

BAB III

PERENCANAAN DAN ANALISIS

3.1 Data Analisis

Data-data yang dipergunakan dalam menganalisis balok beton prategang antara lain sebagai berikut ini.

1. Bentang balok : $L = 20$ m
2. Jarak balok : $B = 3.0$ m
3. Baja prategang : $f_{pu} = 1860$ Mpa
4. Beton prategang :
 - a. $f'_c = 45$ Mpa
 - b. $\gamma = 2.5$ t/m³
5. Beban mati : $w_{SD} = 0.5$ t/m²
6. Beban hidup : $w_L = 0.4$ t/m²
7. Kehilangan gaya prategang dianggap 20 %
8. Pemberian gaya prategang pada 21 hari setelah pengerasan awal.
9. Kelembaban relatif sebesar 60%.
10. Balok beton mendapat beban luar 1 hari setelah pemberian gaya prategang.

3.2 Tegangan Ijin Beton

Tegangan yang terjadi pada balok beton prategang harus memenuhi persyaratan tegangan ijin pada Persamaan 2.17a sampai dengan 2.18b.

1. Saat transfer :

$$\begin{aligned} \text{a. } f_{ci} &= 0.6 \times f'_{ci} \\ &= 0.6 \times 0.95 \times 45 = -25.65 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } f_{ti} &= 0.25 \times \sqrt{f'_{ci}} \\ &= 0.25 \times \sqrt{0.95 \times 45} = 1.6346 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

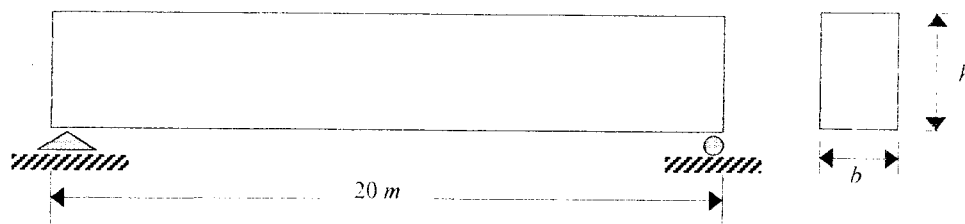
2. Saat layan :

$$\begin{aligned} \text{a. } f_{cs} &= 0.45 \times f'_c \\ &= 0.45 \times 45 = -20.25 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } f_{ts} &= 0.5 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 0.5 \times \sqrt{45} = 3.354 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

3.3 Perencanaan Tampang Balok

Pada perencanaan berikut ini, perhitungan dengan menggunakan tampang balok bentuk persegi panjang.



Gambar 3.1. Bentang balok bentuk tampang persegi

3.3.1 Perhitungan Momen Lentur

a. Akibat beban mati (w_{SD}) :

$$w_{SD} = 0.5 \text{ t/m}^2 \times 3.0 \text{ m} = 1.50 \text{ t/m}$$

$$\begin{aligned} M_{SD} &= 1/8 \times w_{SD} \times L^2 \\ &= 1/8 \times 1.5 \times 20^2 \\ &= 75 \text{ t.m} = 73.5503 \cdot 10^7 \text{ N. mm} \end{aligned}$$

b. Akibat beban hidup (w_L) :

$$w_L = 0.4 \text{ t/m}^2 \times 3.0 \text{ m} = 1.20 \text{ t/m}$$

$$\begin{aligned} M_L &= 1/8 \times w_L \times L^2 \\ &= 1/8 \times 1.20 \times 20^2 \\ &= 60 \text{ t.m} = 58.8402 \cdot 10^7 \text{ N. mm} \end{aligned}$$

c. Akibat berat sendiri (w_{SD}) :

$$\text{Ditaksir : } w_{SD} = 0.45 \text{ t/m}^2 \times 3.0 \text{ m} = 1.35 \text{ t/m}$$

$$\begin{aligned} M_D &= 1/8 \times w_D \times L^2 \\ &= 1/8 \times 1.35 \times 20^2 \\ &= 67.50 \text{ t.m} = 66.1953 \cdot 10^7 \text{ N. mm} \end{aligned}$$

3.3.2 Perhitungan Modulus Tampang Rencana

Modulus penampang rencana dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.2.a) dan (2.2.b).

a. Serat atas :

$$S' = \frac{(1-R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{R \cdot f_u - f_{cs}}$$

$$= \frac{(1-0.8) \times 66.1953 \cdot 10^7 + 73.5503 \cdot 10^7 + 58.8402 \cdot 10^7}{(0.8 \times 1.6346) + 20.25}$$

$$= 6.7553 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

b. Serat bawah :

$$S_b = \frac{(1-R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{f_{ts} - R \cdot f_{ct}}$$

$$= \frac{(1-0.8) \times 66.1953 \cdot 10^7 + (73.5503 \cdot 10^7) + (58.8402 \cdot 10^7)}{3.354 + (0.8 \times 25.65)}$$

$$= 6.0999 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Untuk perencanaan digunakan modulus penampang yang terbesar, yaitu :

$$= 6.7553 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

3.3.3 Perhitungan Dimensi Penampang

Untuk menentukan tinggi balok dengan pendekatan menggunakan Persamaan 2.1.

