

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Tinjauan Umum

Bab ini menjelaskan tentang teori yang mendukung penulisan tugas akhir perencanaan *flyover* jombor yang meliputi beberapa teori tentang perencanaan struktur *flyover* dengan beton prategang. Perencanaan struktur *flyover* hanya perencanaan struktur atas *flyover*.

B. Pembebanan Rencana

Pada perencanaan pembebanan ini penulis menggunakan Standar Pembebanan Untuk Jembatan (RSNI T-02-2005). Peraturan tentang pembebanan ini mengacu pada tata cara perencanaan pembebanan jembatan jalan raya (SNI 03-1725-1989), Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan jalan raya (SNI 03-2833-1992), dan pedoman perencanaan beban gempa untuk jembatan (Pd. T-04-2004-B).

Beban rencana yang diperhitungkan pada perencanaan *flyover* Jombor ini terdiri dari:

1. Beban Rencana Individual:
 - a) Beban Permanen
 - b) Beban Lalu Lintas
 - c) Beban dari Lingkungan
2. Kombinasi Beban:
 - a) Kombinasi Pembebanan Kondisi Operasional
 - b) Kombinasi Pembebanan Dengan Beban Sementara (Angin, Suhu dan Gempa)

1 . Beban Permanen pada *Precast*

Beban permanen merupakan Beban mati tetap dan beban mati tambahan merupakan berat sendiri beton girder, slab lantai, aspal dan diaphragma

besarnya tergantung pada berat jenis komponen-komponen tersebut

Berat 1 buah diafragma (w)

$$W = V \times W_c \text{ kN/m}^3 \dots\dots\dots (3.1)$$

Berat diafragma

$$W_n = n \times w \dots\dots\dots (3.2)$$

Momen maksimum di tengah bentang L

$$M_{maks} = \left(\frac{1}{2} \times n \times X_2 - X_1 - X_0\right) \times W \dots\dots\dots (3.3)$$

Berat diafragma ekuivalen

$$Q_{diafragma} = 8 \times M_{maks} / L^2 \dots\dots\dots (3.4)$$

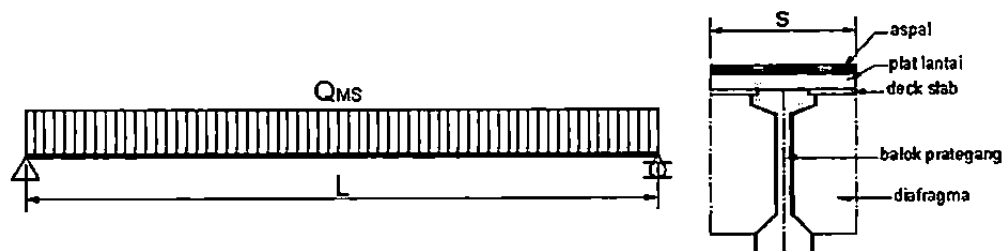
2) Berat Beton Prategang

Berat balok prategang + 10 %

$$W_{balok} = 1,10 \times A \times L \times W_c \dots\dots\dots (3.5)$$

$$Q_{balok} = W_{balok} / L \dots\dots\dots (3.6)$$

3) Gaya geser dan momen akibat berat sendiri (MS)



Gambar 3.1 Analisis Beban Mati pada Balok (*sumber : Ilham 2010*)

$$\text{Beban} : Q_{ms} = A \times W \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\text{Gaya geser} : V_{ms} = \frac{1}{2} \times Q_{ms} \times L \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\text{Momen} : M_{ms} = \frac{1}{8} \times Q_{ms} \times L^2 \dots\dots\dots (3.9)$$

b) Berat Mati Tambahan (MA)

1) Berat aspal dan air hujan

$$\text{Berat jenis aspal (} W_{as} \text{)} = 22 \text{ kN} / \text{m}^3$$

$$\text{Tebal aspal} = 0,2 \text{ m}$$

$$\text{Lebar tinjaun} = \text{lebar efektif}$$

$$\text{Beban: } Q_{as} = A \times W_{as} \text{ kN/m} \dots\dots\dots (3.10)$$

2) Berat Air Hujan

$$\text{Barat jenis air hujan (Wah)} = 9,8 \text{ Kn} / \text{m}^3$$

$$\text{Tinggi genangan air hujan} = 0,025 \text{ m}$$

$$\text{Lebar tinjauan} = \text{lebar efektif}$$

$$\text{Beban} : Q_{ah} = A \times \text{Wah} \text{ Kn} / \text{m}$$

$$Q_{ah} = (\text{tebal} \times \text{lebar tinjauan}) \times \text{berat jenis}$$

3) Gaya Geser dan Momen akibat Beban Mati Tambahan

$$\text{Gaya geser} : V_{ms} = 1/2 \times Q_{ms} \times L \dots\dots\dots(3.11)$$

$$\text{Momen} : M_{ms} = 1/8 \times Q_{ms} \times L^2 \dots\dots\dots(3.12)$$

2 . Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas merupakan beban lajur yang terdiri dari beban terbagi merata, (*uniformly distributed load*) UDL, dan beban garis (*Knife Edge Load*) KEL.

a) UDL mempunyai intensitas q (kPa) yang besarnya tergantung pada panjang total L yang dibebani dan dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$Q = 9,0 \text{ kPa} \quad \text{untuk } L \leq 30 \text{ m}$$

$$Q = 9,0 \times (0,5 + 1,5/L) \text{ kPa} \quad \text{untuk } L > 30 \text{ m}$$

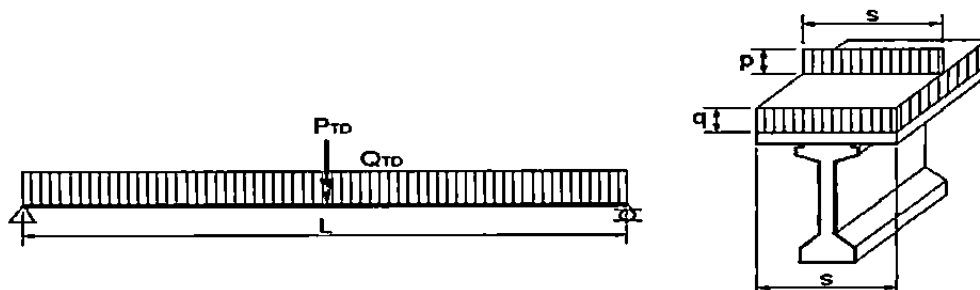
b) Faktor beban dinamis (*Dinamic load Allowwance*) untuk KEL diambil sebagai berikut:

$$DLA = 0,4 \quad \text{untuk } L \leq 50 \text{ m}$$

$$DLA = 0,4 - 0,0025 \times (L-50) \quad \text{untuk } 50 < L < 90 \text{ m}$$

$$DLA = 0,3 \quad \text{untuk } L \geq 90 \text{ m}$$

Berdasarkan (RSNI T-02-2005) Standar Pembabanan untuk jembatan, Untuk bentang (L) = 50 m maka KEL mempunyai intensitas $p = 49$, kN/ m



