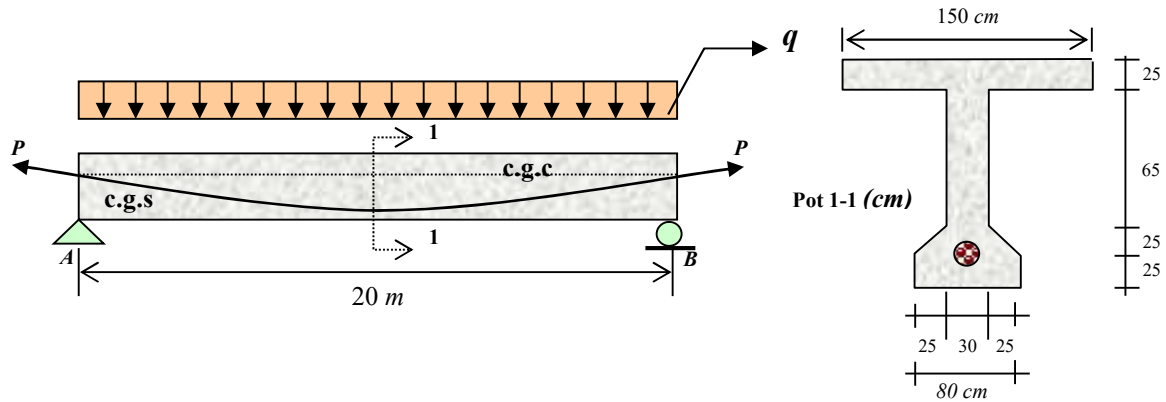


TUGAS 01 PERENCANAAN BALOK PRATEKAN

Perencanaan balok beton pratekan dengan satu bentangan di atas dua tumpuan sederhana



Data-data perencanaan:

Beban Mati (q_{DL}) = 4 t/m' ; Beban Hidup (q_{LL}) = 6 t/m'

Kuat tarik tendon yang diisyaratkan $f_{pu} = 1860$ MPa

Faktor pertimbangan terhadap tipe tendon $\gamma_p = 0,4$

Mutu beton $f_c' = 50$ MPa

Jarak titik berat tendon ke serat terluar penampang di tengah bentangan adalah 15 cm

Ditanyakan:

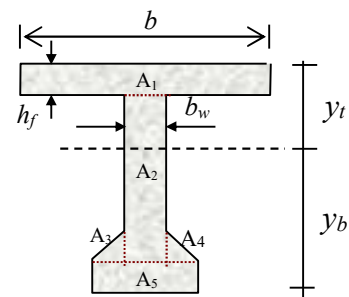
1. Desain kabel pratekan
2. Kontrol terhadap syarat pembatasan tulangan
3. Kontrol momen ultimate terhadap kapasitas momen nominal penampang
4. Kontrol tegangan pada kondisi beban kerja
5. Kontrol terhadap syarat lendutan maximum pada tiap tahap pembebanan
6. Kontrol terhadap geser

PENYELESAIAN

1. Property penampang balok pratekan

Luasan dan sumbu normal penampang

Segmen	Luas (mm^2)	Lengan momen luasan dari alas y_z (mm)	$A_i \cdot y_z$
A_1	375000	1275	478125000
A_2	270000	700	189000000
$A_3 = A_4$	2 x 31250	333,33	20833333,33
A_5	200000	125	25000000
Σ	907500		712958333,33



$$y_b = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} = \frac{712958333,33}{907500} = 785,63 \text{ mm}$$

$$y_t = h - y_b = 1400 - 785,63 = 614,37 \text{ mm}$$

Momen inersia penampang

Segmen	I_0 (mm^4)	y_i (mm) terhadap sb. normal	y_i^2 (mm^2)	A_i (mm^2)	$A_i \cdot y_i^2$	$I_i = I_0 + A_i \cdot y_i^2$
A_1	$1,95 \times 10^9$	489,37	239483	375000	$89,81 \times 10^9$	$9,176 \times 10^{10}$
A_2	$18,23 \times 10^9$	85,63	7332,50	270000	$1,98 \times 10^9$	$2,021 \times 10^{10}$
$A_3 = A_4$	$2 \times 0,11 \times 10^9$	452,30	204575,29	2×31250	$12,79 \times 10^9$	$1,301 \times 10^{10}$
A_5	$1,04 \times 10^9$	660,63	436432	200000	$87,29 \times 10^9$	$8,833 \times 10^{10}$
					$I_c = \Sigma I_i$	$21,331 \times 10^{10}$

2. Desain kabel pratekan dan penulangan non pratekan

Properti penampang

Momen ultimate berdasarkan kombinasi beban terfaktor:

$$q_u = 1,2q_{DL} + 1,6q_{LL} = 1,2(4) + 1,6(6) = 14,4 \text{ } \frac{N}{m} = 144 \text{ } \frac{N}{mm}$$

Momen di tengah bentangan $M_u = \frac{1}{8} q_u L^2$

$$M_u = \frac{1}{8}(144)(20000)^2 = 720 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Syarat momen ultimate (M_u) untuk kondisi batas:

$$M_u \leq \phi M_n \rightarrow \phi = 0,8 \text{ (faktor reduksi kekuatan akibat lentur tanpa aksial)}$$

maka momen nominal (M_n) berdasarkan beban terfaktor adalah:

$$M_n = \frac{720 \times 10^7}{0,8} = 900 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Pada balok T murni diperoleh:

$$A_{ps} = A_{psf} + A_{psw} \text{ sehingga } M_n = M_{nf} + M_{nw}$$

$$M_{nf} = A_{psf} f_{ps} \left(d_p - \frac{h_f}{2} \right) \rightarrow \text{untuk bagian flange}$$

$$M_{nw} = A_{psw} f_{ps} \left(d_p - 0,59 \frac{A_{ps} f_{ps}}{f_c' b_w} \right) \rightarrow \text{untuk bagian web}$$