$$h = k \cdot \sqrt{M}$$

$$= 10 \cdot \sqrt{75} \text{ s/d } 15 \cdot \sqrt{75}$$

$$= 86.6025 \text{ cm s/d } 129.9038 \text{ cm}$$

Diambil $h = 120 \text{ cm} = 1200 \text{ mm}$

Untuk balok berbentuk persegi panjang diperoleh :

$$h_f h = 1.0$$

$$h_w b = 1.0$$

sedangkan : $A = 1.00 b \cdot h$

$$I = 0.0833 b \cdot h^3$$

$$C_b = 0.500 h$$

$$C^t = 0.500 h$$

$$r^2 = 0.0833 h^2$$

dengan menggunakan persamaan :

$$S^t = \frac{I}{C^t} = \frac{0.0833 \times b \times h^3}{0.500 \times h} = 0.1666 \times b \times h^2 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{I}{C_b} = \frac{0.0833 \times b \times h^3}{0.500 \times h} = 0.1666 \times b \times h^2 \text{ mm}^3$$

diperoleh hasil $S^t = S_b = 0.1666 \times b \times h^2 \text{ mm}^3$

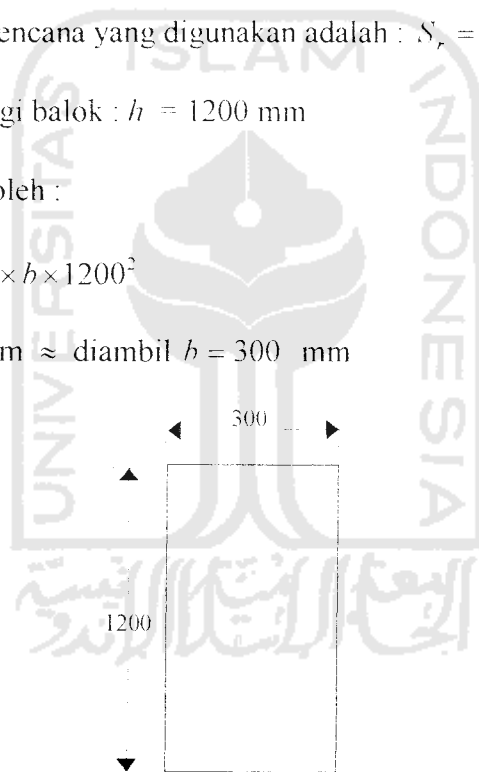
sedangkan modulus rencana yang digunakan adalah : $S_r = 6.7553 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$.

Diketahui bahwa tinggi balok : $h = 1200 \text{ mm}$

untuk $S_r = S^t$, diperoleh :

$$6.7553 \cdot 10^7 = 0.1666 \times b \times 1200^2$$

$$b = 281.4708 \text{ mm} \approx \text{diambil } b = 300 \text{ mm}$$



Gambar 3.2. Dimensi penampang balok bentuk persegi panjang

3.4 Perhitungan Properties Penampang

a. Menentukan letak pusat berat penampang.

$$C^t = 0.500 \times h$$

$$= 600 \text{ mm}$$

maka :

$$\begin{aligned} C_k &= h - C' \\ &= 1200 - 600 = 600 \text{ mm} \end{aligned}$$

diperoleh : $C' = C_k = 600 \text{ mm}$

b. Luas Tampang (A_c)

$$\begin{aligned} A_c &= b \times h \\ &= 300 \times 1200 = 360000 \text{ mm}^2 = 0.3600 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

c. Momen akibat berat sendiri balok :

$$\begin{aligned} \gamma_{beton} &= 2.5 \text{ t/m}^3 \\ w_D &= A_c \cdot \gamma_{beton} \\ &= 0.3600 \times 2.5 = 0.900 \text{ t/m}^2 < w_D \text{ taksiran } (= 1.35 \text{ t/m}^2) \text{ OK!} \\ M_D &= 1/8 \cdot w_D \cdot L^2 \\ &= 1/8 \times 0.900 \times 20^2 \\ &= 45 \text{ t.m} = 44.1301 \cdot 10^7 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

d. Momen inersia balok :

$$\begin{aligned} I &= 0.0833 \times b \times h^3 \\ &= 0.0833 \times 350 \times 1200^3 = 4.320 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

e. Jari-jari putar balok :

$$\begin{aligned} r^2 &= 0.0833 \times h^2 \\ &= 0.0833 \times 1200^2 = 12.0 \cdot 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

f. Titik pusat balok :

$$k' = 0.167 \times h$$

$$= 0.167 \times 1200 = 200 \text{ mm}$$

$$k_b = 0.167 \times h$$

$$= 0.167 \times 1200 = 200 \text{ mm}$$

diperoleh : $k_b = k' = 183.7 \text{ mm}$

g. Modulus tampang balok :

$$S' = \frac{Ic}{C'}$$

$$= \frac{4.3200 \cdot 10^{10}}{600} = 7.200 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{Ic}{C_b}$$

$$= \frac{4.320 \cdot 10^{10}}{600} = 7.200 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

diperoleh : $S' = S_b = 7.200 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

3.5 Perhitungan Gaya Prategang

$$M_D = 44.1301 \cdot 10^7 \text{ N.mm}$$

$$M_T = M_D + M_{SD} + M_L$$

$$= (44.1301 \cdot 10^7) + (73.5503 \cdot 10^7) + (58.8402 \cdot 10^7)$$

$$= 176.5206 \cdot 10^7 \text{ N.mm}$$

$$\frac{M_D}{M_T} = \frac{44.1301 \cdot 10^7}{176.5206 \cdot 10^7} = 0.25 > 0.20$$