Gambar 2.3 Analisis Beban Lintas (D) pada Balok (sumber: Ilham 2010)

c) Beban Merata pada Balok

$$Q = 9,0 \times (0,5 + 15/L) \dots\dots\dots(3.13)$$

d) Beban Garis

$$Q_{td} = q \times s \dots\dots\dots(3.14)$$

e) Beban Terpusat pada Balok

$$P_{td} = (1 + DLA) \times p \times s \dots\dots\dots(3.15)$$

f) Gaya Geser dari Momen Maksimum pada Balok akibat Lajur D

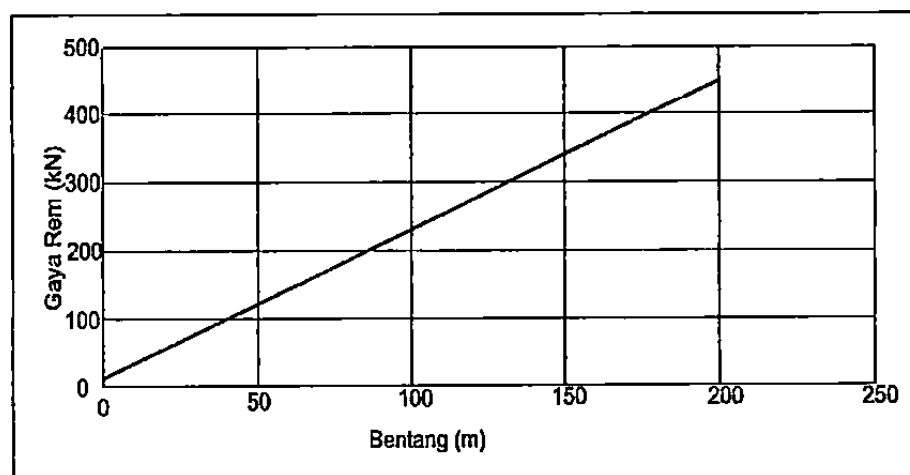
$$V_{td} = \frac{1}{2} \times Q_{td} \times L + \frac{1}{2} P_{td} \dots\dots\dots(3.16)$$

g) Momen Maksimum pada Balok akibat Beban Lajur D

$$M_{td} = \frac{1}{8} \times Q_{td} \times L^2 + P_{td} \times L$$

3. Gaya Rem (TB)

Pengaruh pengereman dari lalu lintas diperhitungkan ssebagai gaya dalam arah memanjang, dan dianggap bekerja pada jarak 1,8 m di atas permukaan lantai jembatan. Besar gaya rem arah memanjang jembatan tergantung panjang total jembatan (Lt) sebagai berikut: (RSNI T -02-2005 “Standar Pembebanan untuk jembatan”)



Gambar 5.14 Gaya Rem per lajur 2,75 m (TB)

(sumber : RSNI T-02-2005)

Gaya rem diterima satu balok dapat dihitung dengan 2 cara berikut dan diambil nilai terkecil:

1. $V_{td} = \frac{1}{2} \times Q_{td} \times L + \frac{1}{2} P_{td}$ (RSNI T-02-2005 “Standar Pembebanan untuk jembatan”)

Gaya rem HTB : 130 kN

Jumlah balok prategang untuk jalur selebar b1 (nbalok)

Gaya rem yang diterima 1 balok

$$T_{tb} = H_{tb} / n_{balok} \dots\dots\dots(3.17)$$

- b) Dari Peraturan RSNI 02-T-02-2005 Gaya rem $T_{tb} = 5\%$ beban lajur "D" tanpa faktor beban dinamis

$$T_{tb} = 0,05 \times (Q_{td} \times L + P_{td}) \dots\dots\dots(3.18)$$

Dimana :

$$Q_{td} = q \times s$$

$$P_{td} = p \times s$$

$$q = 9,0 \times (0,5 + 15/L)$$

$$p = 49 \text{ kN/m} \quad (RSNI \ T-02-2005)$$

$$s = \text{jarak antara balok prategang}$$

Kemudian dapat dihitung gaya geser dan momen maksimum akibat gaya rem yang ditinjau pada satu balok:

$$V_{tb} = M/L \dots\dots\dots(3.19)$$

$$M_{tb} = \frac{1}{2} \times M \dots\dots\dots(3.20)$$

Dimana :

M adalah beban momen akibat gaya rem

$$M = T_{tb} \times y \dots\dots\dots(3.21)$$

Y adalah lengan terhadap titik berat balok

$$Y = 1,80 + h_o + h_a + Y_{ac} \dots\dots\dots(3.22)$$

4. Beban Angin (EW)

- a) Beban garis merata tambahan arah horizontal pada permukaan lantai jembatan akibat angin yang meniup kendaraan di atas lantai jembatan dihitung dengan rumas :

$$T_{ew} = 0,0012 \times C_w \times (V_w)^2$$

$$C_w = \text{Koefesien seret} \quad (\text{Tabel 1.1})$$

$$V_w = \text{Kecepatan angin rencana} \quad (\text{Tabel 1.2})$$

Berdasarkan RSNI 02-T-2005 Tentang peraturan pmbebanan didapat nilai

Tabel 3.1 Koefisien Serat (Cw)

| Tipe Jembatan | Cw |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Bangunan atas massif : (1), (2) | |
| b/d = 1,0 | 2,1 (3) |
| b/d = 2,0 | 1,5 (3) |
| b/ ≥ 6,0 | 1,25 (3) |
| Bangunan atas rangka | 1,2 |
| Catatan (1) b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar sandaran D = tinggi bangunan atas, termasuk bagian sandaran yang massif | |
| Catatan (2) untuk harga antara dari b/d bisa diinterpolasikan | |
| Catatan (3) apabila bangunan atas mempunyai superelevasi, cw harus dinaikan sebesar 3 % untuk setiap derajat superelevasi, dengan kenaikan maksimum 2,5 % | |