Tegangan tarik pada tulangan pratekan (f_{ps}) untuk lekatan penuh disaat kekuatan nominal penampang terpenuhi:

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[\left(\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} \right) + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right)$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{(f_c' - 30)}{7} (0,05) = 0,85 - \frac{(50 - 30)}{7} (0,05) = 0,707$$

$$\rho_p = 0,01 \text{ (estimasi)} \quad ; \quad d_p = 1150 \text{ mm}$$

Untuk tahap perancangan, suku $\frac{d}{d_p} (\omega - \omega')$ sementara diabaikan sehingga dianggap full-prestressing.

Nilai estimasi untuk kondisi tulangan tekan dan tarik non-pratekan diabaikan adalah:

$$f_{ps} = 1860 \left(1 - \frac{0,4}{0,707} \left(0,01 \frac{1860}{50} \right) \right) = 1468,532 \text{ MPa}$$

Kesetimbangan gaya tekan untuk flange $A_{psf} f_{ps} = 0,85 f_c' h_f (b - b_w)$

Luas penampang tendon yang disumbangkan oleh kapasitas tekan penampang flange adalah:

$$A_{psf} = \frac{0,85 f_c' h_f (b - b_w)}{f_{ps}} = \frac{0,85(50)(250)(1500 - 300)}{1468,532} = 8682,14 \text{ mm}^2$$

Luas penampang tendon pratekan (A_{ps}) terhadap kapasitas momen nominal penampang keseluruhan:

$$M_n = A_{psw} f_{ps} d_p \left(1 - 0,59 \frac{A_{psw} f_{ps}}{d_p b_w f_c'} \right) + A_{psf} f_{ps} \left(d_p - \frac{h_f}{2} \right)$$

$$M_n = (A_{ps} - A_{psf}) f_{ps} \left(d_p - 0,59 \frac{(A_{ps} - A_{psf}) f_{ps}}{b_w f_c'} \right) + A_{psf} f_{ps} \left(d_p - \frac{h_f}{2} \right)$$

$$900 \times 10^7 = (A_{ps} - 8682,14)(1468,532) \left(1150 - 0,59 \frac{(A_{ps} - 8682,14) 1468,532}{300 \cdot 50} \right) + (8682,14)(1468,532) \left(1150 - \frac{250}{2} \right)$$

$$\Rightarrow -84,826 A_{ps}^2 + 3161766,77 A_{ps} - 1,708 \times 10^{10} = 0$$

Nilai akar yang menentukan adalah $A_{ps} = 6554,719 \text{ mm}^2$

Untuk kawat pratekan yang sesuai dengan spesifikasi VSL, **1 strand = 98,7 mm²**, jadi jumlah strand yang dibutuhkan adalah:

$$\text{Jumlah strand} = \frac{A_{ps}}{98,7} = \frac{6554,719}{98,7} = 66,41 \approx 67 \text{ strands}$$

Dalam spesifikasi VSL, tipe angkur tendon berdasarkan jumlah strand adalah:

7 strands ; 12 strands ; 19 strands

Untuk kebutuhan ini dipakai: **3 angkur tendon dengan 19 strands + 2 angkur tendon dengan 7 strands masing-masing dengan lima strands**, Jadi luas total kabel pratekan terpasang adalah:

$$A_{ps}' = (3(19) + 2(5))98,7 = 6612,9 \text{ mm}^2 > A_{ps} = 6554,719 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} = A_{ps}' = 6612,9 \text{ mm}^2 \text{ yang dipakai dalam perhitungan selanjutnya}$$

3. Kontrol terhadap syarat pembatasan tulangan

Kontrol dilakukan dengan menganggap kondisi prategang penuh. Rasio tulangan pratekan dengan lebar balok (b_w) = 300 mm dan jarak titik berat kabel rencana dari serat atas (d_p) = 1200 mm adalah:

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b_w d_p} = \frac{6612,9}{300(1150)} = 0,0192$$

Dengan memasukkan nilai ρ_b yang baru, maka tegangan tarik yang terjadi pada tulangan pratekan saat penampang mencapai kekuatan nominalnya adalah:

$$f_{ps} = 1860 \left(1 - \frac{0,4}{0,707} \left(0,0192 \frac{1860}{50} \right) \right) = 1108,381 \text{ MPa} < f_{ps} \text{ awal} \rightarrow N.G$$

Batasan tulangan prategang penuh pada komponen struktur lentur $\omega_p \leq 0,36\beta_1$

$$\omega_p = \rho_p \frac{f_{ps}}{f_c'} = 0,0192 \frac{1108,381}{50} = 0,4256$$

$$\omega_p > 0,36\beta_1 = 0,36(0,707) = 0,255 \rightarrow N.G$$

Untuk kondisi tersebut, maka perlu dilakukan perubahan, yaitu dengan meredistribusi sebagian luas tulangan pratekan menjadi tulangan tarik dan tekan.

