sup>.
- Modulus elastisitas beton,  $E_C = 4 \times 10^6$  psi (28 x 10<sup>6</sup> kPa), 28 x 10<sup>4</sup> kg/cm<sup>2</sup>.
- Modulus of subgrade reaction di atas lapisan subbase,  $k = 300$  pci (82 MN/m<sup>3</sup>).

### Solusi:

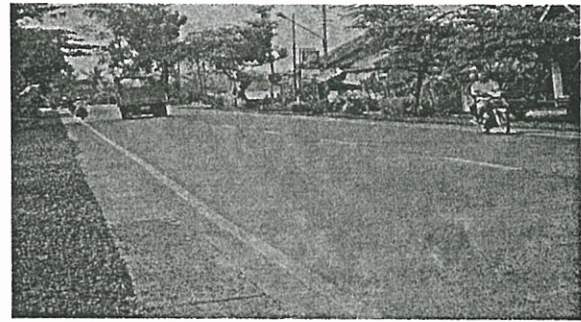
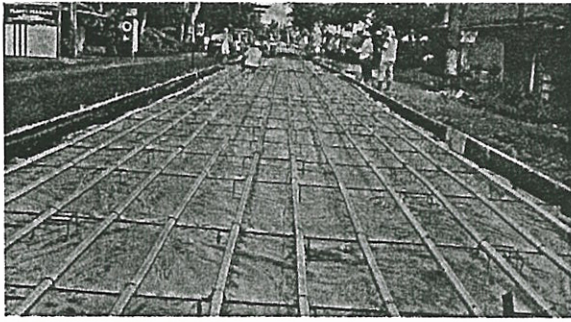
- Anggap panjang slab beton prategang dengan jarak muai  $t = 150$  m (500 ft), dan jenis konstruksi sambungan ganda digunakan.
- Coba tebal 0,178 m (7 in.)

### Tegangan tarik di atas dan ujung slab arah melintang:

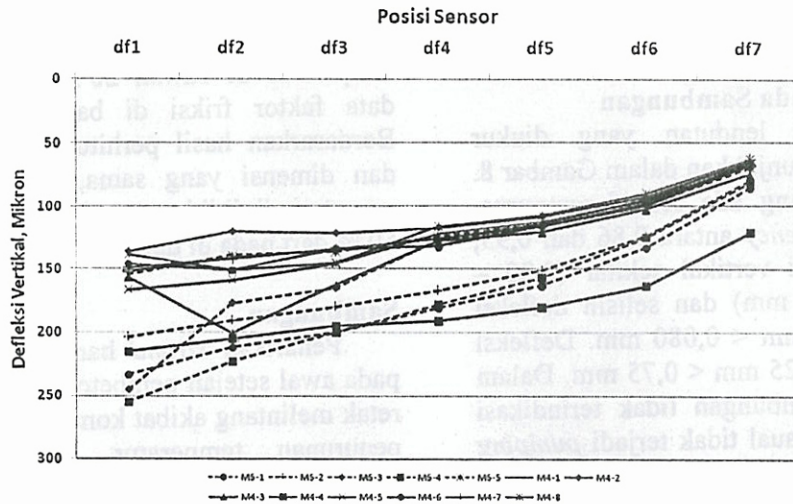
$$f_{(c+w)} = (282+346)/2 = 314 \text{ psi}$$

Menentukan  $f_f$ , untuk  $L = 150$  m (500 ft): (dari Tabel 2, interpolasi antara tebal 6 inci dan 8 inci diambil nilai pada musim panas):

- $f_f$  untuk tebal 6 in.:  $(380 + 430)/2 = 405$  psi.
- $f_f$  untuk tebal 8 in.:  $(445+495)/2 = 470$  psi.