Tabel 3.2 Kecepatan Angin Rencana (Vw)

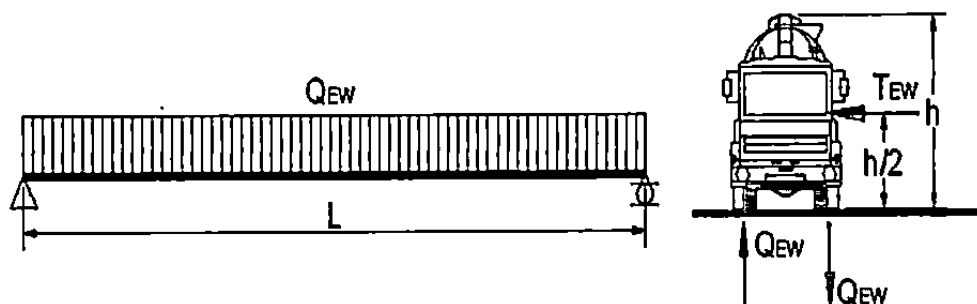
| Keadaan batas | lokasi | |
|---------------|-------------------------|--------------------|
| | Sampai 5 km dari pantai | > 5 km dari pantai |
| Daya layan | 30 m/s | 25 m/s |
| ultimit | 35 m/s | 30 m/s |

Bidang vertical yang ditiup angin merupakan bidang samping kendaraan dengan tinggi 2 m di atas lantai jembatan. Jarak antara roda kendaraan $x = 1,75$ m

b) Transfer Beban Angin ke lantai Jembatan

$$Q_{ew} = (1/2 \times h/x \times T_{ew}) \dots\dots\dots(3.23)$$

Panjang balok $L = 50$ m

**Gambar 3.4 Analisis Beban angin (EW) pada balok (sumber : Ilham 2010)**

c) Gaya Geser akibat Beban Angin

d) Momen Maksimum akibat Beban Angin

$$M_{ew} = 1/8 \times Q_{ew} \times L^2 \dots\dots\dots(3.25)$$

5. Beban Gempa (EQ)

a) Gaya Gempa

Gaya gempa vertical pada balok prategang dihitung dengan menggunakan percepatan vertikal ke bawah minimal sebesar $0,10 \times g$ (g = percepatan gravitasi) atau dapat diambil 50 % koefisien gempa horisontal statik *ekivalen*. Koefisien beban gempa horisontal :

$$K_h = C \times S$$

K_h = Koefisien beban gempa horisontal

C = Koefisien geser dasar untuk wilayah gempa, waktu getar dan kondisi Tanah setempat

S = faktor tipe struktur yang berhubungan dengan kapasitas penyerapan Energy gempa (daktalitas) dari struktur

Waktu getar struktur dihitung dengan rumus :

W_t = Berat total, berat sendiri dan beban mati tambahan

K_p = kekakuan struktur yang merupakan gaya horisontal yang diperlukan untuk menimbulkan satu satuan lendutan.

g = percepatan gravitasi bumi = 9,81 m/det

Berat total yang berupa berat sendiri mati tambahan

$$W_t = P_{ms} + P_{ma} \dots\dots\dots(3.26)$$

$$W_t = (Q_{ms} + Q_{ma}) \times L \dots\dots\dots(3.27)$$

b) Koefisien Beban Gempa Horisontal dan Vertical

Untuk lokasi di wilayah gempa di atas tanah sedang, dari kurva diperoleh koefisien geser dasar c . Berdasarkan RSNI T-02-2005 tentang peraturan pembebanan, didapat koefisien geser (c) dan faktor tipe struktur

Tabel 3.3 Koefisien Geser Dasar untuk Tekanan Tanah Lateral

| Daerah gempa (1) | Koefisien geser dasar C | | |
|---------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| | Tanah teguh | Tanah sedang | Tanah lunak |
| 1 | 0,20 | 0,23 | 0,23 |
| 2 | 0,17 | 0,21 | 0,21 |
| 3 | 0,14 | 0,18 | 0,18 |
| 4 | 0,10 | 0,15 | 0,15 |
| 5 | 0,07 | 0,12 | 0,12 |
| 6 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |

Tabel 3.4 Faktor Tipe Bangunan

| Tipe jembatan (1) | Jembatan dengan daerah sendi beton bertulang atau baja | Jembatan Dengan Daerah Sendi Beton Prategang | |
|-------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| | | Prategang parsial (2) | Prategang penuh (2) |
| Tipe A (3) | 1,0 F | 1,15 F | 1,3 F |
| Tipe B (3) | 1,0 F | 1,15 F | 1,3 F |
| Tipe C | 3,0 | 3,0 | 3,0 |

Catatan (1) Jembatan mungkin mempunyai tipe bangunan yang berbeda pada arah melintang dan memanjang, dan tipe bangunan yang sesuai harus digunakan untuk masing-masing arah.

Catatan (2) Yang dimaksud dalam table ini, beton prategang parsial mempunyai prapengetangan yang cukup untuk kira-kira mengimbangi pengaruh dari beban tetap rencana dan selebihnya diimbangi oleh tulangan biasa. Beton prategang penuh mempunyai prapengetangan yang cukup untuk mengimbangi pengaruh beban total rencana.

