

## **BAB III LANDASAN TEORI**

### **3.1. DEFINISI BOX GIRDER**

*Box girder* adalah balok-balok penopang utama yang berbentuk kotak atau trapesium berongga pada sebuah struktur atas jembatan. *Box girder* biasanya terdiri dari elemen beton prategang menggunakan tendon-tendon serat baja. Konsep prategang adalah memberikan gaya tarik awal pada tendon sebagai tulangan tariknya serta memberikan momen perlawanan dari eksentrisitas yang ada. Bentuk penampang dari *box girder* umumnya adalah persegi atau trapesium dan dapat direncanakan terdiri atas 1 sel atau banyak sel. Salah satu keuntungan dari jembatan *box girder* yaitu kemampuan daya dukung dari struktur yang tinggi terhadap beban pelayanan yang terjadi. Tinggi elemen *box girder* dapat dibuat konstan maupun bervariasi yakni makin ke tengah makin kecil (Supriyadi, 2000).

### **3.2. PEMBEBANAN RENCANA**

Pembebanan jembatan dan jalan raya di Indonesia mengacu pada Peraturan Pembebanan Jalan Raya Tahun 1987, RSNI T-02-2005 dan Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan *BMS 1992* ( *Bridge Management System 1992* ) Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga. Dalam penelitian gelagar ini digunakan peraturan pembebanan dan kombinasi dari RSNI T-02-2005 sebagai peraturan yang telah digunakan di Indonesia saat ini.

### **3.3. PERENCANAAN GELAGAR PRATEGANG**

Balok/gelagar pada jembatan berfungsi mendukung semua beban yang bekerja pada struktur atas jembatan, kemudian diteruskan ke struktur bawah jembatan. Pada perencanaan ini menggunakan beton prategang dengan sistem *simple beam*.

Perencanaan balok beton prategang didasarkan atas beban kerja dan tegangan ijin dan asumsi seperti RSNI-T-12-2004. Persamaan terdiri atas beberapa tahapan sebagai berikut ini.

1. Pemilihan bentuk dan ukuran penampang.
2. Peninjauan besar gaya prategang dan eksentrisitas tendon.
3. Penentuan tata letak / *lay out* tendon di sepanjang balok.
4. Pemeriksaan terhadap tegangan-tegangan yang terjadi, kuat / kapasitas penampang pada kondisi batas, lendutan, geser, dan sebagainya.
5. Peninjauan terhadap kehilangan gaya prategang.

### 3.3.1. Metode Desain

Pada desain menggunakan pendekatan perancangan tegangan kerja. Pada pendekatan ini tegangan dibawah beban kerja dibatasi dengan tegangan ijin dan struktur diasumsikan elastis linier. Keamanan dipenuhi dengan memilih tegangan kerjasebagai bagian kecil dari karakteristik kekuatan komponen material. Tegangan ijin ditetapkan dalam bermacam-macam peraturan dan kemungkinan berbeda satu sama lain.

Salah satu metode yang banyak dipergunakan untuk perencanaan penampang balok prategang adalah metode modulus penampang. Dengan metode ini, modulus penampang minimum akibat beban kerja yang dibutuhkan,  $S_t$  dan  $S_b$  harus ditentukan terlebih dahulu. Berdasarkan persamaan-persamaan tegangan diberikan nilai-nilai batas, yaitu tegangan ijin, maka diperoleh pertidaksamaan yang dapat dipergunakan untuk perencanaan.

Modulus penampang atas,

$$S_t \geq \frac{(1-R).M_0 + M_D + M_L}{R.f_{ti} - f_{cs}} \quad (3.1)$$

Modulus penampang bawah,

$$S_b \geq \frac{(1-R).M_0 + M_D + M_L}{f_{ts} - R.f_{ci}} \quad (3.2)$$

Dimana :

$$R = 1 - LOF \quad (3.3)$$

$LOF$  = kehilangan gaya prategang total dalam persentase kehilangan gaya prategang,

$M_0$  = momen akibat beban-beban yang bekerja saat transfer,

$M_D$  = momen akibat beban mati ( di luar beban mati yang bekerja saat transfer ),

$M_L$  = momen akibat beban hidup ( di luar beban hidup yang bekerja saat transfer ),

$f_{ti}$  = tegangan ijin beton serat tarik saat transfer,

$f_{ci}$  = tegangan ijin beton serat tekan saat transfer,

$f_{ts}$  = tegangan ijin beton serat tarik saat akhir, dan

$f_{cs}$  = tegangan ijin beton serat tekan saat akhir.