Tulangan pratekan

Jika luas tulangan pratekan dikurangi sebesar 65% (persentase prategang $p = 60\%$ sampai 70%), maka balok dalam kondisi *Pratekan Parsial*, sehingga diperoleh:

$$A_{ps} = 0,65(6554,719) = 4260,567 \text{ mm}^2$$

Jumlah strand yang dibutuhkan adalah:

$$\text{Jumlah strand} = \frac{A_{ps}}{98,7} = \frac{4260,567}{98,7} = 43,2 \approx 44 \text{ strands}$$

Untuk kebutuhan ini dipakai: **2 angkur tendon dengan 19 strands + 1 angkur tendon dengan 7 strands (dipakai hanya 6 strands)**, Jadi luas total kabel pratekan terpasang adalah:

$$A_{ps} = (2(19) + 1(6))98,7 = 4342,8 \text{ mm}^2 > 4260,567 \text{ mm}^2$$

Rasio tulangan pratekan dengan lebar balok (b_w) = 300 mm dan jarak titik berat kabel rencana dari serat atas (d_p) = 1150 mm adalah:

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b_w d_p} = \frac{4342,8}{300(1150)} = 0,0126$$

$$\omega_p = \rho_p \frac{f_{pu}}{f_c} = 0,0126 \frac{1860}{50} = 0,4687$$

Tulangan non-pratekan

Luas tulangan non pratekan yang harus didistribusikan adalah 35% dari total tulangan tarik pratekan penuh. Nilai total tersebut dicoba, terdiri atas 15% ditempatkan sebagai tulangan serat bawah dan 20% ditempatkan sebagai tulangan serat atas pada flange:

Pada serat atas:

$$A'_s = 0,15(6554,719) = 942,98 \text{ mm}^2$$

Jika dipakai tulangan **5D16** diperoleh $A'_s = 1005,31 \text{ mm}^2$, dengan mutu baja $f_y = 400 \text{ MPa}$ dan jarak $d' = 100 \text{ mm}$ maka diperoleh rasio dan indeks penulangan sebagai berikut:

$$\rho'_w = \frac{A'_s}{b_w d'} = \frac{1005,31}{300(100)} = 0,0335 \rightarrow \omega'_w = \rho'_w \frac{f_y}{f_c} = 0,0335 \frac{400}{50} = 0,268$$

Pada serat bawah:

$$A_s = 0,20(6286,536) = 1257,307 \text{ mm}^2$$

Jika dipakai tulangan **5D19** diperoleh $A_s = 1417,645 \text{ mm}^2$, dengan jarak $d = 1320 \text{ mm}$ maka diperoleh rasio dan indeks penulangan sebagai berikut:

$$\rho_w = \frac{A_w}{b_w d} = \frac{1417,645}{300(1320)} = 0,0036 \rightarrow \omega_w = \rho_w \frac{f_y}{f_c} = 0,0036 \frac{400}{50} = 0,0288$$

Rasio dan indeks penulangan dikontrol terhadap

$$0,17 \leq \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c} + \frac{d}{d_p} (\omega_w - \omega'_w) \right] \leq 0,36 \beta_1 = 0,255$$

$$0,17 < \left[0,0126 \frac{1860}{50} + \frac{1320}{1150} (0,0288 - 0,2272) \right] = 0,1942 < 0,255 \rightarrow O.K$$

Dengan memasukkan nilai ρ_b , ω_w , dan ω'_w yang baru untuk tendon pratekan dan tulangan non-pratekan, maka tegangan tarik yang terjadi pada tulangan pratekan saat penampang mencapai kekuatan nominalnya adalah:

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[\left(\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} \right) + \frac{d}{d_p} (\omega_w - \omega_w') \right] \right)$$

$$f_{ps} = 1860 \left(1 - \frac{0,4}{0,707} (0,1942) \right) = 1655,537 \text{ MPa} > f_{ps} \text{ awal} = 1468,532 \text{ MPa}$$

4. Kontrol momen ultimate terhadap kapasitas momen nominal penampang

Kontrol momen ultimate

$$M_u \leq \phi M_n$$

Dari perhitungan sebelumnya telah diperoleh:

$$f_{ps} = 1655,537 \text{ MPa}$$

$$A_{psf} = 8682,14 \text{ mm}^2$$

Karena semua tulangan non patekan yang diperoleh merupakan hasil redistribusi, maka luas tulangan patekan (A_{ps}) yang dipakai dalam perhitungan momen nominal adalah total keseluruhan tulangan, yaitu:

$$A_{ps} = (2(19) + 1(6))98,7 = 4342,8 \text{ mm}^2 > 4260,567 \text{ mm}^2$$

$$A'_{ps} = A_s + A'_s + A_{ps} = 1417,645 + 1005,31 + 4342,8 = 6765,755 \text{ mm}^2$$

$$M_n = A_{psw} f_{ps} d_p \left(1 - 0,59 \frac{A_{psw} f_{ps}}{d_p b_w f_c'} \right) + A_{psf} f_{ps} \left(d_p - \frac{h_f}{2} \right)$$

$$M_n = (A'_{ps} - A_{psf}) f_{ps} \left(d_p - 0,59 \frac{(A'_{ps} - A_{psf}) f_{ps}}{b_w f_c'} \right) + A_{psf} f_{ps} \left(d_p - \frac{h_f}{2} \right)$$