Gambar 7. Pemasangan Tendon pada Ujicoba Skala Penuh (atas), dan Kondisi Umur Satu Tahun (bawah), Buntu-Kebumen (Dachlan AT, Des 2010)



Gambar 8. Cekung lendutan perkerasan beton prategang (Buntu-Kebumen)

-  $f_F$  untuk tebal 7 in.:  $(405 + 470)/2 = 437,5$  psi.  
 $f_L = 150$  psi (dari Gambar 1).  
 $f_{(c+w)} + f_F + f_L = 314 + 437,5 + 150$   
 $= 901,5$  psi.

**Tegangan tarik di bawah ujung slab arah memanjang:**

$f_{(c+w)} = (30 + 60)/2 = 45$  psi (dari Tabel 3, interpolasi)  
 $f_F = (140+210)/2 = 175$  psi (dari Tabel 2)  
 $f_L = 425$  psi (dari Gambar 1)  
 $f_{(c+w)} + f_F + f_L = 45 + 175 + 425 = 645$  psi.

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

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

$$FS = 2$$

$$f_t = MR/FS = 636/2 = 318 \text{ psi}$$

dari rumus (1) :  $(f_t + f_p) > (f_{(c+w)} + f_F + f_L)$

$f_t + f_p = 901,5$ , maka

$f_p = 901,5 - f_t = 901,5 - 318 = 583,5$  psi  
 $(4084,5 \text{ kPa}) < 650$  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 cm dari permukaan slab.

Dengan cara yang sama dalam Tabel 4, untuk  $E_c = 4.000.000$  psi, panjang slab 150 m (500 ft) dan tebal 17,8 cm (7 in.), maka lebar celah sambungan di antara sambungan muai sama dengan  $3,08 / 2 = 1,54$  in. atau 39 mm. Dari Gambar 1 (untuk tebal 7 in. dan  $k = 300$  pci), lendutan tepi yang terjadi 0,015 in. = 0,38 mm < 0,75 mm (0,03 in.) sehingga cukup aman terhadap deformasi vertikal (ACI 325.7R-15).

## HASIL PENGAMATAN DAN PEMBAHASAN

### Defleksi Vertikal pada Sambungan

Tipikal cekung lendutan yang diukur dengan alat FWD ditunjukkan dalam Gambar 8. Seluruh lendutan yang ada relatif sempurna. *Load Transfer Efficiency* antara 0,86 dan 0,93, nilai tengah defleksi vertikal sekitar (0,20 – 0,413) mm (< 0,58 mm) dan selisih defleksi sekitar (0 – 0,014) mm < 0,080 mm. Defleksi maksimum sekitar 0,25 mm < 0,75 mm. Dalam kondisi tersebut, sambungan tidak terindikasi rongga dan secara visual tidak terjadi *pumping* sampai perkerasan beton berumur satu tahun.

### Kondisi Visual

Hasil penilaian kondisi visual ditemukan retak melintang pada jarak sekitar 70 meter pada umur beton muda sekitar 7 hari, yang disebabkan perawatan yang kurang optimal sehingga terjadi retak susut. Pada retak sudah dilakukan *grouting* dan sampai perkerasan jalan berumur satu tahun tidak terjadi perkembangan retak.

### Koefisien Termal

Di negara beriklim dingin (sub-tropis), retak pada beton terjadi bervariasi. Di daerah beriklim sub-tropis, retak terjadi pada fluktuasi temperatur antara 14°C sampai minus 9°C.

Di negara beriklim tropis seperti Indonesia hal ini tidak akan terjadi karena temperatur perkerasan tidak pernah mencapai di bawah 0°C, atau perbedaan tidak mencapai 34°C. Temperatur perkerasan bahkan tidak mengalami keadaan ekstrim yang dapat

menyebabkan pengembangan volume akibat anomali air, atau penyusutan volume beton akibat temperatur sampai minus 29°C (-20°F), yang dapat mengakibatkan retak pada beton dan mungkin lepasnya bonding bahan perapat (*sealant*), kecuali mungkin di Wamena atau puncak Irian Jaya (Papua).