Profil penampang dalam desain menggunakan modulus penampang yang sama atau lebih besar dari  $S_t$  dan  $S_b$  yang dibutuhkan.

Dalam desain balok yang ditumpu sederhana, jarak antara  $c_{gc}$  dan  $c_{gs}$  yang berarti eksentrisitas  $e$  sebanding dengan gaya prategang yang dibutuhkan. Karena momen di tengah bentang pada balok tersebut biasanya menentukan desain, maka eksentrisitas yang lebih besar di tengah bentang akan menghasilkan gaya prategang perlu yang lebih kecil, sehingga menghasilkan desain yang lebih ekonomis. Untuk eksentrisitas yang lebih besar, luas di daerah atas lebih banyak dibutuhkan.

Perubahan eksentrisitas tendon dari penampang di tengah bentang ke tumpuan diperoleh dengan menaikkan tendon dengan cara.

1. Secara mendadak dari tengah bentang ke tumpuan (*harping*), yang biasa digunakan untuk balok pratarik dan untuk beban transfersal terpusat.
2. Secara perlahan-lahan (*draping*) yang umumnya berbentuk parabolik, yang biasa digunakan untuk balok paska tarik.

Pada saat mendesain kekuatan adalah faktor yang sangat penting, maka desain dapat didasarkan pada mutu material dan mutu beton yang tinggi. Pada

beton prategang, beton mutu tinggi akan dipadukan dengan baja mutu tinggi dengan maksud untuk menghasilkan pasangan yang ekonomis. Beton yang lebih kuat juga diperlukan untuk menahan tegangan yang besar pada pengangkutan dan untuk memberikan kekuatan pada penampang yang lebih tipis yang sering digunakan pada beton prategang.

### 3.3.2. Pemeriksaan Tegangan

Dengan menganggap penampang bebas retak pada tingkat beban kerja, maka seluruh penampang memikul tegangan yang terjadi, sehingga seluruh luas beton dapat diperhitungkan dalam menentukan kedudukan pusat berat dan momen inersia penampang. Pada dasarnya, baik pada sistem pratarik maupun sistem paskatarik, pola tegangan umumnya ditinjau / diperiksa pada dua keadaan yang berbeda, yaitu saat awal (saat transfer) dan saat akhir / layan (saat *service*).

#### 1. Saat Awal (Transfer)

Yaitu pemeriksaan tegangan saat pelimpahan gaya prategang (penarikan tendon pada sistem paskatarik, pemotongan tendon pada sistem pratarik). Beban-beban yang diperhitungkan, adalah.

- a. Gaya prategang awal  $P_0$  (gaya prategang sebelum terjadi kehilangan tegangan / gaya prategang).
- b. Beban berat sendiri ( $M_0$ )

Tegangan – tegangan awal di tengah bentang

Pada serat atas,

$$f_t = -\frac{P_0}{A_c} + \frac{P_0 \cdot e}{S_a} - \frac{M_0}{S_a} \quad (3.4)$$

Pada serat bawah,

$$f_b = -\frac{P_0}{A_c} - \frac{P_0 \cdot e}{S_b} + \frac{M_0}{S_b} \quad (3.5)$$

Dimana :

$P_0$  = gaya prategang awal,

$A_C$  = luas penampang balok,

$e$  = eksentrisitas,

$S_a$  = Tahanan momen sisi atas,

$S_b$  = Tahanan momen sisi bawah, dan

$M_0$  = momen akibat beban berat sendiri balok.

## 2. Saat Akhir (masa layan / *service*)

Pemeriksaan tegangan pada saat keadaan akhir (layan) adalah pemeriksaan pada saat seluruh beban transversal sudah bekerja. Penampang yang digunakan untuk perhitungan propertis yaitu penampang transformasi untuk tendon terekat (*bounded*) dan penampang netto untuk tendon tak terekat (*unbounded*). Beban-beban yang bekerja / diperhitungkan adalah.

a. Gaya prategang efektif  $P_e$  (gaya prategang setelah terjadi seluruh kehilangan gaya prategang akibat kehilangan jangka pendek dan jangka panjang.

$$P_e = R \cdot P_0 \quad (3.6)$$

$$R \text{ (rasio kehilangan gaya prategang)} = 1 - LOF \quad (3.7)$$

$LOF$  = kehilangan gaya prategang total, dimana persentase kehilangan prategang untuk paskatarik  $\pm 20\%$

b. Seluruh beban eksternal telah bekerja, seperti beban berat sendiri, beban mati dan beban hidup atau dengan momen total yang bekerja saat layan  $M_T$ . Tegangan – tegangan akhir di tengah bentang

Pada serat atas,

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{P_e \cdot e}{S_a} - \frac{M_T}{S_a} \quad (3.8)$$

Pada serat bawah,

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{P_e \cdot e}{S_b} + \frac{M_T}{S_b} \quad (3.9)$$

Dimana :

$P_e$  = gaya prategang efektif, dan

$M_T$  = momen total yang bekerja saat layan.