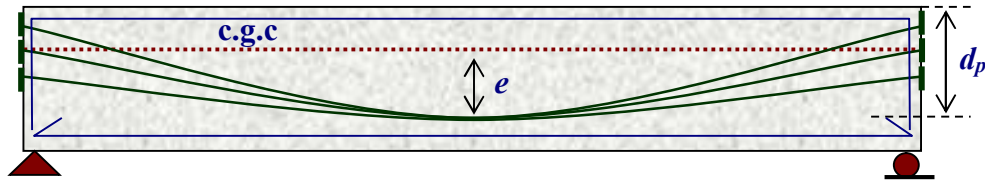
$$M_n = (6765,755 - 8682,14)(1655,537) \left(1150 - 0,59 \frac{(6765,755 - 8682,14) 1655,537}{300 \cdot 50} \right)$$

$$+ (8682,14)(1655,537) \left(1150 - \frac{250}{2} \right)$$

$$M_n = -0,404 \times 10^{10} + 1,473 \times 10^{10} = 1069 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$\phi M_n = 0,8(1069 \times 10^7) = 855 \times 10^7 \text{ Nmm} > M_u = 720 \times 10^7 \text{ Nmm} \rightarrow O.K$$

Sketsa penempatan tendon pratekan



Eksentrisitas kabel $e = y_b - s = 614,37 - 150 = 464,37 \text{ mm}$

4. Kontrol tegangan pada kondisi beban kerja

Syarat tegangan yang diizinkan adalah:

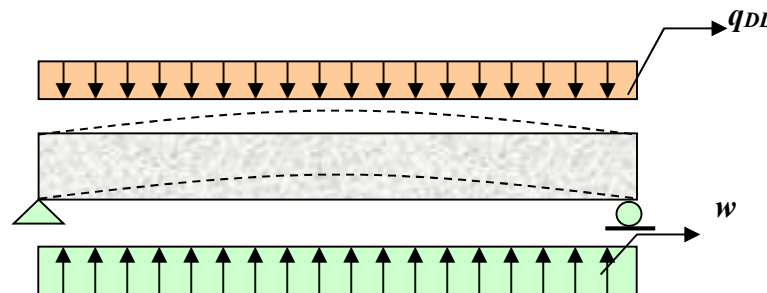
$$\text{Tekan} \leq 0,45 f_c' \rightarrow 0,45 f_c' = 22,5 \text{ MPa}$$

$$\text{Tarik} \leq 0,5 \sqrt{f_c'} \rightarrow 0,5 \sqrt{f_c'} = 3,536 \text{ MPa}$$

Gaya pratekan pada kondisi layan adalah: $P \leq 0,6 f_{pu} A_{ps}$

$$P = 0,6(1860)(4342,8) = 4846564,8 \text{ N}$$

Kontrol pada kondisi kosong ($w > q_{DL}$)



Beban ekuivalen akibat gaya pratekan dengan eksentrisitas kabel $e = 500 \text{ mm}$ adalah:

$$P.e = \frac{1}{8} wL^2$$

$$w = \frac{8P.e}{L^2} \rightarrow w = \frac{8(4846564,8)464,37}{20000^2} = 45,012 \text{ N/mm}$$

Momen di tengah bentangan:

$$M_{emp} = \frac{1}{8} (w - q_{DL}) L^2 = \frac{1}{8} (45,012 - 40) 20000^2 = 25,06 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Tegangan yang terjadi pada penampang dengan luas $A_c = 907500 \text{ mm}^2$ dan momen inersia $I_c = 21,331 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ adalah:

Tegangan serat atas penampang:

$$f_{emp}^t = \frac{-P}{A_c} + \frac{M_{emp} \cdot y_t}{I_c}$$

$$f_{emp}^t = \frac{-4846564,8}{907500} + \frac{(25,06 \times 10^7) 614,37}{21,331 \times 10^{10}}$$

$$f_{emp}^t = -5,341 + 0,722 = -4,619 \text{ MPa (tekan)}$$

Tegangan serat bawah penampang:

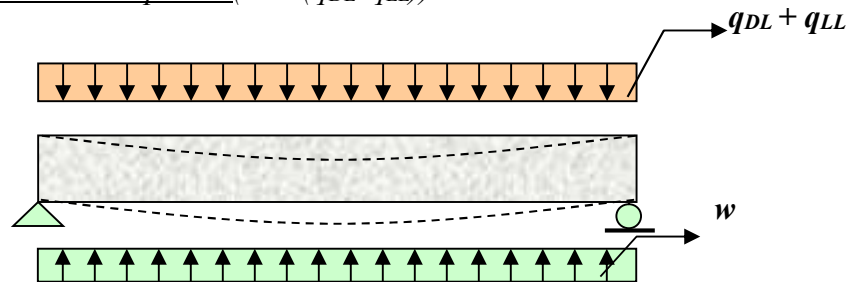
$$f_{emp}^b = \frac{-P}{A_c} - \frac{M_{emp} \cdot y_b}{I_c}$$

$$f_{emp}^b = \frac{-4846564,8}{907500} - \frac{(25,06 \times 10^7) 785,63}{21,331 \times 10^{10}}$$

$$f_{emp}^b = -5,341 - 0,923 = -6,264 \text{ MPa (tekan)}$$

Kontrol: $f_{emp}^t < 0,5 \sqrt{f_c'} = 3,536 \text{ MPa (belum terjadi tarik)} \rightarrow O.K$
 $f_{emp}^b < 0,45 f_c' = 22,5 \text{ MPa} \rightarrow O.K$

Kontrol pada kondisi penuh ($w < (q_{DL} + q_{LL})$)