Lin & Burns (1993) memberikan persamaan dalam menentukan gaya prategang

efektif dan awal untuk perbandingan $\frac{M_D}{M_T} > 0.20$

$$P_e = \frac{M_T}{0.65 \times h}$$

$$= \frac{176.5206 \cdot 10^7}{0.65 \times 1200} = 2.2630 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Gaya prategang awal setelah kehilangan gaya prategang yang diasumsikan 20 %

$$P_o = \frac{P_e}{1 - 0.20}$$

$$= \frac{2.2630 \cdot 10^6}{0.8} = 2.8288 \cdot 10^6 \text{ N}$$

3.6 Eksentrisitas tendon

Lin & Burns (1993) memberikan persamaan :

$$e - k_b = \frac{M_D}{P_o}$$

$$e = \frac{M_D}{P_o} + k_b = \frac{44.1301 \cdot 10^7}{2.8288 \cdot 10^6} + 200 = 356 \text{ mm}$$

$$d = C_b - e$$

$$= 600 - 356 = 244 \text{ mm}$$

Dengan gaya prategang :

$$P_e = \frac{M_T}{e + k'} = \frac{176.5206 \cdot 10^7}{356 + 200} = 3.1748 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$P_o = \frac{P_e}{1 - 0.2}$$

$$= \frac{3.1748 \cdot 10^6}{0.8} = 3.9685 \cdot 10^6 \text{ N}$$

3.7 Kontrol Luas Penampang

Untuk mengontrol ukuran balok yang dipakai, Lin & Burns (1993) mengajukan persamaan dengan menggunakan luas penampang sebagai kontrol :

$$\begin{aligned}
 A_c &= \frac{P_o}{f_{ci}} \cdot \left[1 + \frac{e - (M_D / P_o)}{k'} \right] \leq A_c = 360000 \text{ mm}^2 \\
 &= \frac{3.9685 \cdot 10^6}{25.65} \cdot \left[1 + \frac{356 - (44.101 \cdot 10^7 / 3.9685 \cdot 10^6)}{200} \right] \\
 &= 344094.7368 \text{ mm}^2 < 360000 \text{ mm}^2 \quad \text{OK !}
 \end{aligned}$$

3.8 Perhitungan Tendon

Pada bagian di depan telah dapat diketahui bahwa gaya prategang awal yang terjadi : $P_o = 3.9685 \cdot 10^6$ N. Berdasarkan lampiran 2, digunakan kabel tendon VSL tipe 5-12 dan tipe *strand* ASTM A416-85 *Grade* 270 dengan minimal beban patah : 2204 kN.

Jumlah tendon yang diperlukan :

$$\frac{3.9685 \cdot 10^6}{2.204 \cdot 10^6} = 1.8006 \approx 2.0$$

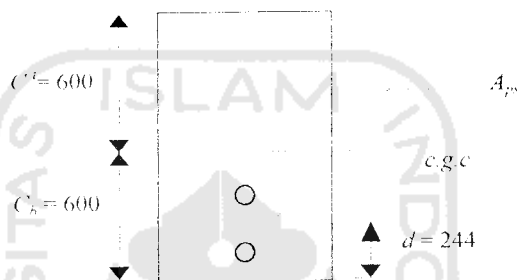
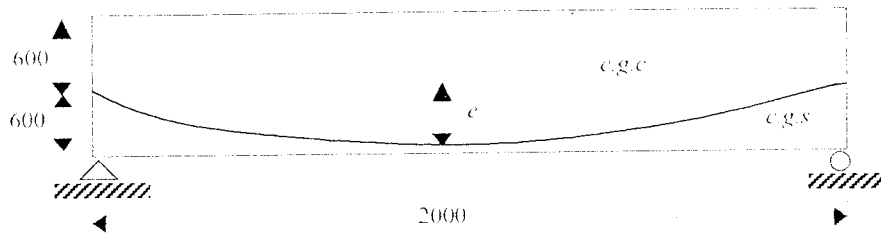
Jadi dipakai 2 buah kabel tendon VSL berisi 12 kabel.

Angkur mati yang digunakan yaitu VSL tipe P dan angkur hidup/ujung VSL tipe Ec dapat dilihat pada lampiran 2.

Data yang diperlukan mengenai kabel tendon adalah sebagai berikut ini.

- a. Diameter satuan kabel : 15.2 mm
- b. Luas satuan kabel : 98.7 mm²
- c. Kuat tarik tendon : 1860 Mpa.

- d. Tegangan leleh kawat : 1670 Mpa.
e. Diameter internal/eksternal selubung 65/72 mm



Gambar 3.3. Lintasan tendon dan bentuk penampang yang dianalisa

3.9 Perhitungan Sifat Penampang

3.9.1 Saat transfer

Pada saat transfer luas, perhitungan sifat-sifat penampang merupakan sifat penampang netto dari balok.

Luas penampang netto :

$$A_c = 1200 \times 300 = 360000 \text{ mm}^2$$

$$A_{sheath} = 2 \times 1/4 \times \pi \times 72^2 = 8146.2857 \text{ mm}^2$$

$$A_{netto} = 360000 - 8146.2857$$

$$= 351853.7143 \text{ mm}^2 = 3.5183 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

Dengan menggunakan luas penampang netto dan sisi bawah sebagai acuan maka diperoleh :

3.9.2 Saat layan

Pada saat layan luas penampang yang digunakan merupakan luas penampang transformasi.