### Perubahan Panjang di daerah Tropis

Untuk daerah tropis seperti di Indonesia, fluktuasi temperatur udara dan temperatur perkerasan beton tidak akan mengalami kondisi seperti di daerah sub-tropis sehingga perhitungan tidak memerlukan data gradien temperatur di bawah 20°F,  $T_{G<20F}$ ; in/°F, dan data faktor friksi di bawah 20°F,  $C_{F<20F}$ . Berdasarkan hasil perhitungan pada kekuatan dan dimensi yang sama, perubahan panjang yang terjadi di iklim tropis lebih pendek sekitar 50 % dari pada di daerah sub-tropis.

### Sambungan

Penarikan *strand* harus segera dilakukan pada awal setelah pembetonan untuk mencegah retak melintang akibat kontraksi dini dan akibat penurunan temperatur pada malam hari pertama. Penarikan tahap kedua dan ketiga dapat dilakukan pada akhir umur beton mencapai kuat tekan yang cukup dengan penarikan penuh (*full jacking force pressure*).

Untuk pekerjaan mendatang perlu dirancang mengkondisikan perkerasan beton arah yang di-*stressing* arah melintang, untuk menghindari retak yang disebabkan perbedaan waktu *stressing* atau perbedaan gaya tarik oleh mesin *stressing* arah memanjang yang tidak seimbang.

## KESIMPULAN

Dari uraian tersebut dapat diambil kesimpulan dan saran sebagai berikut:

- 1) Analisis perubahan panjang slab untuk mengakomodasi celah sambungan muai di iklim tropis seperti di Indonesia adalah sekitar 50% relatif lebih kecil dari pada di iklim sub-tropis.

- 2) Aplikasi perancangan perkerasan jalan beton prategang yang dilaksanakan di Buntu-Kebumen sampai umur sekitar satu tahun menunjukkan kinerja yang baik, tidak ada masalah rongga di bawah panel sebagai penyebab pumping, defleksi di tepi sambungan dan tengah-tengah slab, serta efisiensi transfer beban (*Load Transfer Efficiency*) dalam batas yang aman.

#### SARAN

Perancangan perkerasan jalan beton prategang saat ini diperlukan untuk menghadapi perkembangan teknologi baru dan memenuhi kelengkapan dokumen dalam proses perancangan dan pelaksanaan. Karena itu disarankan disusun pedoman perancangan perkerasan jalan beton semen dengan metode prategang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993. *Guide for Design Of Pavement Structures, Volume 1*. Washington, DC: AASHTO.
- American Concrete Institute Committee 325. 1998. *Recommendation for Designing Prestressed Concrete Pavements*. ACI 325.&R-88. Farmington Hills: ACI.
- Asphalt Institute. *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*. Manual Series 17. Lexington: Asphalt Institute.
- AUSTROADS. 2010. *Pavement Design; A Guide to the Structural Design Of Road Pavements*. Part II. Sydney: Austroads.
- AUSTROADS. 1992. *Pavement Design; A Guide to the Structural Design of Road Pavements*. Sydney: Austroads.
- Dachlan, A.T. 2009. *Laporan Pengkajian Dan Pengawasan Ujicoba Skala Penuh Perkerasan Beton Pracetak di Buntu-Kebumen, Jawa Tengah*. Bandung: Pusjatan.
- \_\_\_\_\_. 2010. *Laporan Monitoring Pemanfaatan Perkerasan Jalan Beton Semen dan Beton Pracetak*. Bandung: Pusjatan.
- Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah. 2003. *Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*. Pd T-14-2003. Jakarta: Departemen Kimpraswil.
- Luh, M. Chang, Yu-Tzu Chen and Sangwook Lee. 2004. *Using Precast Concrete Panels for Pavement Construction in Indiana*. Joint Transportation Research Program Project No. C-36-46X. Indiana: Purdue University.
- Merrit, David K. et al. 2000. *Fesibility of Using Precast Concrete Panels to Expedite Highway Pavement Construction*. FHA Research report 1517-1. Austin: FHA.
- Semesta Marga Raya (PT). 2009. *Proyek Pembangunan Jalan Tol Kanci – Pejagan*. Jakarta: PT Adhi Concrete Pavement System.