Catatan (3) $F = \text{Faktor perangkaan}$
 $= 1,25 - 0,025 n ; F \geq 1,00$
 $n = \text{jumlah sendi plastis yang menahan deformasi arah lateral pada masing-masing bagian monolit dari jembatan yang berdiri sendiri-sendiri (misalnya : bagian-bagian yang dipisahkan oleh sambungan siar muai yang memberikan keleluasan untuk bergerak dalam arah lateral secara sendiri-sendiri)}$

Catatan (4) Tipe A : Jembatan daktail (bangunan atas bersatu dengan bangunan bawah)

Tipe B: jembatan daktail (bangunan atas terpisah dengan bangunan bawah)

Tipe C: jembatan tidak daktail (tanpa sendi plastis)

Dengan : $F = 1,25 - (0,025 \times n)$ dan F harus diambil ≥ 1

F = Faktor penrangkaan

n = Jumlah sendi plastis yang menahan deformasi arah lateral

untuk $n = 1$ maka $F = 1,25 - (0,025 \times n)$

Faktor tipe struktur $s = 1,3 \times F$

Koefisien beban gempa horizontal

$$K_h = C \times S \dots\dots\dots(3.28)$$

Koefisien beban gempa vertical

$$K_v = 50 \% \times K_h > 1$$

Maka diambil $K_v = 0,1$

c) Gaya Gempa

Gaya gempa vertical

$$T_{eq} = K_v \times W_t \dots\dots\dots(3.29)$$

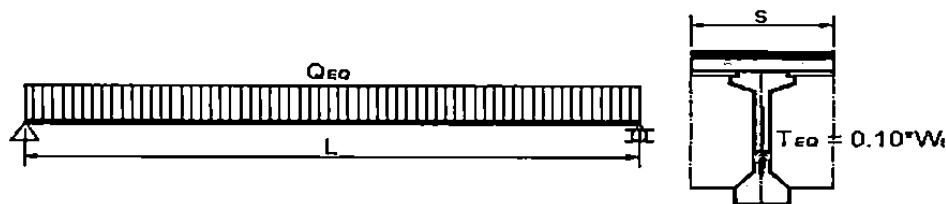
Beban gempa vertical

$$Q_{eq} = T_{eq}/L \dots\dots\dots(3.30)$$

d) Gaya geser dan Momen Maksimum akibat Gempa Vertical

$$V_{ms} = \frac{1}{2} \times Q_{eq} \times L \quad \text{kN} \dots\dots\dots(3.31)$$

$$M_{ms} = \frac{1}{8} \times Q_{eq} \times L^2 \quad \text{kN/m} \dots\dots\dots(3.32)$$



Gambar 3.5 Analisis Beban Gempa (EQ) pada Balok (sumber : Ilham 2010)

6. Perhitungan Momen di Tengah bentang

Momen di tengah bentang dapat dihitung dengan analogi persamaan perhitungan momen di tengah bentang pada balok di atas dua perletakan sendi-rol.

7. Pembebanan pada Slab

Lantai jembatan berfungsi sebagai lantai untuk lalu lintas, merupakan pelat sedemikian sehingga mampu mendukung beban. Biasanya dipasang pada arah melintang jembatan diatas pelagar. Pada perencanaan jembatan layang

jombor direncanakan menggunakan pelat satu arah. Pelat satu arah yaitu yang hanya ditumpu pada dua sisi yang saling berhadapan, ataupun pelat yang ditumpu pada keempat sisinya tetapi $L_y/L_x > 2$, sehingga hampir seluruh beban dilimpahkan pada sisi pendek.

a) Berat Sendiri (MS)

Faktor beban ultimit : $K_{ms} = 1,3$ (RSNI T-02-2005)

Berat sendiri $Q_{ms} = b \times h \times W_c$ (3.33)

b) Beban Mati Tambahan (MA)

Faktor beban ultimit : $K_{ma} = 2,0$ (RSNI T-02-2005)

Lapisan aspal = 0,1 m

Air hujan = 0,2 m

Beban mati aspal $Q_{aspal} = 0,1 \times W_{as}$

Beban mati air $Q_{air} = 0,05 \times W_{air}$

Beban mati tambahan $Q_{ma} = Q_{aspal} + Q_{air}$ (3.34)

c) Beban Hidup Truk "T" (TT)

Faktor beban ultimit : $K_{tt} = 2$ (RSNI T-02-2005)

Beban hidup (TT) = 146,25 kN

Faktor baban dinamis = 0,3

Beban hidup $P_{tt} = (1 + DLA) \times T$ (3.35)

d) Beban Angin (EW)

Faktor baban ultimit : $K_{ew} = 1,2$

1) Beban garis merata tambahan arah horizontal pada permukaan lantai jembatan akibat angin yang meniup kendaraan di atas lantai jembatan dihitung dengan rumas :

$$T_{ew} = 0,0012 \times C_w \times (V_w)^2$$

C_w = Koefesien Seret (Tabel 1.5)

V_w = Kecepatan Angin Rencana (Tabel. 1.6)

Bidang vertical yang ditiup angin merupakan bidang samping kendaraan dengan tinggi 2 m di atas lantai jembatan. Jarak antara roda kendaraan kendaraan $x = 1,75$ m. Berdasarkan RSNI 02-T-2005 Tentang peraturan

Tabel 3.5 Koefisien Serat (Cw)

| Tipe Jembatan | Cw |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Bangunan atas massif : (1), (2) | |
| b/d = 1,0 | 2,1 (3) |
| b/d = 2,0 | 1,5 (3) |
| b/ ≥ 6,0 | 1,25 (3) |
| Bangunan atas rangka | 1,2 |
| Catatan (1) b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar sandaran d= tinggi bangunan atas, termasuk bagian sandaran yang massif | |
| Catatan (2) untuk harga antara dari b/d bisa diinterpolasikan | |
| Catatan (3) apabila bangunan atas mempunyai superelevasi, cw harus dinaikan sebesar 3 % untuk setiap derajat superelevasi, dengan kenaikan maksimum 2,5 % | |

Tabel 3.6 Kecepatan Angin Rencana (Vw)

| Keadaan batas | lokasi | |
|---------------|-------------------------|--------------------|
| | Sampai 5 km dari pantai | > 5 km dari pantai |
| Daya layan | 30 m/s | 25 m/s |
| ultimit | 35 m/s | 30 m/s |

e) Transfer Beban Angin ke lantai Jembatan

$$Q_{ew} = (1/2 \times h/x \times T_{ew}) \dots\dots\dots(3.36)$$

Panjang balok L = 50 m

f) Perencanaan Tulangan Plat lantai

Perencanaan tulangan pada plat lantai adalah sama seperti pada perhitungan tulangan dinding pagar tepi. Namun demikian ada sedikit perbedaan table berikutnya yaitu pada perencanaan tulangan pelat lantai juga dihitung tulangan susut, tulangan susut, tulangan susut tersebut berfungsi mencegah terjadinya susut atau retak-retak pada pelat lantai. Adapun rumus yang digunakan untuk mencari luas tulangan susut yang dibutuhkan adalah pada sedangkan untuk menghitung jarak tulangan yang diperlukan.

B. ANALISA PCI GIRDER

Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan

tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal. Tegangan internal diperoleh dengan memberikan tekanan (gaya prategang) pada beton sebelum beban luar bekerja. (*sumber: ACI*).