$$n = \frac{E_{ps}}{E_c}$$

$$= \frac{195000}{4730 \cdot \sqrt{45}} = 6.1456$$

$$A_c = 360000 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} = 2 \times 12 \times 98.7$$

$$= 2368.8 \text{ mm}^2$$

Luas transformasi yang tersedia :

$$A_{transf.} = A_c + (n-1) \cdot A_{ps}$$

$$= 360000 + (6.1456 - 1) \times 2368.8$$

$$= 3.7218 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

Dengan menggunakan luas transformasi dan sisi bawah penampang sebagai acuan, maka diperoleh :

$$C_b = \frac{(360000 \times 600) + (2368.8 \times 244)}{3.7218 \cdot 10^5}$$

$$= 581.9032 \text{ mm}$$

sedangkan,

$$C^t = h - C_b$$

$$= 1200 - 581.9032 = 618.0968 \text{ mm}$$

Momen inersia penampang transformasi :

$$\begin{aligned}
 I_{transf} &= \left(1/12 \times 300 \times 1200^3\right) + \left[(360000) \times (581.9032 - 600)^2\right] \\
 &\quad + \left[(6.1456 - 1) \times 2368.8 \times (581.9032 - 244)^2\right] \\
 &= 4.4709 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Modulus penampang transformasi :

$$\begin{aligned}
 S^t &= \frac{I}{C^t} \\
 &= \frac{4.4709 \cdot 10^{10}}{618.0968} = 7.2334 \cdot 10^7 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_b &= \frac{I}{C_b} \\
 &= \frac{4.4709 \cdot 10^{10}}{581.9032} = 7.6833 \cdot 10^7 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Jari-jari putar penampang transformasi :

$$\begin{aligned}
 r^2 &= \frac{I}{A_{transf.}} \\
 &= \frac{4.4709 \cdot 10^{10}}{3.7218 \cdot 10^5} = 13.9172 \cdot 10^4 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

3.10 Kontrol Eksentrisitas Penampang

$$\begin{aligned}
 f_{pi} &= 75\% \cdot f_{pu} \\
 &= 0.75 \times 1860 = 1395 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_i &= A_{ps} \cdot f_{pi} \\
 &= 23678.8 \times 1395 = 3.3044 \cdot 10^6 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$I_n \geq -\frac{P_t}{A_{netto}} + \frac{P_t}{I_{netto}} \frac{e(x)}{C'} - \frac{M_D}{I_{netto}} \frac{C'}{C'}$$

$$1.6346 \geq -\frac{3.3044 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} + \frac{3.3044 \cdot 10^6 \times e(x) \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$\frac{44.1301 \cdot 10^7 \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$e(x) \leq 376.0668 \text{ mm}$$

$$e_{ada} = C_b - d$$

$$= 619.5406 - 244 = 375.5406 \text{ mm} < e(x)_{kritis} = 376.0668 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

3.11 Perhitungan Koefisien Rangkak

1. Saat pembebanan luar.

Setelah pemberian gaya prategang, maka pada 1 hari kemudian beban mati dan beban hidup mulai bekerja pada balok beton prategang.

a. Pada umur 1 hari.

$$C_{r(1\text{hari})} = \left(\frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \right) \cdot C_u$$

$$= \left(\frac{1^{0.6}}{10 + 1^{0.6}} \right) \times 2.35 = 0.2136$$

Faktor koreksi yang sangat utama mempengaruhi pada rangkak adalah kelembaban relatif, umur beton terhadap pembebanan setelah masa pengerasan awal dan ketebalan rata-rata unsur .

a. Faktor koreksi kelembaban

Untuk kelembaban 60 %, faktor koreksi dapat dihitung dengan Persamaan (2.30)

dan menghasilkan nilai $K_H = 0.868$

$$f_{ii} \geq \frac{P_i}{A_{netto}} + \frac{P_i \cdot e(x)}{I_{netto}} - \frac{C' \cdot M_{Dv} \cdot C'}{I_{netto}}$$

$$1.6346 \geq \frac{3.3044 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} + \frac{3.3044 \cdot 10^6 \times e(x) \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$\frac{44.1301 \cdot 10^7 \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$e(x) \leq 376.0668 \text{ mm}$$

$$e_{ada} = C'_b - d$$

$$= 619.5406 - 244 = 375.5406 \text{ mm} < e(x)_{kritis} = 376.0668 \text{ mm} \text{ OK!}$$

3.11 Perhitungan Koefisien Rangkak

1. Saat pembebanan luar.

Setelah pemberian gaya prategang, maka pada 1 hari kemudian beban mati dan beban hidup mulai bekerja pada balok beton prategang.

a. Pada umur 1 hari.

$$C_{r(1hari)} = \left(\frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \right) \cdot C_u$$

$$= \left(\frac{1^{0.6}}{10 + 1^{0.6}} \right) \times 2.35 = 0.2136$$

Faktor koreksi yang sangat utama mempengaruhi pada rangkak adalah kelembaban relatif, umur beton terhadap pembebanan setelah masa pengerasan awal dan ketebalan rata-rata unsur.

a. Faktor koreksi kelembaban

Untuk kelembaban 60 %, faktor koreksi dapat dihitung dengan Persamaan (2.30)

dan menghasilkan nilai $K_{II} = 0.868$

b. Faktor koreksi terhadap umur pembebanan.

Balok dirawat dengan cara *steam cured concrete* dan diberi beban pertama kali pada umur 1 hari dan faktor koreksi ini dapat dihitung dengan Persamaan (2.29b) dan menghasilkan nilai $K_{T0} = 1.13$.

c. Faktor koreksi terhadap ketebalan rata-rata unsur.

$$\frac{v}{s} = \frac{360000}{3000} \times \frac{645.2}{1.638 \cdot 10^4} = 4.7267$$

Faktor koreksi terhadap ketebalan rata-rata unsur ini dapat dihitung dengan Persamaan (2.31) dan menghasilkan nilai $K_T = 0.7418$.