### 3.3.3. Tegangan-Tegangan Ijin

Menurut RSNI-T-12-2004, tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur dan tegangan ijin tendon prategang, adalah sebagai berikut :

1. Saat transfer
  - a. serat terluar mengalami tegangan tekan ( $f_{ci}$ )  $\leq 0,60.f'_{ci}$
  - b. serat terluar mengalami tegangan tarik ( $f_{ti}$ )  $\leq 0,25.\sqrt{f'_{ci}}$
2. Saat akhir
  - a. serat terluar mengalami tegangan tekan ( $f_{cs}$ )  $\leq 0,45.f'_c$
  - b. serat terluar mengalami tegangan tarik ( $f_{ts}$ )  $\leq 0,5.\sqrt{f'_c}$
3. Tegangan ijin tendon prategang ( $f_{ps}$ ) :
  - a. akibat gaya pengankuran tendon  $\leq 0,94.f_{py}$ , tetapi tidak lebih besar dari  $0,85.f_{pu}$ ,
  - b. sesaat setelah pemindahan gaya prategang  $\leq 0,82.f_{py}$ , tetapi tidak lebih besar dari  $\leq 0,74.f_{pu}$ ,
  - c. tendon paskatarik, pada daerah angkur dan sambungan, sesaat setelah penyaluran gaya  $\leq 0,70.f_{pu}$ ,
  - d. Untuk kondisi layan sebesar  $0,60.f_{pu}$ .

### 3.3.4. Tata Letak Tendon ( Lay Out Tendon )

Penampang suatu balok prategang di atas dua tumpuan ditentukan oleh tampang dimana terjadi momen-momen maksimum dan tampak ujung balok. Pada daerah ini tendon (ekivelen cgs) diletakkan sedekat mungkin sisi balok bawah, agar diperoleh  $M_o$  agar saat transfer 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 dongkrak. Oleh karena itu pada ujung baik  $M = O$ , tendon sebaiknya diletakkan di dalam kern agar tidak terjadi tegangan tarik atau tendon diletakkan sedemikian agar cgs berimpit dengan cgc yanag memberikan tegangan merata.

$$\text{Radius girasi, } r^2 = \frac{I_x}{A_c} \quad (3.10)$$

$$\text{Batas kern atas, } k_t = \frac{r^2}{y_a} \quad (3.11)$$

$$\text{Batas kern bawah, } k_b = \frac{r^2}{y_b} \quad (3.12)$$

Berarti letak tendon (*cgs*) dipengaruhi oleh besar momen pada setiap titik, yang berarti eksentrisitas tendon  $e$  berubah sesuai dengan besar momen. Perencanaan tata letak tendon dilakukan dengan peninjaun sebagai berikut.

1. Batas bawah didasarkan saat transfer, agar tegangan pada serat atas  $\leq$  tegangan ijin. Lengan minimum dari kopel tendon.

$$a_{min} = \frac{M_0}{P_i} \quad (3.13)$$

Batas eksentrisitas bawah,

$$e_b = a_{min} + k_b \quad (3.14)$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik,

$$e_{b'} = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot k_b}{P_i} \quad (3.15)$$

$$e_{bl} = e_b + e_{b'} = a_{min} + k_b + e_{b'} \quad (3.16)$$

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

$$a_{max} = \frac{M_T}{P_e} \quad (3.17)$$

Batas eksentrisitas bawah,

$$e_t = a_{max} + k_t \quad (3.18)$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik,

$$e_t' = \frac{f_{ts} \cdot A_c \cdot k_t}{P_e} \quad (3.19)$$

$$e_{tl} = e_t - e_t' = a_{max} - k_t - e_t' \quad (3.20)$$

### 3.3.5. Kehilangan Gaya Prategang

Tegangan pada tendon beton prategang berkurang secara kontinu seiring dengan waktu. Total pengurangan tegangan ini disebut kehilangan prategang total. Kehilangan prategang total ini adalah faktor utama yang mengganggu perkembangan awal beton prategang. Kehilangan gaya prategang dapat digolongkan menjadi 2 yaitu, kehilangan langsung (*immediate*) dan kehilangan yang bergantung dengan waktu (*time depending lost*).