1. Konsep dasar Beton Prategang

Untuk menjelaskan sifat dasar beton prategang, menurut *T.Y.Lin* dikenal ada 3 konsep yaitu:

a) **System Prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis**

Beton yang bersifat getas ditransformasikan menjadi bahan yang bersifat elastis, dengan cara memberi tekanan / desakan terlebih dahulu (gaya prategang. Maka dalam hal ini tidak terjadi tegangan tarik pada beton (*full-prestress* / prategang penuh

b) **Sistem Prategang sebagai kombinasi baja mutu tinggi dengan beton**

untuk memanfaatkan seluruh kekuatan baja mutu tinggi yang dipergunakan, baja ditarik terlebih dahulu dan dijangkarkan ke beton. Dengan demikian diperoleh tegangan dan regangan yang diinginkan untuk kedua bahan.

c) **Sistem Prategang untuk mencapai keseimbangan beban**

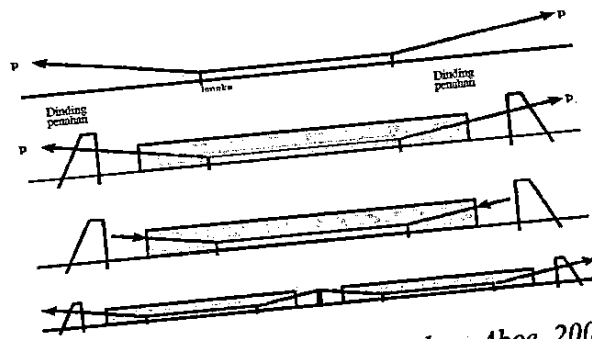
Pemberian gaya prategang sebagai suatu usaha membuat seimbang komponen struktur yang mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan tertentu. Tendon dengan profil parabola, maka untuk dapat tetap mempertahankan posisinya diperlukan gaya vertical ke bawah. Karena tendon terbungkus beton, maka akan timbul gaya ke atas menekan beton, yang berlawanan arah dengan gaya untuk mempertahankan posisi tendon.

2. Sistem Prategang

Sistem penarikan baja prategang dapat dilakukan dengan dua cara yaitu:

a) **Pratarik (*pre-tensioning*)**

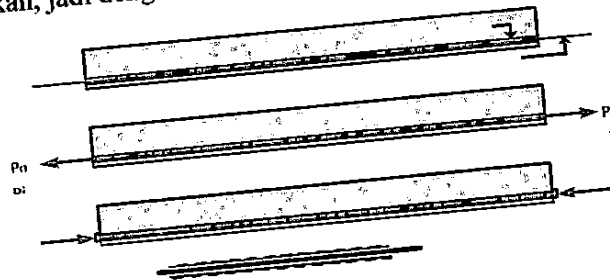
Yaitu penarikan baja dilakukan sebelum pengecoran beton. Pada penarikan awal, untuk mempercepat proses penarikan beton 60% - 80% kekuatan yang diwartakan yaitu pada umur 28 hari



Gambar 3.6 Sistem Pratarik (sumber: Aboe, 2006)

b) Pascatarik (*post-tensioning*)

Yaitu kebalikan dari sistem pratarik dimana penarikan baja dilakukan setelah beton mengeras. Bila kekuatan beton yang diperlukan telah tercapai, maka baja ditegangkan diujung-ujungnya dan dijangkar. Gaya prategang ditransfer ke beton melalui jangkar pada saat baja ditegangkan, jadi dengan demikian beton ditekan.



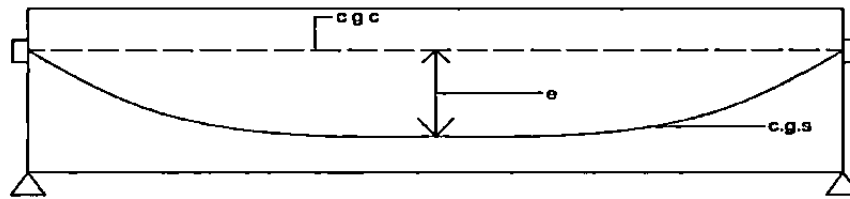
Gambar 3.7 Sistem Pascatarik (sumber : Aboe, 2006)

Pada metode ini beton lebih dahulu dicetak dengan disiapkan lubang (*duct*) atau alur untuk cable/strands. Apabila beton sudah cukup kuat, kemudian *cable/strands* ditarik, ujung-ujungnya diangkurkan, selanjutnya di *grouting*.

3. Tata letak tendon (*lay out tendon*)

Penampang suatu balok prategang diatas dua tumpuan ditentukan oleh Tampang pada saat terjadi momen maksimum dan tampak ujung balok. Pada tampang saat momen maksimum, tendon (*equivalen c.g.s*) diletakan sedekat mungkin pada sisi bawah balok agar diperoleh lengan momen akibat gaya dalam maksimum. Akan tetapi harus memperhatikan besar M_0 agar saat

transfere tidak terjadi tegangan tarik $> f_{ti}$ pada ujung balok, perencanaan dilakukan dengan melihat luas yang diperlukan untuk perlawanan terhadap geser, letak plat bantalan, jarak angkur dan jarak bersih dongkrak. Oleh karena pada ujung balok $M = 0$, tendon sebaiknya diletakan didalam *kern* agar tidak terjadi tegangan tarik atau diletakan sedemikian sehingga c.g.s berimpit dengan c.g.s yang memberikan tegangan merata.