Momen di tengah bentangan:

$$M_{full} = \frac{1}{8} (q_{DL} + q_{LL} - w) L^2 = \frac{1}{8} (40 + 60 - 45,012) 20000^2 = 274,94 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Tegangan serat atas penampang:

$$f_{full}^t = \frac{-P}{A_c} - \frac{M_{full} \cdot y}{I_c}$$

$$f_{full}^t = \frac{-4846564,8}{907500} - \frac{(274,94 \times 10^7) 614,37}{21,331 \times 10^{10}}$$

$$f_{full}^t = -5,341 - 7,919 = -13,26 \text{ MPa (tekan)}$$

Tegangan serat bawah penampang:

$$f_{full}^b = \frac{-P}{A_c} + \frac{M_{emp} y_b}{I_c}$$

$$f_{full}^b = \frac{-4846564,8}{907500} + \frac{(274,94 \times 10^7) 785,63}{21,331 \times 10^{10}}$$

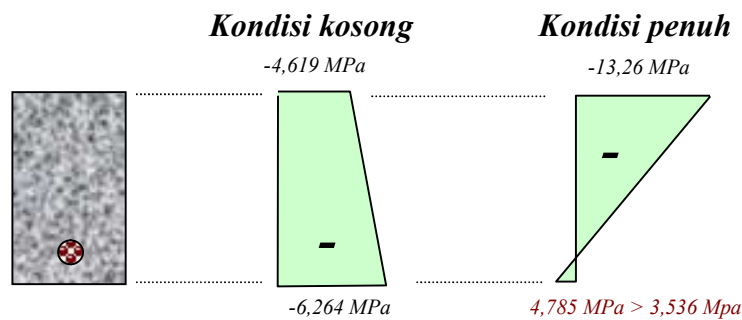
$$f_{full}^b = -5,341 + 10,126 = +4,785 \text{ MPa (tarik)}$$

Kontrol:

$$f_{full}^t < 0,45 f_c' = 22,5 \text{ MPa} \rightarrow O.K$$

$$f_{full}^b < 0,5 \sqrt{f_c'} = 3,536 \text{ MPa} \rightarrow N.G$$

Diagram tegangan pada tengah bentangan



Tegangan izin tarik pada serat bawah beton untuk kondisi penuh terlampaui, sehingga perlu dikontrol terhadap kapasitas tulangan tarik non-pratekan:

5. Kontrol lendutan maximum

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \rightarrow E_c = 4700 \sqrt{50} = 33234,019 \text{ MPa}$$

Lendutan akibat gaya pratekan:

$$\delta_{ps} = \frac{5}{48} \frac{P.e.L^2}{E_c I_c} \rightarrow \delta_{ps} = \frac{5}{48} \left(\frac{(-4846564,8)(464,37)(20000)^2}{33234,019(21,331 \times 10^{10})} \right) = -13,228 \text{ mm}$$

(ke atas)

Lendutan elastis untuk balok di atas tumpuan sederhana:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{E_c I_c}$$

Syarat lendutan untuk semua tahap pembebanan:

$$\delta \leq \frac{L}{480} \rightarrow \delta_u = \frac{20000}{480} = 41,67 \text{ mm}$$

Kontrol terhadap lendutan jangka pendek

Akibat beban mati (δ_{DL})

$$\delta_{DL} = \frac{5}{384} \frac{q_{DL} L^4}{E_c I_c} \rightarrow \delta_{DL} = \frac{5}{384} \frac{(40)(20000)^4}{(33234,019)(21,331 \times 10^{10})} = 11,755 \text{ mm}$$

(ke bawah)

Akibat beban hidup (δ_{LL})

$$\delta_{LL} = \frac{5}{384} \frac{q_{LL} L^4}{E_c I_c} \rightarrow \delta_{LL} = \frac{5}{384} \frac{(60)(20000)^4}{(33234,019)(21,331 \times 10^{10})} = 17,633 \text{ mm}$$

(ke bawah)

Lendutan akibat gaya pratekan dan beban mati:

$$\delta_1 = \delta_{ps} + \delta_{DL} = -13,228 + 11,755 = -1,473 \text{ mm} < \delta_u \rightarrow O.K \quad (\text{ke atas})$$

Lendutan akibat gaya pratekan + beban mati + beban hidup:

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \delta_{ps} + \delta_{DL} + \delta_{LL} \\ &= -13,228 + 11,755 + 17,633 = 16,16 \text{ mm} < \delta_u \rightarrow O.K \end{aligned}$$

(ke bawah)

Kontrol terhadap lendutan jangka panjang

Karena pangaruh rangkai dan susut tidak diperhitungkan secara detail maka lendutan akibat beban tetap dikalikan dengan suatu faktor (λ)

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'}$$

$\rho' = 0,0335$ (tulangan non pratekan tidak sebagai tulangan praktis)

$\xi = 2$ (faktor kostanta ketergantungan terhadap waktu untuk beban tetap, pada umur bangunan 5 tahun atau lebih)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50(0,0335)} = 0,748$$

Lendutan total jangka panjang adalah:

$$\delta_{tot..jp} = (1 + \lambda)\delta_{b.tetap} + \delta_{LL}$$

$$\delta_{tot..jp} = (\delta_{ps} + \delta_{DL})(1 + \lambda) + \delta_{LL}$$

$$\delta_{tot..jp} = (-13,228 + 11,755)(1,748) + 17,633 = 15,058\text{mm} < \delta_u \rightarrow O.K$$

(ke bawah)

6. Kontrol terhadap geser

$$\phi V_n \geq V_u$$

Faktor reduksi geser $\phi = 0,75$

$$V_n = V_c + V_s$$

Gaya geser ultimate pada tumpuan A:

$$V_{u.A} = \frac{1}{2} [1,2(q_{DL}) + 1,6(q_{LL})]L$$

$$V_{u.A} = \frac{1}{2} (144)20000 = 14,4 \times 10^5 \text{ N}$$

Gaya geser ultimate yang dipakai adalah sejarak $\frac{1}{2}h$ dari tumpuan A:

$$V_u = \frac{V_{u.A}(\frac{1}{2}L - \frac{1}{2}h)}{\frac{1}{2}L} = \frac{1440000(10000 - 700)}{10000} = 13,392 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\frac{V_u}{\phi} = \frac{13,392 \times 10^5}{0,75} = 1785600 \text{ N}$$

