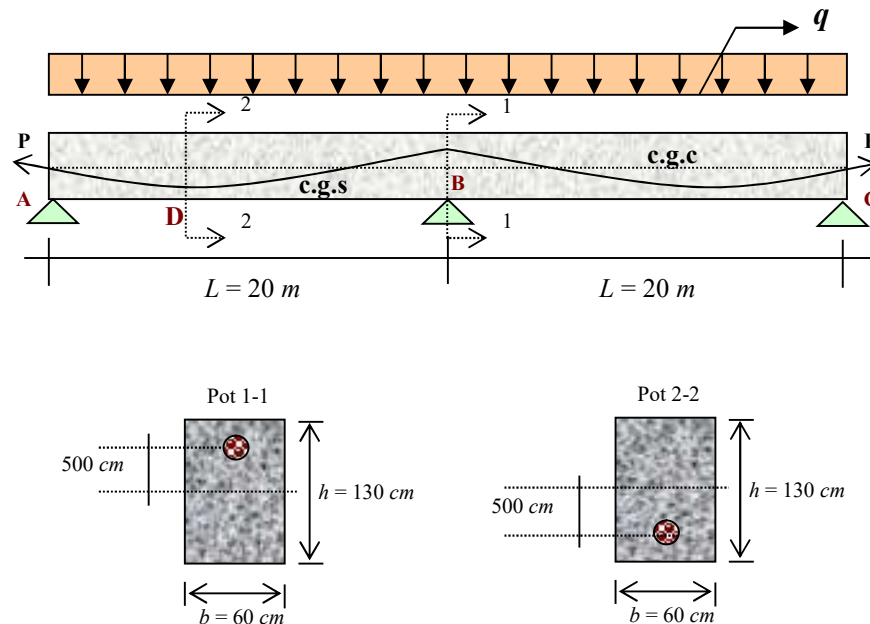


## TUGAS 02 PERENCANAAN BALOK PRATEKAN

Perencanaan balok beton pratekan menerus di atas tiga tumpuan



Data-data perencanaan:

Beban Mati ( $q_{DL}$ ) = 3 t/m' ; Beban Hidup ( $q_{LL}$ ) = 4 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

Tendon berbentuk parabola dengan eksentrisitas maksimum tendon di tumpuan tengah (titik B),  $e_2$  = 500 mm dan pada titik A dan C,  $e = 0$

Ditanyakan:

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

### PENYELESAIAN

Jarak serat terluar terhadap kabel (selimut beton) di daerah lapangan dan tumpuan tengah adalah 150 mm

Eksentrisitas kabel pada tumpuan B, adalah  $e_2$  = 500 mm;

### 1. Desain kabel pratekan

#### Perhitungan tahap 1

Momen ultimate berdasarkan kombinasi beban terfaktor pada tumpuan B (momen terbesar):

$$q_u = 1,2q_{DL} + 1,6q_{LL} = 1,2(3) + 1,6(4) = 10 \text{ t/m} = 100 \text{ N/mm}$$

Momen pada tahap awal di tumpuan B:  $M_u = \frac{1}{8} q_u L^2$

$$M_{uB1} = \frac{1}{8} (100)(20000)^2 = 500 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Syarat momen ultimate ( $M_{uB}$ ) untuk kondisi batas:

$$M_{uB1} \leq \phi M_{nB1} \rightarrow \phi = 0,8 \text{ (faktor reduksi kekuatan akibat lentur tanpa aksial)}$$

maka momen nominal di titik B ( $M_{nB}$ ) berdasarkan beban terfaktor adalah:

$$M_{nB1} = \frac{500 \times 10^7}{0,8} = 625 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

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

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

Suku  $\left( \frac{d}{d_{pB}} (\omega - \omega') \right)$  dipakai bila tulangan tarik dan tekan non pratekan diperhitungkan.

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

$$\rho_p = 0,01 \text{ (estimasi)}$$

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

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

Luas penampang tendon ptekan ( $A_{ps}$ ) terhadap kapasitas momen nominal penampang:

$$M_{nB1} = A_{ps1} f_{ps} d_{pB} \left( 1 - 0,59 \frac{A_{ps1} f_{ps}}{b.d_p f_c'} \right)$$

$$625 \times 10^7 = A_{ps1} (1468,532) (1150) \left( 1 - 0,59 \frac{A_{ps1} 1468,532}{600 \cdot 1150 \cdot 50} \right)$$

$$625 \times 10^7 = 1688811,8 A_{ps1} (1 - 2,511 \times 10^{-5} A_{ps1})$$

$$42,406 A_{ps1}^2 - 1688811,8 A_{ps1} + 625 \times 10^7 = 0$$

Nilai akar yang menentukan adalah  $A_{ps1} = 4128,896 \text{ mm}^2$

Untuk kawat ptekan yang sesuai dengan spesifikasi VSL, **1 strand = 98,7 mm<sup>2</sup>**, jadi jumlah strand yang dibutuhkan adalah:

$$\text{Jumlah strand} = \frac{A_{ps1}}{98,7} = \frac{4128,896}{98,7} = 41,83 \approx 42 \text{ strands}$$