Gambar 3.8 Analisis Bidang Momen (sumber : Aboe 2006)

Oleh karena itu, letak tendon (c.g.s) dipengaruhi oleh besar momen pada setiap titik yang berat eksentrisitas tendon e berubah sesuai dengan besar momen. Tata letak tendon dilakukan dengan peninjauan sebagai berikut:

- a) Batas bawah didasarkan saat transfer, agar tegangan pada serat atas \leq tegangan ijin.

$$a_{min} = \frac{M_o}{P_i} \text{ dan } a_b = a_{min} + k_b \dots\dots\dots(3.37)$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik:

$$e_b' = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot k_b}{P_i} \text{ dan } e_{b1} = e_b + e_b' = a_{min} + k_b + e_b' \dots\dots\dots(3.38)$$

- b) Batas atas didasarkan saat layan. Jika tendon diletakan diluar batas ini maka beban yang dapat dipikul berkurang atau tegangan serat bawah yang terjadi $>$ tegangan ijin.

$$a_{min} = \frac{M_T}{P_e} \text{ dan } e_t = a_{max} + k_t \dots\dots\dots(3.39)$$

4. Besar Gaya Prategang

- a) *Jacking Force*

$$P_j = P_o \times n_s \times P_{bs} \dots\dots\dots(3.40)$$

Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (% *jacking force*) $< 80\%$

$$P_j = P_o (0.85 - \dots - P_{bs}) \dots\dots\dots(3.41)$$

Dengan :

n_s = jumlah strands cable yang dipakai

P_t = Gaya prategang awal (kN)

P_{bs} = Beban putus minimal satu strand (kN)

b) Saat Awal di Tengah Bentang

Tegangan di bagian atas

$$\sigma_{top} = ((P_i/A_{cp}) - (P_i \times (e/W_a)) + (M_{bs}/W_a)) \dots\dots\dots(3.42)$$

Tegangan dibagian bawah

$$\sigma_{bottom} = ((P_i/A_{cp}) - (P_i \times (e/W_b)) + (M_{bs}/W_b)) \dots\dots\dots(3.43)$$

Dengan :

P_i : Initial *prestress force*

W_a : Modulus *section* bagian atas balok *precast*

M_{bs} : Momen akibat berat sendiri

e : *Eksentrisitas*

W_b : Modulus *section* bagian bawah balok *precast*

P_e : Gaya prategang efektif

W_{ac} : Modulus *section* bagian bawah balok komposit

M_{bp} : Momen akibat berat beton (*Precast beam + slab + diaphragm*)

W_{bc} : Modulus *section* bagian bawah balok komposit

W_{ap} : Modulus *section* bagian atas balok *precast*

W_{bp} : Modulus *section* bagian bawah balok *precast*

M_{bh} : Momen akibat beban tambahan (aspal + *Live load*)

5. Kehilangan Gaya Prategang

Tegangan pada tendon beton prategang berkurang secara kontinyu seiring dengan waktu. Total pengurangan tegangan ini disebut kehilangan prategang total. Kehilangan prategang total ini adalah faktor utama yang mengganggu perkembangan awal beton prategang. Menurut *Naaman (1982)*, kehilangan gaya prategang dapat digolongkan menjadi 2 yaitu, kehilangan langsung

a) Kehilangan Gaya Prategang Langsung

Kehilangan gaya prategang langsung dapat diakibatkan oleh beberapa hal antara lain :

1) Pergeseran ankur (A)

Menurut *T.Y.Lin* dan *Burns* (2000), bahwa kehilangan gaya prategang karena slip ankur pada komponen paskatarik diakibatkan adanya blok-blok pada ankur pada saat pendongkrak disalurkan ke ankur. Cara mudah untuk mengatasi kehilangan ini adalah dengan memberikan kelebihan tegangan.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta A}{L} \cdot E_s \dots\dots\dots(3.44)$$

Dimana :

ΔA = deformasi pengankuran / slip

E_s = modulus elastic kabel

L = panjang tendon

2) Friksi / gesekan (F)

Kehilangan gaya prategang terjadi pada komponen struktur paskatarik akibat adanya gesekan antara tendon dan beton di sekelilingnya. Besarnya kehilangan ini merupakan fungsi dari formasi tendon atau yang disebut *curvature effect* dan simpangan lokal di dalam alinemen disebut *wobble effect*.

Dengan menggabungkan *curvature effect*, maka :

$$\Delta f_{pF} = f_{pi} (\phi \cdot \alpha + k \cdot L) \dots\dots\dots(3.45)$$

Dimana :

Δf_{pF} = kehilangan tegangan akibat gesekan kabel

f_{pi} = tegangan awal tendon

ϕ = gesekan kabel yang ditulur dari ujung kabel ke lokasi x

- ϕ = koefisien gesek kabel dan material
- α = sudut kabel (radian)

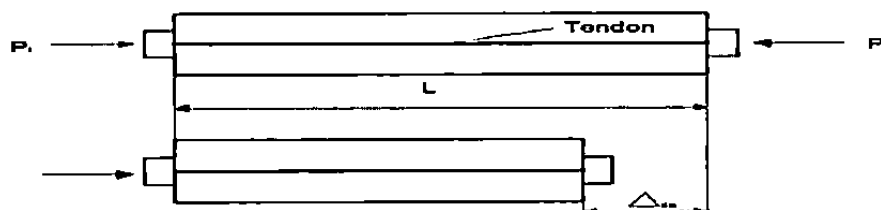
Tabel 3.7 Tipe Tendon

| Tipe Tendon | Koefisien Woble K per meter | Koefisien Kelengkungan μ |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <i>Tendon in flexible metal sheathing</i> | | |
| <i>Wire Tendons</i> | 0,0033 – 0,0049 | 0,15 – 0,25 |
| <i>7- wire strand</i> | 0,0016 – 0,0066 | 0,15 – 0,25 |
| <i>High – strength bar</i> | 0,0003 – 0,0020 | 0,08 – 0,30 |
| <i>Tendon in rigid metal duct</i> | | |
| <i>7-wire strand</i> | 0,0007 | 0,15 – 0,25 |
| <i>Matic-coated tendons</i> | | |
| <i>wire tendon and 7-wire strand</i> | 0,0010 – 0,0066 | 0,05 – 0,15 |
| <i>Pregressed tendons</i> | | |
| <i>wire tendon and 7-wire strands</i> | 0,0033 – 0,0066 | 0,05 – 0,15 |

3) Perpendekan elastis beton (*ES*)

a) Sistem Pratarik

Transfer gaya prategang ke beton mengakibatkan perpendekan elastis pada beton (*elastic shortening*). Karena tendon yang melekat pada beton di sekitarnya secara simultan juga memendek, maka tendon tersebut akan kehilangan sebagian dari gaya prategang yang dipikulnya.



Gambar 3.9 Perpendekan Elastis Beton (Aboe,2006)

Perpendekan beton, $\delta = \frac{f_c}{E_c} = \frac{P_0}{A_c E_c}$ (3.46)

Tegangan beton di pusat berat tendon saat transfer,

$f_c = \frac{P_1}{A_c} + \frac{P_1 e^2}{M_G e}$

Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis,

$$\Delta f_{pES} = n \cdot f_{cs} \dots \dots \dots (3.48)$$

Dimana :

P_i = gaya prategang awal

n = modulus ratio antara baja prestess dengan beton balok saat peralihan

M_G = momen akibat berat gelagar beton

I_x = inersia penampang balok

b) Sistem Paska-tarik

Pada sistem pascatarik, gaya prategang diukur saat tendon diangkur, berarti telah terjadi perpendekan elastis beton.