V_c adalah kuat geser nominal yang disumbangkan oleh beton yang merupakan nilai terkecil dari V_{ci} dan V_{cw}

1. Kuat geser nominal yang disumbangkan oleh beton pada saat terjadinya keretakan diagonal, akibat tegangan tarik utama pada bagian badan penampang adalah:

$$V_{cw} = 0,3(\sqrt{f'_c} + f_{pc})b_w d + V_p$$

Tegangan tekan beton akibat gaya prategang efektif saja (f_{pc}) adalah:

$$f_{pc} = \frac{P}{A_c} = \frac{4846564,8}{907500} = 5,341 \text{ MPa}$$

Komponen vertikal gaya prategang efektif pada penampang (V_p):

$$V_p = P \frac{dy}{dx} = P \frac{2e}{\frac{1}{2}L} = 4846564,8 \left(\frac{928,74}{10000} \right) = 450119,859 \text{ N}$$

Dengan lebar balok $b_w = 300$ mm dan jarak serat tekan terluar ke titik berat kabel pratekan $d_p = 1150$ mm $> 0,8h = 1120$ mm, maka diperoleh:

$$V_{cw} = 0,3(7,071 + 5,34)(300)(1320) + 450119,859$$

$$V_{cw} = 1474426,8 + 450119,859 = 1924546,659 \text{ N}$$

2. Kuat geser geser nominal yang disumbangkan oleh beton pada saat terjadinya keretakan diagonal akibat kombinasi momen dan geser (dengan $d = 1320$ mm) adalah:

$$V_{ci} = \frac{\sqrt{f'_c}}{20} b_w d + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{\max}}$$

Akibat beban mati tak terfaktor dengan x sebagai jarak dari tumpuan A:

$$M_d = \frac{1}{2}(q_{DL})Lx - \frac{1}{2}(q_{DL})x^2 = \frac{1}{2}(q_{DL})(Lx - x^2)$$

$$M_d = \frac{1}{2}(40)((20000)(x) - (x)^2)$$

Tegangan akibat beban mati tak terfaktor pada serat terluar penampang dimana tegangan tarik disebabkan oleh beban luar.

$$f_d = \frac{M_d y_b}{I_c} = \frac{(M_d)(785,63)}{21,331 \times 10^{10}}$$

Gaya geser akibat beban mati tak terfaktor

$$V_d = \frac{1}{2}(q_{DL})L = \frac{1}{2}(40)20000 = 400000 \text{ N}$$

Fungsi distribusi pembebanan:

$$\frac{M_{\max}}{V_i} = \frac{Lx - x^2}{L - 2x} = \frac{20000(x) - (x)^2}{20000 - 2(x)}$$

Momen yang mengakibatkan retak lentur pada penampang akibat beban luar:

$$M_{cr} = \frac{I_c}{y_t} \left(0,5\sqrt{f'_c} + f_{pe} + f_d \right)$$

Momen akibat gaya prategang ekuivalen (tegangan tarik pada serat atas penampang)

$$M_{pe} = \frac{1}{8}(w)L^2 = \frac{1}{8}(45,012)20000^2 = 225,06 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$f_{pe} = \frac{P}{A_c} + \frac{M_{pe} y_t}{I_c}$$

$$f_{pe} = \frac{4846564,8}{907500} + \frac{(225,06 \times 10^7) 614,37}{21,331 \times 10^{10}} = 5,341 + 6,482 = 11,823 \text{ MPa}$$

$$M_{cr} = \frac{21,331 \times 10^{10}}{614,37} (0,5(7,071) + 11,823 - f_d)$$

$$V_{ci} = \frac{\sqrt{f'_c}}{20} b_w d + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{\max}}$$

$$V_{ci} = \frac{7,071}{20} (300)(1320) + 400000 + \frac{V_i M_{cr}}{M_{\max}}$$

x (mm)	M_d (Nmm)	f_d (MPa)	$\frac{M_{\max}}{V_i}$ (mm)	M_{cr} (Nmm)	V_{ci} (N)	V_u/ϕ (N)
4000	128×10^7	4,714	5333,333	$369,578 \times 10^7$	1232964,593	1152000
6000	168×10^7	6,188	10500	$318,400 \times 10^7$	843243,895	768000
7000	182×10^7	6,703	15166,667	$300,520 \times 10^7$	738150,851	576000
8000	192×10^7	7,071	24000	$287,743 \times 10^7$	659898,717	384000
9000	198×10^7	7,292	49500	$280,070 \times 10^7$	597162,943	192000

Pembatasan V_{ci} :

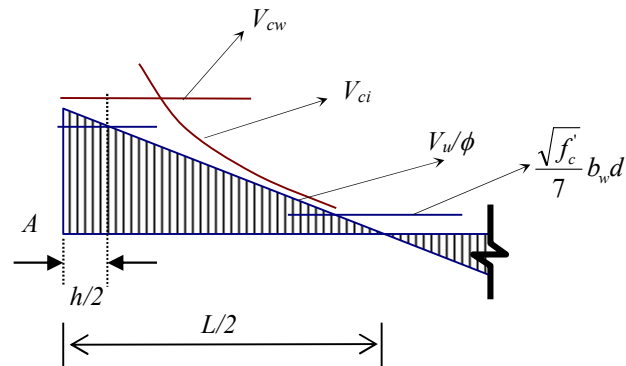
$$V_{ci} \geq \frac{\sqrt{f'_c}}{7} b_w d ; = \frac{7,071}{7} (300)(1230) = 348499,286 \text{ N}$$