Jadi besarnya koefisien rangkai pada saat diberi beban luar adalah :

$$C_{r(1hari)} = 0.2136 \times 0.868 \times 1.13 \times 0.7418 = 0.1558$$

2. Pada akhir umur 5 tahun.

$$C_{r(5tahun)} = \left(\frac{1825^{0.6}}{10 + 1825^{0.6}} \right) \times 2.35$$

$$= 2.1162 \text{ mm/mm}$$

$$C_{r(5tahun)} = 2.1162 \times 0.868 \times 1.13 \times 0.7418 = 1.543$$

3.12 Kehilangan Tegangan Tendon

Kehilangan tegangan tendon pada balok beton *post tensioned* antara lain disebabkan oleh :

3.12.1 Akibat Pengangkuran

Diasumsikan bahwa besarnya penggelinciran yang terjadi adalah 3 mm.

Berdasarkan Persamaan (2.43) besarnya kehilangan tegangan adalah :

$$\Delta f_{p-1} = \frac{3,0 \times 195000}{20000} = 29,25 \text{ Mpa.}$$

3.12.2 Akibat Deformasi Elastis Beton

Dari Persamaan (2.47) besarnya kehilangan tegangan yang terjadi adalah :

$$f_{cs} = -\frac{3,3044 \cdot 10^6}{3,5185 \cdot 10^5} \cdot \left(1 + \frac{375,5406^2}{11,9888 \cdot 10^4}\right) + \frac{44,1301 \cdot 10^7 \times 375,5406}{4,2183 \cdot 10^{10}}$$

$$= 16,5106 \text{ Mpa.}$$

$$n = \frac{E_{ps}}{E_{ci}}$$

$$= \frac{195000}{4730 \sqrt{0,95 \times 45}} = 6,3052$$

$$\Delta f_{p-ES} = 16,5106 \times 6,3052 = 104,1026 \text{ Mpa.}$$

Tendon ditarik secara berurutan, sehingga kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton menjadi :

$$\Delta f_{p-ES} = 104,1026 \times 0,5 = 52,0524 \text{ Mpa.}$$

3.12.3 Akibat Gesekan

Untuk mencari nilai α , sebagai pendekatan dapat dilihat pada Gambar 2.14

$$\alpha = \frac{8 \times 375,5406}{20000} = 0,1502$$

Dari Tabel 2.2 digunakan :

$$K = 0,0007$$

$$\mu = 0,20$$

Kehilangan tegangan akibat gesekan dapat dihitung dengan Persamaan (2.48)

$$\Delta f_{p-FR} = 1395 \times [(0,20 \times 0,1502) + (0,0007 \times 20)] = 61,4403 \text{ Mpa}$$

3.12.4 Akibat Rangkak Beton

$$f_{pu} = 1395 - 29.25 - 52.0524 - 61.4403 = 1252.2572 \text{ Mpa}$$

dengan $1252.2572 < 0.7 \cdot f_{pu} = 0.7 \times 1860 = 1320 \text{ Mpa}$ OK!

$$P_i = 1252.2572 \times 2368.8 = 2.9663 \cdot 10^6 \text{ Mpa}$$

$$f_{cs} = -\frac{2.9663 \cdot 10^6}{3.7218 \cdot 10^5} + \left(1 + \frac{375.5406^2}{12.0126}\right) + \frac{44.1301 \cdot 10^7 \times 375.5406}{4.4709 \cdot 10^{10}}$$

$$= 13.6202 \text{ Mpa}$$

$$f_{csd} = \frac{73.5503 \cdot 10^7 \times 375.5406}{4.4709 \cdot 10^{10}} = 6.1778 \text{ Mpa}$$

Untuk sistem prategang *post tensioned*, nilai $K_{CR} = 1.60$, maka kehilangan tegangan akibat rangkak dapat dihitung dengan Persamaan (2.49)

$$\Delta f_{p-CR} = 6.1456 \times 1.60 \times (13.6203 - 6.1778) = 73.1807 \text{ Mpa}$$

3.12.5 Akibat Susut Beton

Pemberian gaya prategang dilakukan pada 21 hari setelah masa perawatan beton. Dari Tabel 2.3 diperoleh nilai K_{SH} dengan cara interpolasi yaitu sebesar 0.634, maka kehilangan tegangan akibat susut dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.53).

$$\Delta f_{p-SH} = 8.2 \cdot 10^6 \times 0.634 \times 195000 \times (1 - 0.06 \times 4.7267) \times (100 - 60)$$

$$= 29.0503 \text{ Mpa}$$

3.12.6 Akibat Relaksasi Baja

$$f_{pi}^* = 0.9 \times 1252.2572 = 1127.0315 \text{ Mpa}$$

$$f_{py} = 1670 \text{ Mpa}$$

Kehilangan tegangan akibat relaksasi dari baja dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.56).

$$\begin{aligned}\Delta f_{p-RF} &= 1127.0315 \times \frac{\log 43800}{10} \cdot \left(\frac{1127.0315}{1670} - 0.55 \right) \\ &= 65.3201 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh total kehilangan tegangan yang terjadi setelah akhir 5 tahun :

$$\begin{aligned}\Delta f_p &= \Delta f_{p-ES} + \Delta f_{p-CR} + \Delta f_{p-SH} + \Delta f_{p-RF} + \Delta f_{p-FR} + \Delta f_{p-AN} \\ &= 310.2939 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Tegangan efektif yang terjadi :

$$f_{pe} = 1252.2572 - 73.1807 - 29.0503 - 65.3201 = 1084.7060 \text{ Mpa}$$

Gaya efektif yang ada :

$$\begin{aligned}P_e &= f_{pe} \cdot A_{ps} \\ &= 1084.7060 \times 2368.8 = 2.5694 \cdot 10^6\end{aligned}$$

Prosentase kehilangan tegangan umur 5 tahun :

$$= \left(\frac{1252.2572 - 1084.7060}{1252.2572} \right) \times 100\% = 13.3799\%$$

3.13 Kontrol Tegangan

Kontrol tegangan diperlukan agar balok yang didesain dapat digunakan dan tidak melampaui batas tegangan yang diijinkan.