#### 1. Kehilangan Gaya Prategang Langsung

Kehilangan gaya prategang langsung dapat diakibatkan oleh beberapa hal antara lain pergeseran ankur, gesekan (friksi), dan perpendekan elastisitas beton.

##### a. Pergeseran ankur ( $A$ )

Menurut 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.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta A}{L} \cdot E_s \quad (3.21)$$

Dimana :

$\Delta A$  = deformasi pengangkuran / slip,

$E_s$  = modulus elastik kabel, dan

$L$  = panjang tendon.

##### b. Friksi / gesekan ( $F$ )

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

Dengan menggabungkan *curvature effect*, maka :

$$P_x = P_0 \cdot e^{-(kx + \mu\alpha)} \quad (3.22)$$

Dimana :

$P_x$  = kehilangan tegangan akibat gesekan,

$P_o$  = gaya prategang awal,

$l_x$  = panjang kabel yang diukur dari ujung kabel ke lokasi  $x$ ,

$K$  = *wobble effect*,

$\mu$  = koefisien friksi, dan

$\alpha$  = jumlah total perubahan sudut sepanjang lintasan (radian).

Berikut dapat dilihat pada Tabel 3.1 nilai koefisien *wobble* dan koefisien friksi  $\mu$  pada sistem penarikan tendon paskatarik.

Tabel 3.1 Koefisien friksi tendon paska tarik

			Koefisien <i>wobble</i> $K$ (1/m)	Koefisien friksi $\mu$
		Tendon kawat Batang kekuatan tinggi <i>Strand</i> 7 kawat	0,0033 – 0,0049 0,0003 – 0,0020 0,0016 – 0,0066	0,15 – 0,25 0,08 – 0,30 0,15 – 0,25
Tendon tanpa lekatan	<i>Mastic coated</i>	Tendon kawat <i>Strand</i> 7 kawat	0,0033 – 0,0066 0,0033 – 0,0066	0,05 – 0,15 0,05 – 0,15
	<i>Pre-greased</i>	Tendon kawat <i>Strand</i> 7 kawat	0,0010 – 0,0066 0,0010 – 0,0066	0,05 – 0,15 0,05 – 0,15

(Sumber: Nawy, 2000)

c. Perpendekan elastis beton ( $E_s$ )

1) Sistem Paska-tarik

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

- a) Jika hanya terdapat satu tendon, atau seluruh tendon ditarik bersama- sama/simultan, maka tidak terjadi kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton.

b) 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 metode :

- seluruh tendon ditarik dengan gaya yang sama ( $P_o$ ), dan kehilangan tegangan diperhitungkan,
- 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 :

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\Delta f_{pES})_j \quad (3.23)$$

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

## 2. Kehilangan Gaya Prategang yang Bergantung dengan Waktu

Kehilangan gaya prategang yang bergantung dengan waktu antara lain rangkakan pada beton, susut pada beton, dan relaksasi tendon prategang.

### a. Rangkakan pada beton ( $CR$ )

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

Kehilangan gaya prategang akibat rangkakan menurut RSNI-T-12-2004 didapati persamaan :

$$\varepsilon_{cct} = \phi_{cc}(t) \cdot (\varepsilon_e) \quad (3.24)$$

dimana

$$\phi_{cc}(t) = (t^{0,6} / (10+t^{0,6})) C_u \quad (3.25)$$

Dimana :

$\varepsilon_{cct}$  = regangan rangkak,

$\phi_{cc}(t)$  = koefisien Rangkak, dan

$\varepsilon_e$  = regangan *elastic shortening*.

Berikut dapat dilihat pada Tabel 3.2 nilai koefisien rangkak maksimum pada sistem penarikan tendon berdasarkan RSNI-T-12-2004.

Tabel 3.2 Koefisien rangkak maksimum

Kekuatan karakteristik $f'_c$	20	25	30	35	40-60
Koef.Rangkak Max	2,8	2,5	2,3	2,15	2,0

(Sumber : RSNI-T-12-2004)

b. Susut pada beton ( *SH* )

Untuk komponen struktur paskatarik, menurut RSNI-T-12-2004 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,

$$\varepsilon_{cs,t} = \frac{t}{t+35} \cdot \varepsilon_{csu} \quad (3.26)$$

$\varepsilon_{csu}$  = nilai susut ultimit =  $780 \cdot 10^{-6}$  mm/mm x  $\lambda_{cs}$

$\lambda_{cs}$  = koefisien standar susut beton

Berikut dapat dilihat pada Tabel 3.3 nilai koefisien susut maksimum pada sistem penarikan tendon berdasarkan RSNI-T-12-2004.