Hasil perhitungan pada tabel menunjukkan nilai-nilai V_{ci} lebih besar dari V_u/ϕ pada semua jarak x dari tumpuan A, sehingga V_{ci} **tidak perlu dipakai!!!**

Jika dipakai $V_c = V_{cw}$ maka:

$$\frac{1}{2} V_c = 962273,33 < \frac{V_u}{\phi} = 1785600 \text{ N} \rightarrow \text{Diperlukan tulangan geser minimum!}$$

Sketsa distribusi gaya geser di sepanjang penampang:



Kontrol terhadap ketentuan pemakaian tulangan geser minimum:

$$\frac{V_u}{\phi} < \frac{V_c}{2} \rightarrow \text{Tidak perlu tulangan geser}$$

$$\frac{V_c}{2} < \frac{V_u}{\phi} \rightarrow \text{Perlu tulangan geser minimum}$$

Untuk kondisi dimana dibutuhkan tulangan geser minimum ($\frac{1}{2}V_c < \frac{1}{\phi}V_u$) maka luas tulangan dapat ditentukan dengan memakai jarak sengkang maksimum $s = 600$ mm:

$$A_{v_{\min}} = \text{nilai terbesar dari} \begin{cases} \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_y} = \frac{300(600)}{3(240)} = 250 \text{ mm}^2 \\ \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_y d} \sqrt{\frac{d}{b_w}} = \frac{4342,8(1860)(600)}{80(240)(1320)} \sqrt{\frac{1320}{300}} = 401,13 \text{ mm}^2 \end{cases}$$

dimana f_y = Tegangan leleh tulangan sengkang (dipakai sebesar 240 Mpa)

Maka dipakai $A_v = 401,13 \text{ mm}^2$, dan diameter tulangan sengkang diperoleh sebesar:

$$D = \sqrt{\frac{2A_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{2(401,13)}{\pi}} = 15,98 \text{ mm}$$

Dipakai D16

Luas tulangan minimum yang diperoleh adalah untuk kondisi sengkang berbentuk U stirrups dengan 2 kaki yang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen.

7. Kehilangan gaya prategang

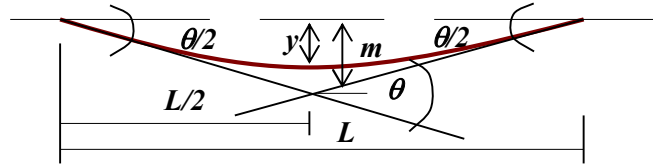
Penentuan Jacking Force (P_j), jika diketahui gaya prategang efektif dalam tahap perencanaan, $P_x = 0,6(1860)(4342,8) = 4846564,8 \text{ N}$

$$P_j = P_x (1 + \mu\theta + Kx)$$

Untuk strand 7 kawat dipakai, koefisien friksi $\mu = 0,2$ dan koefisien wobble $K = 0,003 / \text{m}$

$$y \cong \frac{m}{2}$$

$$\tan \frac{\theta}{2} \cong \frac{\theta}{2} = \frac{m}{\frac{1}{2}L} \rightarrow \theta = 8y/L$$



Bila $y = 0,464 \text{ m}$ (eksentrisitas kabel terhadap pusat grafitasi balok) maka $\theta = 0,186 \text{ rad}$, dan untuk sepanjang bentangan $L = 20 \text{ m}$, diperoleh jacking force:

$$P_j = 4846564,8(1 + 0,2(0,186) + 0,003(10)) = 5172253,955 \text{ N}$$

Kehilangan jangka pendek

1. Akibat friksi

$$\Delta P_f = P_j (1 - e^{-(\mu\theta + Kx)}) = P_j (1 - e^{-(0,2(0,186) + 0,003(10))})$$

$$\Delta P_f = P_j (1 - e^{-0,067}) = 0,065 P_j$$

2. Akibat slip angkur

$$P_a = P_j - 2mx$$

dengan menganggap slip angkur $d = 5 \text{ mm}$ dan $L = 10 \text{ m}$ maka jarak pengaruh pengankuran:

$$x = \sqrt{\frac{dA_{ps}E_s}{m}}$$

$$m = \frac{\Delta P_f}{\frac{1}{2}L}$$

$$m = P_j \left(\mu \frac{\theta}{\frac{1}{2}L} + K \right) = 5172253,955 \left(0,2 \frac{0,186}{10} + 0,003 \right) = 34757,547 \text{ N}$$

$$x = \sqrt{\frac{5(4342,8)(197000)}{34757,547}} = 350,815 \text{ mm}$$

$$P_a = P_j - 2mx$$

$$P_a = P_j - \frac{2(0,065P_j)(350,815)}{10000} = 0,954P_j$$

$$\Delta P_a = P_j - P_a = 0,046P_j$$

3. Akibat perpendekan elastis beton

Untuk batang post-tension:

$$\Delta f_{es} = K_{es} E_s \frac{f_{csi}}{E_{ci}}$$

$$f_{csi} = \frac{(P_j - \Delta P_a - \Delta P_f)}{A_c} = \frac{0,889P_j}{A_c}$$

Koefisien rata-rata kehilangan akibat pelepasan tendon $K_{es} = 0,5$, elastisitas baja $E_s = 197000 \text{ MPa}$, dan elastisitas beton saat transfer (umur 14 hari) $E_{ci} = 31176,273 \text{ MPa}$.