1. Saat transfer

a. Pada serat atas :

$$f^t = -\frac{P_i}{A_t} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C^t}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S^t} \leq f_u$$

$$= -\frac{2.9663 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 - \frac{375.5406 \times 580.4593}{11.9888 \cdot 10^4}\right) - \frac{44.1301 \cdot 10^7}{7.2672 \cdot 10^7}$$

$$= 0.8257 \text{ Mpa} < 1.636 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_t}{A_{netto}} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ci}$$

$$= -\frac{2.9663 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 + \frac{375.5406 \times 619.5406}{11.9888 \cdot 10^4}\right) + \frac{44.1301 \cdot 10^7}{6.8088 \cdot 10^7}$$

$$= -18.3102 \text{ Mpa} < -25.26 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

2. Saat Layan

a. Pada serat atas :

$$f_t = -\frac{P_e}{A_{netto}} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S'_{netto}} - \frac{M_{SD} + M_L}{S'_{transf.}} \leq f_{ts}$$

$$= -\frac{2.5694 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 - \frac{375.5406 \times 580.4593}{11.9888 \cdot 10^4}\right) - \frac{44.1301 \cdot 10^7}{7.2672 \cdot 10^7}$$

$$- \frac{(73.5503 \cdot 10^7 + 58.8402 \cdot 10^7)}{7.2334 \cdot 10^7}$$

$$= 18.3997 \text{ Mpa} < -20.25 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_{netto}} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_{b(netto)}} + \frac{M_{SD} + M_L}{S_{b(transf.)}} \leq f_{ts}$$

$$= -\frac{2.5694 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 + \frac{375.5406 \times 619.5406}{11.9888 \cdot 10^4}\right) + \frac{44.1301 \cdot 10^7}{6.8088 \cdot 10^7}$$

$$+ \frac{(73.5503 \cdot 10^7 + 58.8402 \cdot 10^7)}{7.6833 \cdot 10^7}$$

$$= 2.2377 \text{ Mpa} < 3.354 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

3.14 Analisa Lendutan

Perhitungan lendutan pada balok beton prategang dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2.26). Persamaan tersebut dibagi menjadi beberapa bagian persamaan lendutan akibat gaya prategang, berat sendiri maupun beban mati dan beban hidup yang bekerja pada satuan waktu yang akan dianalisa.

1. Bagian (1), lendutan mula akibat dari gaya prategang.

Pada kasus ini bentuk lintasan kabel berupa parabola seperti terlihat pada Gambar 3.3 Persamaan untuk menghitung lendutannya diberikan oleh Persamaan (2.21):

$$\begin{aligned}\delta_{P_i} &= \frac{5 \cdot P_i \cdot e \cdot L^2}{48 \cdot E_{ci} \cdot I_{netto}} \\ &= \frac{5 \times 2.9663 \cdot 10^6 \times 375.5406 \times 20000^2}{48 \times 30926.388 \times 4.2183 \cdot 10^{10}} \\ &= 35.5793 \text{ mm } (\uparrow)\end{aligned}$$

2. Bagian (2), lendutan mula akibat beban mati balok. Untuk menghitung besar lendutan ini diberikan Persamaan (2.23).

$$\begin{aligned}\delta_D &= \frac{5 \cdot M_D \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_{netto}} \\ &= \frac{5 \times 44.1301 \cdot 10^7 \times 20000^2}{48 \times 31729.786 \times 4.2183 \cdot 10^{10}} \\ &= 14.0946 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

3. Bagian (3), lendutan akibat rangkai dari balok beton yang diakibatkan oleh gaya prategang.

$$\delta'_{pi} = \left[-\frac{\Delta P}{P_i} + (k_r \cdot C_i) \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{2 \cdot P_i} \right) \right] \cdot \delta_{pi}$$

$$k_r = 1.0$$

$$C_i = 1.5434$$

$$\frac{\Delta P}{P_i} = \frac{(310.2939 - 52.0524) \times 2368.8}{3.3044 \cdot 10^6} = 0.20622$$

$$1 - \frac{\Delta P}{2 \cdot P_i} = 1 - \left(\frac{0.2062}{2} \right) = 0.8968$$

Lendutan yang terjadi :

$$\delta'_{pi} = [-0.2062 + (1.0 \times 1.5434 \times 0.8968)] \times 35.5793 = 41.9141 \text{ mm } (\uparrow)$$

4. Bagian (4), lendutan akibat rangkai dari balok beton akibat berat sendiri balok.

$$\begin{aligned} \delta_{D'} &= (k_r \cdot C_i) \cdot \delta_{D'} \\ &= 1.0 \times 1.5434 \times 14.0946 = 21.6025 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

5. Bagian (5), lendutan mula dari balok beton akibat beban mati.

$$\begin{aligned} \delta_{SD} &= \frac{5}{48} \frac{M_{SD}}{E_C} \frac{I^2}{I_{transf.}} \\ &= 21.6025 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