- 1) Jika hanya terdapat satu tendon, atau seluruh tendon ditarik bersama-sama/simultan, maka tidak terjadi kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton
- 2) Bila tendon yang digunakan lebih dari satu dan ditarik bertahap, sehingga gaya prategang menekan beton secara bertahap. Maka perpendekaan elastis beton bertambah setiap pengakuran tendon. Sehingga kehilangan tegangan yang terjadi akan berbeda untuk setiap tendon. Tendon yang pertama kali ditarik akan mengalami kehilangan terbesar, dan tendon yang ditarik terakhir kali tidak mengalami kehilangan tegangan. Untuk mengatasi hal tersebut, dalam praktek digunakan metoda :

- a) Seluruh tendon ditarik dengan gaya yang sama (P_0), dan kehilangan tegangan diperhitungkan
- b) Masing-masing tendon ditarik dengan gaya sebesar gaya prategang awal ditambah kehilangan gaya prategang tendon tersebut. Dengan demikian kehilangan tegangan tidak ditinjau lagi. Cara kedua ini dilakukan bila tendon mampu menerima gaya lebih besar.

Jika tendon ditarik bertahap, maka kehilangan tegangan :

$$\Delta f = \frac{1}{E_s} \left(\frac{M_G}{I_x} + \frac{P_i}{A_s} \right) \dots \dots \dots (3.49)$$

Dimana N = jumlah tendon atau jumlah psangan tendon yang ditarik secara secara sekuensial dan j menunjukkan nomor operasi pendongkrakan.

b) Kehilangan Gaya Prategang yang Bergantung dengan Waktu

Kehilangan gaya prategang yang bergantung dengan waktu diakibat beberapa hal antara lain :

1) Rangkak pada beton (CR)

Deformasi atau aliran lateral akibat tegangan longitudinal disebut rangkak dan kehilangan hanya terjadi akibat beban yang terus menerus selama riwayat pembebanan suatu elamem structural.

Kehilangan gaya prategang akibat rangkak didapati persamaan :

Tendon terekat (*bounded*),

$$\Delta f_{pCR} = K_{cr} \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \text{ atau}$$

$$\Delta f_{pCR} = n \cdot K_{cr} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \dots\dots\dots(3.50)$$

Tendon tak terekat (*unbounded*)

$$\Delta f_{pCR} = n \cdot K_{cr} \cdot f_{cpa} \dots\dots\dots(3.51)$$

Dimana :

K_{cr} = 2,0 untuk komponen struktur pratarik

= 1,6 untuk komponen struktur paska-tarik

f_{csd} = tegangan beton pada level pusat berat tendon akibat seluruh beban mati tambahan yang bekerja pada komponen struktur setelah diberi gaya prategang

f_{cpa} = tegangan tekan rata-rata pada beton sepanjang komponen struktur pada titik berat tendon (tendon tak terekat)

n = modulus ratio antara baja prestess dengan beton balok saat peralihan

2) Susut pada beton (SH)

Untuk komponen struktur paskatarik, kehilangan beton prategang akibat susut agak kecil karena sebagian susut telah terjadi sebelum

pemberian paskatarik. Metode bergantung waktu untuk kehilangan gaya prategang disebabkan susut adalah :

Metode perawatan basah,

$$\varepsilon_{SH,t} = \frac{t}{t+35} \cdot \varepsilon_{SHu} \dots\dots\dots (3.52)$$

$$\varepsilon_{SHu} = \text{regangan susut ultimit} = 800 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm}$$

Kehilangan tegangan akibat susut,

$$\Delta f_{pSH} = \varepsilon_{SH,t} \cdot E_{ps} \dots\dots\dots (3.53)$$

3) Relaksasi tendon prategang (R)

Menurut PCI *committee* (1975), bahwa relaksasi pada tendon mengalami tegangan tarik dalam waktu yang cukup lama. Besar pengurangan prategang bergantung tidak hanya pada durasi gaya prategang yang ditahan (t), melainkan juga pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang (f_{pi}/f_{py}).

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{45} \right) \cdot \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \dots\dots\dots (3.54)$$

Dimana :

f_{pi} = tegangan awal tendon

f_{py} = kuat leleh tendon prategang

t_1 = waktu awal interval

t_2 = waktu akhir interval dari penarikan (*jacking*)

6. Kekuatan Batas Lentur (*Ultimate Strength*)

Menurut RSNI T-12-2004, Perencanaan struktur beton untuk jembatan kuat momen rencana dari komponen struktur lentur prategang harus dihitung dengan menggunakan metode kekuatan batas (*strength design*).

itu dipergunakan suatu nilai tegangan (f_{ps}) sebagai pengganti tegangan leleh (f_y)

RSNI T-12-2004 memberikan batasan rasio tulangan prategang agar penampang daktilil :

$$w_p = \frac{\rho_p f_{ps}}{f_c} \leq 0,36 \cdot \beta_1 \dots \dots \dots (3.55)$$

Dimana :

f_{ps} = tegangan dalam tulangan prategang pada saat M_n dicapai

β_1 = konstanta yang tergantung pada mutu beton

$$f_c \leq 30 \text{ MPa, maka } \beta_1 = 0,85 \dots \dots \dots (3.56)$$

$$f_c > 30 \text{ MPa, maka } \beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f_c - 30) \geq 0,65 \dots \dots \dots (3.57)$$

$$\rho_p = \text{rasio tulangan prategang} = \frac{A_{ps}}{b \cdot d} \dots \dots \dots (3.58)$$

Untuk penampang tanpa tulangan non-prategang,

$$C_c = T_{ps} \dots \dots \dots (3.58)$$

Gaya internal tendon baja prategang,

$$T_{ps} = A_{ps} \cdot f_{ps} \dots \dots \dots (3.59)$$

Dengan menggunakan pendekatan *Whitney* tegangan desak beton adalah :

$$C_c = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot a \dots \dots \dots (3.60)$$