Tabel 3.3 Koefisien susut maksimum

Kekuatan karakteristik $f'_c$	20	25	30	35	40-60
Koef.Susut Max	0,000174	0,000170	0,000163	0,000161	0,000153

(Sumber : RSNI-T-12-2004)

c. 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 ( $f_{pi}/f_{py}$ ).

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left( \frac{t \log t}{10} \right) \cdot \left( \frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (3.27)$$

Dimana :

- $f_{pi}$  = tegangan awal tendon,
- $f_{py}$  = kuat leleh tendon prategang, dan
- $t$  = waktu stres relaksasi (jam).

**3.3.6. Kekuatan Batas Lentur ( *Ultimate Strength* )**

Menurut RSNI-T-12-2004, kuat momen rencana dari komponen struktur lentur prategang harus dihitung dengan menggunakan metode kekuatan batas (*strength design methods*). Baja prategang tidak memperlihatkan titik leleh secara jelas, karena itu dipergunakan suatu nilai tegangan ( $f_{ps}$ ) sebagai pengganti tegangan leleh ( $f_y$ )

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

$$w_p = \frac{\rho_p f_{ps}}{f'_c} \leq 0,36 \cdot \beta_1 \quad (3.28)$$

Dimana :

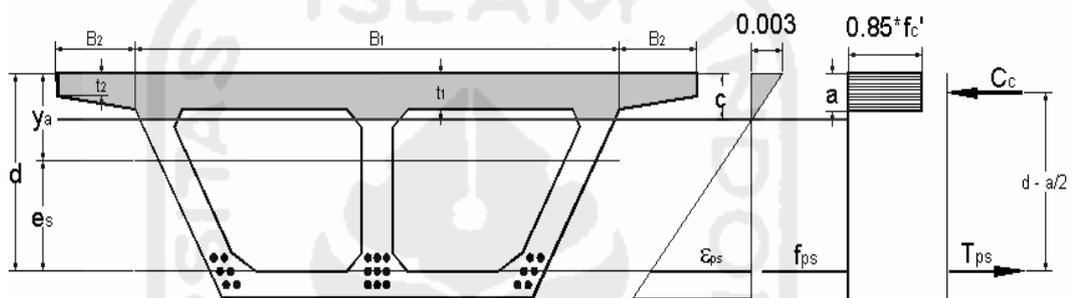
- $f_{ps}$  = tegangan dalam tulangan prategang pada saat  $M_n$  dicapai, dan
- $\beta_1$  = konstanta yang tergantung pada mutu beton.

$$f'_c \leq 30 \text{ MPa, maka } \beta_1 = 0,85 \quad (3.29)$$

$$f'_c > 30 \text{ MPa, maka } \beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f'_c - 30) \geq 0,65 \quad (3.30)$$

$$\rho_p = \text{rasio tulangan prategang} = \frac{A_{ps}}{b \cdot d} \quad (3.31)$$

Berikut dapat dilihat pada Gambar 3.1 penampang *box* dan daerah yang mengalami tegangan dan regangan.



Gambar 3.1 Penampang *box*, regangan dan gaya-gaya dalam  
(Sumber : Kadir, 2006)

Untuk penampang tanpa tulangan non-prategang,

$$C_c = T_{PS} \quad (3.32)$$

Gaya internal tendon baja prategang,

$$T_{PS} = A_{PS} \cdot f_{PS} \quad (3.33)$$

Dengan menggunakan pendekatan *Whitney* tegangan desak beton adalah :

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \quad (3.34)$$

Untuk penampang tanpa tulangan non-prategang,

$$0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a = A_{PS} \cdot f_{PS} \quad (3.35)$$

Maka tinggi balok tekan,

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (3.36)$$

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

Untuk penampang tanpa tulangan non-prategang,

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (3.37)$$

Kapasitas momen ultimit *box girder prestressed*,

$$M_{uk} = \phi \cdot M_n \quad (3.38)$$

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

### 3.3.7. Lentutan (*deflection*) dan lawan lentut (*chamber*)

Lentutan pada balok prategang tergantung dari kombinasi gaya prategang, beban luar dan lama pembebanan. Gaya prategang akan menimbulkan lentutan ke atas (*chamber*), sedangkan beban luar akan menimbulkan lentutan ke bawah.

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 Persamaan :

$$\delta_C = \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^2}{(E_c \cdot I_x)} \quad (3.39)$$

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

$$\delta_D = \frac{5}{384} \cdot \frac{w \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \quad (3.40)$$

Pada perhitungan lentutan akibat beban tranfersal dan lawan lentut berlaku prinsip superposisi.