6. Bagian (6), lendutan akibat rangkai dari balok beton, yang disebabkan oleh beban mati .

$$\delta_{SD'} = (k \cdot C_i \cdot \beta_s) \cdot \delta_{SD}$$

Untuk mendapatkan nilai β_s , dimana beban mati mulai bekerja pada saat 1 hari setelah pemberian gaya prategang, sehingga diperoleh nilai :

$$\beta_s = 1.13 \times 1^{-0.095} = 1.13$$

Lendutan yang terjadi :

$$\delta_{SD'} = 1.0 \times 1.5434 \cdot 1.13 \cdot 21.6025 = 37.6759 \text{ mm } (\downarrow)$$

7. Bagian (7), lendutan dari balok beton akibat beban hidup.

$$\begin{aligned} \delta_L &= \frac{5 \cdot M_L \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_{transf.}} \\ &= \frac{5 \times 58.8402 \cdot 10^7 \times 20000^2}{31729.786 \times 4.4709 \cdot 10^{10}} = 17.2820 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

Lendutan sesaat yang merupakan lendutan akibat berat sendiri balok ke atas dilawan oleh *camber* (lendutan ke atas) yang disebabkan oleh gaya prategang dan terjadi sebelum beban luar bekerja. Besar lendutan sesaat ini adalah :

$$\delta_{T(0\text{tahun})} = 35.5793 - 14.0946 = 21.4847 \text{ mm } (\uparrow)$$

Sedangkan lendutan yang terjadi pada akhir umur 5 tahun adalah :

$$\begin{aligned} \delta_{T(5\text{tahun})} &= 35.5793 - 14.0946 + 41.9141 - 21.7538 - 21.6025 \\ &\quad - 37.6759 - 17.2820 \\ &= 34.9155 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

Hasil analisa lendutan pada bentuk penampang persegi panjang di atas dapat di tabelkan menurut bagiannya masing masing sebagai berikut ini.

Tabel 3.1 Hasil analisa lendutan umur 5 tahun penampang persegi panjang..

Lendutan / <i>camber</i> akibat gaya-gaya yang bekerja.	Besarnya lendutan / <i>camber</i> (mm)
<i>Camber</i> akibat gaya prategang.	35.5793
Lendutan akibat berat sendiri balok.	-14.0946
<i>Camber</i> akibat rangkai dari balok disebabkan gaya prategang.	41.9141
Lendutan akibat rangkai dari balok disebabkan berat sendiri balok.	-21.7538
Lendutan dari balok di bawah beban mati.	-21.6025
Lendutan akibat rangkai dari balok di bawah beban mati.	-37.6759
Lendutan akibat beban hidup	-17.2830
Lendutan <i>ultimate</i> ($\Sigma\delta$)	-34.9155

3.15 Kontrol Lendutan

Dari Tabel 2.5 diperoleh batasan persyaratan lendutan maksimum yang diijinkan terhadap pemakaian balok.

$$\frac{l}{180} = \frac{20000}{180} = 111.1111 \text{ mm} \gg 17.2820 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{l}{240} = \frac{20000}{240} = 83.3333 \text{ mm} \gg 17.2820 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{l}{360} = \frac{20000}{360} = 55.5556 \text{ mm} > 34.9155 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{l}{480} = \frac{20000}{480} = 41.6667 \text{ mm} > 34.9155 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

Jadi balok tampang persegi panjang yang didesain untuk menahan beban-beban yang terjadi untuk umur layan 5 tahun masih aman.

Dari analisa lendutan balok beton prategang penampang persegi-panjang pada contoh perhitungan merupakan lendutan *ultimate* yang terjadi setelah umur 5 tahun setelah pemberian gaya prategang yang besarnya adalah -34.9155 mm. Dengan cara yang sama untuk balok tampang T tunggal dan I simetris hasil analisa lendutannya untuk umur layan 5 tahun seperti pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.2. Hasil analisa lendutan umur 5 tahun balok tampang T tunggal

Lendutan / camber akibat gaya-gaya yang bekerja.	Besarnya lendutan / camber (mm)
<i>Camber</i> akibat gaya prategang.	37.7020
Lendutan akibat berat sendiri balok.	-12.6764
<i>Camber</i> akibat rangkai dari balok disebabkan gaya prategang.	47.7734
Lendutan akibat rangkai dari balok disebabkan berat sendiri balok.	-21.3248
Lendutan dari balok di bawah beban mati.	-20.60504
Lendutan akibat rangkai dari balok di bawah beban mati.	-39.1687
Lendutan akibat beban hidup	-16.4840
Lendutan <i>ultimate</i> ($\Sigma\delta$)	-24.7835

Tabel 3.3. Hasil analisa lendutan umur 5 tahun penampang I simetris

Lendutan / <i>camber</i> akibat gaya-gaya yang bekerja.	Besarnya Lendutan / <i>camber</i> (mm)
<i>Camber</i> akibat gaya prategang.	35.9611
Lendutan akibat berat sendiri balok.	-12.6674
<i>Camber</i> akibat rangkai dari balok disebabkan gaya prategang.	45.6217
Lendutan akibat rangkai dari balok disebabkan berat sendiri balok.	-21.1861
Lendutan dari balok di bawah beban mati.	-21.0872
Lendutan akibat rangkai dari balok di bawah beban mati.	-39.8361
Lendutan akibat beban hidup	-16.8626
Lendutan <i>ultimate</i> ($\Sigma\delta$)	-30.0487

Sedangkan untuk variasi waktu lama pembebanan, hasil analisa lendutan yang terjadi pada balok tampang persegi panjang, T tunggal dan I simetris ditampilkan dalam bentuk tabel, yaitu seperti terlihat pada Tabel 3.4, Tabel 3.5 dan Tabel 3.6.berikut ini.