Untuk penampang tanpa tulangan non-prategang,

$$0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot a = A_{ps} \cdot f_{ps} \dots \dots \dots (3.61)$$

Maka tinggi balok tekan,

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0,85 \cdot f_c \cdot b} \dots \dots \dots (3.62)$$

Bila lengan momen adalah d , maka batas kekuatan nominal menurut SNI adalah :

Untuk penampang tanpa tulangan non-prategang

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (3.63)$$

Kapasitas momen ultimit box girder prestess,

$$M_{uk} = \phi \cdot M_n \dots \dots \dots (3.64)$$

Faktor reduksi kekuatan lentur, $\phi = 0,8$

7. Lentutan (*deflection*) dan lawan lendut (*chamber*)

Lentutan pada balok prategang tergantung dari kombinasi gaya prategang, beban luar dan dalam pembebanan. Gaya prategang akan menimbulkan lentutan ke atas (*chamber*), sedangkan beban luar akan menimbulkan lentutan ke bawah (*deflection*). Kontrol lentutan dilakukan pada saat transfer dan pada saat servis. Pada saat transfer dimana beban berat sendiri yang bekerja terjadi lentutan keatas yang disebabkan oleh tekanan tendon ke atas pada waktu penarikan kabel prategang. Lentutan yang terjadi diimbangi oleh beban servis sehingga menimbulkan lentutan pada balok dan diharapkan lentutan yang terjadi tidak melebihi lentutan maksimum yang diijinkan. Menurut RSNI T-12-2004 lentutan maksimum yang diijinkan adalah $L/240$, dimana L adalah panjang bentang balok.

Untuk lentutan ke atas akibat gaya prategang pada simple beam dihitung dengan rumus :

$$\delta_C = \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \dots \dots \dots (3.65)$$

Untuk lentutan dengan beban merata pada *simple beam* dihitung dengan rumus :

$$\delta_D = \frac{5}{384} \cdot \frac{w \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \dots \dots \dots (3.66)$$

Pada perhitungan lentutan akibat beban transversal dan lawan lendut berlaku prinsip superposisi.

8. Lintasan Tendon

Lintasan tendon yang digunakan dalam perencanaan ini adalah tendon melengkung (parabola) yang mempunyai end block pada ujung-ujung tepi

tendon, digunakan persamaan parabola sebagai berikut.

$$Y = ax^2 + bx + c \dots\dots\dots(3.67)$$

$$(x - p) = 4p(y - q) \dots\dots\dots(3.68)$$

9. Perhitungan Penghubung Geser (*shear conector*)

Tegangan geser horizontal akibat gaya lintang pada penampang yang ditinjau dihitung dengan rumus :

$$F_v = V_i \times S_x / b_v \times I_{xc} \dots\dots\dots(3.69)$$

Dengan :

V_i = gaya lintang pada penampang yang ditinjau

S_x = momen statis luasan plat terhadap titik berat penampang komposit

$S_x = b_{eff} \times h_0 \times (y_{ac} - h_0/2)$

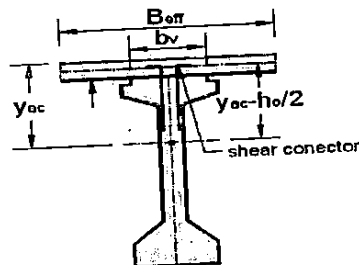
Dengan :

b_v = lebar bidang gesek

b_{eff} = lebar efektif plat

h_0 = tebal plat

I_{xc} = inersia penampang balok komposit



Gambar 3.10 Analisis *Shear Connector* (sumber: Ilham 2010)

10. End Block

Pada daerah angkur atau balok ujung (*end block*) suatu elemen beton prategang pascatarik, keadaan distribusi tegangannya rumit dan bersifat tiga dimensi. Pada sistem post-tensioning, kawat prategang dipasang didalam saluran kabel kemudian ditegangkan dan diangkurkan pada *end block*. dalam perhitungan pada balok ujung oleh Guyon, rumus pendekatan penentuan gaya tarik memcah T adalah scbaga ibcrikut.

a) Angkur *sentris*

$$T = P / 3,2 (1 - (2y_{po}/H)) \dots\dots\dots(3.70)$$

b) Angkur *eksentris*

$$T = P/3,0 (1 - (2y_{po}/H)) \dots\dots\dots(3.71)$$

Luas total tulangan vertical yang dibutuhkan menjadi

$$A_s = T/f_s \dots\dots\dots(3.72)$$

Berdasarkan ACI (1977), perlu dilakukan pengontrolan tegangan beton dibelakang pelat angkur pada waktu sesaat setelah pengangkuran dan setelah terjadi kehilangan prategang (Nawy, 1996).

c) Sesaat Setelah Pengangkuran

$$\sigma_{bi} = 0,8f_c'ci \sqrt{\frac{A_2}{A_1} - 0,2} \leq 1,25 f_c'i \dots\dots\dots(3.73)$$

$$\frac{A_2}{A_1} \leq 2,7$$

d) Setelah Terjadi Kehilangan Prategang

$$\sigma_{bi} = 0,6f_c'ci \sqrt{\frac{A_2}{A_1} - 0,2} \leq f_c'i \dots\dots\dots(3.74)$$

$$\frac{A_2}{A_1} \leq 2,7$$

Dengan :

A₁ = luas bantalan angkur

A₂ = luas maksimum dari permukaan beton.

11. Tinjauan Ultimit Balok Prategang

a) Kapasitas Momen Ultimit Balok

tegangan efektif baja prestress

$$f_{eff} = P_{eff} / A_{ps} \times 10^{-3} \dots\dots\dots(3.75)$$

rasio luas penampang baja prestress

$$\rho = A_{ps} / A_c \dots\dots\dots(3.76)$$

Tinggi total penampang balok prategang

$$H = h + h_0 \dots\dots\dots(3.77)$$

b) Momen Ultimit Balok

Gaya internal akibat momen akibat pengaruh gaya temperature dapat dihitung dengan rumus :

$$M_{et} = - P_t \times e' \dots\dots\dots(3.78)$$

Dimana :

$$P_t = A_t \times E_{balok} \times \beta \times (\Delta T_a + \Delta T_b / 2)$$

E_p = eksentrisitas gaya susut terhadap pusat penampang

c) Momen akibat Prategang

momen akibat prategang dapat dihitung dengan rumus

$$M_{DP} = P \times e' \dots\dots\dots(3.79)$$