$$\Delta P_{es} = K_{es} E_s \frac{A_{ps}(0,889P_j)}{A_c E_{ci}}$$

$$\Delta P_{es} = 0,5(197000) \frac{(4342,8)(0,889P_j)}{(907500)31176,273} = 0,013P_j$$

Kehilangan jangka panjang

1. Kehilangan akibat creep (rangkak)

$$\Delta f_{CR} = \varepsilon_{CR} E_s$$

$$\Delta P_{CR} = \varepsilon_{CR} E_s A_{ps}$$

$$\varepsilon_{CR} = \varphi(t) \varepsilon_e \rightarrow \varepsilon_e = \frac{P}{A_c E_c} \rightarrow P = P_j - \Delta P_f - \Delta P_a - \Delta P_{es}$$

$$\varphi(t) = \frac{t^{0,6}}{10 + t^{0,6}} C_u \text{ Untuk umur konstruksi tak terhingga maka: } \varphi(t) = C_u$$

$$C_u = 2,35 \gamma_{CR}$$

$$\gamma_{CR} = K_h^c \cdot K_d^c \cdot K_s^c \cdot K_f^c \cdot K_{ae}^c \cdot K_{to}^c$$

$$K_h^c = 0,72 \text{ untuk kelembaban udara } H = 80\%$$

$$K_d^c = 0,81 \text{ untuk ketebalam minimum beton } 40 \text{ cm}$$

$$K_s^c = 1,5 \text{ untuk nilai slump campuran } 12 \text{ cm}$$

$$K_f^c = 1 \text{ untuk kehalusan pasir } 50\% \text{ lolos saringan No.4}$$

$$K_{ae}^c = 1 \text{ untuk kandungan udara dalam beton } 4\%$$

$$K_{to}^c = 0,92 \text{ untuk umur beton saat pembebanan yaitu } 14 \text{ hari}$$

$$\gamma_{CR} = (0,72)(0,81)(1,5)(1)(1)(0,92) = 0,805$$

$$C_u = 2,35(0,805) = 1,892$$

$$\varepsilon_{CR} = \varphi(t)\varepsilon_e$$

$$P = P_j - \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_{es} = P_j - 0,065P_j - 0,046P_j - 0,013P_j = 0,876P_j$$

$$\varepsilon_e = \frac{P}{A_c E_c} = \frac{0,876P_j}{A_c E_c}$$

$$\Delta P_{CR} = \varepsilon_e \varphi(t) E_s A_{ps} = \frac{0,876P_j}{(907500)(33234,019)} (1,892)(197000)(4342,8) = 0,047P_j$$

2. Kehilangan akibat susut (shrinkage)

$$\Delta f_{SH} = \varepsilon_{SH} E_s$$

$$\Delta P_{SH} = \varepsilon_{SH} E_s A_{ps}$$

$$\varepsilon_{SH} = \varphi(t)\varepsilon_e \rightarrow \varepsilon_e = \frac{P}{A_c E_c} \rightarrow P = P_j - \Delta P_f - \Delta P_a - \Delta P_{es} - \Delta P_{CR}$$

$$\varphi(t) = \frac{t^{0,6}}{10 + t^{0,6}} C_u \text{ Untuk umur konstruksi tak terhingga maka: } \varphi(t) = C_u$$

$$C_u = 2,35\gamma_{CR}$$

$$\gamma_{CR} = K_H^c \cdot K_d^c \cdot K_s^c \cdot K_F^c \cdot K_b^c \cdot K_{AC}^c$$

$$K_H^c = 0,6 \text{ untuk kelembaban udara } H = 80\%$$

$$K_d^c = 0,65 \text{ untuk ketebalam minimum beton } 40 \text{ cm}$$

$$K_s^c = 1,05 \text{ untuk nilai slump campuran } 12 \text{ cm}$$

$K_F^c = 1$ untuk kehalusan pasir 50% lolos saringan No.4

$K_b^c = 0,98$ untuk kandungan semen dalam beton 1100 lbs/m³

$K_{AC}^c = 0,98$ untuk kandungan udara 4%

$$\gamma_{SH} = (0,6)(0,65)(1,05)(1)(0,98)(0,97) = 0,389$$

$$C_u = 2,35(0,389) = 0,914$$

$$\varepsilon_{SH} = \varphi(t)\varepsilon_e$$

$$P = P_j - \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_{es} = P_j - 0,065P_j - 0,046P_j - 0,013P_j - 0,047P_j = 0,829P_j$$

$$\varepsilon_e = \frac{P}{A_c E_c} = \frac{0,829P_j}{A_c E_c}$$

$$\Delta P_{SH} = \varepsilon_e \varphi(t) E_s A_{ps} = \frac{0,829P_j}{(907500)(33234,019)} (0,914)(197000)(4342,8) = 0,021P_j$$

3. Kehilangan akibat relaksasi baja

$$\Delta f_R = \varepsilon_R E_s$$

$$\Delta P_R = \varepsilon_R E_s A_{ps}$$

$$\Delta f_R = 138 - 0,3\Delta f_f - 0,4\Delta f_{es} - 0,2(\Delta f_{SR} + \Delta f_{CR}) \rightarrow \text{post-tension}$$

Total kehilangan:

$$\Delta P_t = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_{es} + \Delta P_{CR} + \Delta P_{SH}$$

$$\Delta P_t = 0,065P_j + 0,046P_j + 0,013P_j + 0,047P_j + 0,021P_j = 0,192P_j$$