Tabel 3.4 Hasil analisa lendutan balok tampang persegi panjang terhadap variasi lama pembebanan

Lama Pembebanan	Bagian							$d_{ultimate}$ (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	
0 Tahun	35,5793	-14,0947	-	-	-	-	-	21,4847
1 Hari	35,5793	-14,0947	-0,9596	-2,1961	-21,6025	-3,8035	-17,2820	-24,3590
1 Minggu	35,5793	-14,0947	7,1332	-5,8758	-21,6025	-10,1764	-17,2820	-26,3188
1 Bulan	35,5793	-14,0947	17,4279	-10,5060	-21,6025	-18,1956	-17,2820	-28,6735
0.5 Tahun	35,5793	-14,0947	31,2869	-16,7782	-21,6025	-29,0585	-17,2820	-31,9496
1 Tahun	35,5793	-14,0947	35,5200	-18,7241	-21,6025	-32,4288	-17,2820	-33,0328
2 Tahun	35,5793	-14,0947	38,8410	-20,2756	-21,6025	-35,1159	-17,2820	-33,9503
3 Tahun	35,5793	-14,0947	40,3723	-21,0044	-21,6025	-36,3780	-17,2820	-34,4101
4 Tahun	35,5793	-14,0947	41,2903	-21,4482	-21,6025	-37,1466	-17,2820	-34,7043
5 Tahun	35,5793	-14,0947	41,9142	-21,7538	-21,6025	-37,6760	-17,2820	-34,9155
6 Tahun	35,5793	-14,0947	42,3708	-21,9804	-21,6025	-38,0684	-17,2820	-35,0779
8 Tahun	35,5793	-14,0947	43,0021	-22,2989	-21,6025	-38,6201	-17,2820	-35,3168
10 Tahun	35,5793	-14,0947	43,4231	-22,5159	-21,6025	-38,9959	-17,2820	-35,4886

Tabel 3.5 Hasil analisa lendutan balok tampang T tunggal terhadap lama pembebanan

Lama Pembebanan	Bagian							$d_{ultimate}$ (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	
0 Tahun	37,7021	-12,6765	-	-	-	-	-	25,0256
1 Hari	37,7021	-12,6765	-1,4077	-2,1528	-20,6050	-3,9542	-16,4840	-19,5781
1 Minggu	37,7021	-12,6765	7,8824	-5,7599	-20,6050	-10,5796	-16,4840	-20,5205
1 Bulan	37,7021	-12,6765	19,6781	-10,2988	-20,6050	-18,9165	-16,4840	-21,6007
0.5 Tahun	37,7021	-12,6765	35,5600	-16,4473	-20,6050	-30,2098	-16,4840	-23,1605
1 Tahun	37,7021	-12,6765	40,4169	-18,3549	-20,6050	-33,7137	-16,4840	-23,7151
2 Tahun	37,7021	-12,6765	44,2329	-19,8758	-20,6050	-36,5072	-16,4840	-24,2136
3 Tahun	37,7021	-12,6765	45,9953	-20,5902	-20,6050	-37,8194	-16,4840	-24,4778
4 Tahun	37,7021	-12,6765	47,0535	-21,0252	-20,6050	-38,6184	-16,4840	-24,6535
5 Tahun	37,7021	-12,6765	47,7735	-21,3249	-20,6050	-39,1688	-16,4840	-24,7836
6 Tahun	37,7021	-12,6765	48,3012	-21,5470	-20,6050	-39,5767	-16,4840	-24,8860
8 Tahun	37,7021	-12,6765	49,0319	-21,8592	-20,6050	-40,1502	-16,4840	-25,0410
10 Tahun	37,7021	-12,6765	49,5203	-22,0719	-20,6050	-40,5410	-16,4840	-25,1561

Tabel 3.6 Hasil analisa lendutan balok tampang I simetris terhadap variasi lama pembeban

Lama Pembebanan	Bagian							$d_{ultimate}$ (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	
0 Tahun	35,9612	-12,6674	-	-	-	-	-	23,2937
1 Hari	35,9612	-12,6674	-1,1195	-2,1388	-21,0783	-4,0215	-16,8626	-21,9270
1 Minggu	35,9612	-12,6674	-2,1388	-5,7224	-21,0783	-10,7598	-16,8626	-23,4194
1 Bulan	35,9612	-12,6674	18,9248	-10,2318	-21,0783	-19,2388	-16,8626	-25,1930
0.5 Tahun	35,9612	-12,6674	34,0223	-16,3403	-21,0783	-30,7246	-16,8626	-27,6899
1 Tahun	35,9612	-12,6674	38,6373	-18,2356	-21,0783	-34,2881	-16,8626	-28,5335
2 Tahun	35,9612	-12,6674	42,2617	-19,7466	-21,0783	-37,1292	-16,8626	-29,2614
3 Tahun	35,9612	-12,6674	43,9347	-20,4563	-21,0783	-38,4638	-16,8626	29,6327
4 Tahun	35,9612	-12,6674	44,9388	-21,0252	-21,0783	-39,2764	-16,8626	-29,8733
5 Tahun	35,9612	-12,6674	45,6217	-21,1862	-21,0783	-39,8362	-16,8626	-30,0478
6 Tahun	35,9612	-12,6674	46,1220	-21,4069	-21,0783	-40,2511	-16,8626	-30,1831
8 Tahun	35,9612	-12,6674	46,8146	-21,7171	-21,0783	-40,8344	-16,8626	-30,3841
10 Tahun	35,9612	-12,6674	47,2771	-21,9284	-21,0783	-41,2318	-16,8626	-30,5303