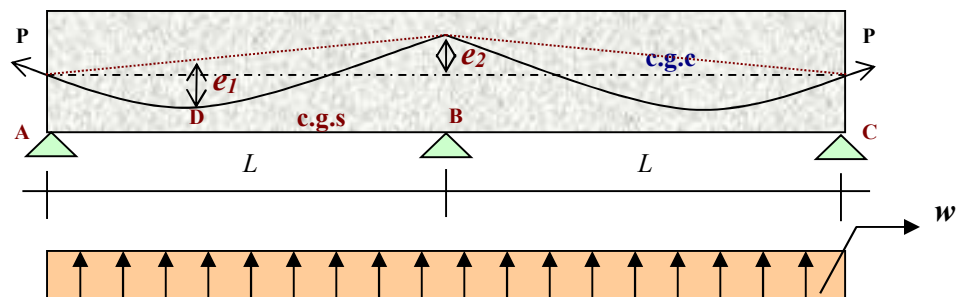
Dalam spesifikasi VSL, tipe angkur tendon berdasarkan jumlah strand adalah:

7 strands ; 12 strands ; 19 strands

Untuk kebutuhan ini dipakai **2 angkur tendon dengan 19 strands + 1 angkur tendon dengan 7 strands (dipakai hanya 4 angkur strands)**, Jadi luas total kabel ptekan terpasang adalah:  $A'_{ps} = (2(19) + 1(4))98,7 = 4145,4 \text{ mm}^2 > 4128,896 \text{ mm}^2$

Gaya ptekan:  $P \leq 0,6 f_{pu} A'_{ps}$

$$P = 0,6(1860)(4145,4) = 4626266,4 \text{ N}$$



Beban ekuivalen akibat gaya pratekan di tumpuan B (momen terbesar) dengan eksentrisitas kabel  $e_2$

$$P.e_2 = \frac{1}{8} wL^2$$

$$w = \frac{8P.e_2}{L^2} \rightarrow w = \frac{8(4626266,4)500}{20000^2} = 46,263 \text{ N/mm}$$

Eksentrisitas ideal kabel pada setengah bentangan AB:

$$e_1 = \frac{wL^2}{8P} = \frac{46,236(20000)^2}{8(4626266,4)} = 499,712 \approx 500 \text{ mm}$$

Karena momen maksimum lapangan terjadi pada daerah sekitar  $0,4L$  dari titik A, maka  $e_1$  ditempatkan pada titik D

Momen resultan:  $M_{tot} = \frac{1}{8} wL^2$

$$M_{tot} = \frac{1}{8} wL^2 = \frac{1}{8}(46,263)(20000)^2 = 231,315 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Momen primer:  $M_p = P.e_2$

$$M_p = 4626266,4(500) = 231,313 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Momen sekunder:  $M_s = M_{tot} - M_p$

$$M_s = (231,315 - 231,313) \times 10^7 = 0,002 \times 10^7 \text{ Nmm} = 20000 \text{ Nmm}$$

## Perhitungan tahap 2

Momen ultimate:  $M_{uB2} = M_{uB1} + M_s$

$$M_{uB2} = (500 + 0,002) \times 10^7 = 500,002 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Syarat momen ultimate ( $M_u$ ) untuk kondisi batas:

$$M_{uB2} \leq \phi M_{nB2} \rightarrow \phi = 0,8 \text{ (faktor reduksi kekuatan akibat lentur tanpa aksial)}$$

maka momen nominal ( $M_n$ ) berdasarkan beban terfaktor adalah:

$$M_{nB2} = \frac{500,002 \times 10^7}{0,8} = 625,003 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

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

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

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

$$M_{nB2} = A_{ps2} f_{ps} d_{pB} \left( 1 - 0,59 \frac{A_{ps2} f_{ps}}{b \cdot d_p f_c'} \right)$$

$$625,003 \times 10^7 = A_{ps2} (1468,532) (1150) \left( 1 - 0,59 \frac{A_{ps2}}{600 \cdot 1150} \frac{1468,532}{50} \right)$$

$$625,003 \times 10^7 = 1688811,8 A_{ps2} (1 - 2,511 \times 10^{-5} A_{ps2})$$

$$42,406 A_{ps2}^2 - 1688811,8 A_{ps2} + 625,003 \times 10^7 = 0$$

Nilai akar yang menentukan adalah  $A_{ps2} = 4129,008 \text{ mm}^2$

Iterasi perhitungan tahap selanjutnya tidak diperlukan lagi. Nilai  $A_{ps1}$  tahap pertama sudah saling mendekati dengan tahap kedua, sehingga dipakai  $A_{ps} = A'_{ps} = 4145,4 \text{ mm}^2$  dan  $P = 4626266,4 \text{ N}$  yang diperoleh pada tahap pertama

## 2. Kontrol terhadap syarat pembatasan tulangan

Rasio tulangan pratekan pada titik B dengan lebar balok ( $b$ ) = 600 mm dan jarak titik berat kabel rencana dari serat atas ( $d_p$ ) = 1150 mm:

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b d_{pB}} = \frac{4145,4}{600(1150)} = 6,008 \times 10^{-3}$$

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

$$f_{ps} = 1860 \left( 1 - \frac{0,4}{0,707} \left( 6,008 \times 10^{-3} \frac{1860}{50} \right) \right) = 1624,806 \text{ MPa}$$

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

$$\omega_p = \rho_p \frac{f_{ps}}{f_c'} = 6,008 \times 10^{-3} \frac{1624,806}{50} = 0,195$$

$$\omega_p < 0,36 \beta_1 = 0,36(0,707) = 0,225 \rightarrow O.K$$

Nilai  $d_p$  pada titik D sama dengan pada titik B ( $d_{pB} = d_{pD}$ ) sehingga hasilnya juga akan memenuhi !!!

### 3. Kontrol momen ultimate terhadap kapasitas momen nominal penampang

Kontrol momen ultimate pada titik B dan D dengan  $d_p = d_{pB} = d_{pD}$

$$M_u \leq \phi M_n$$

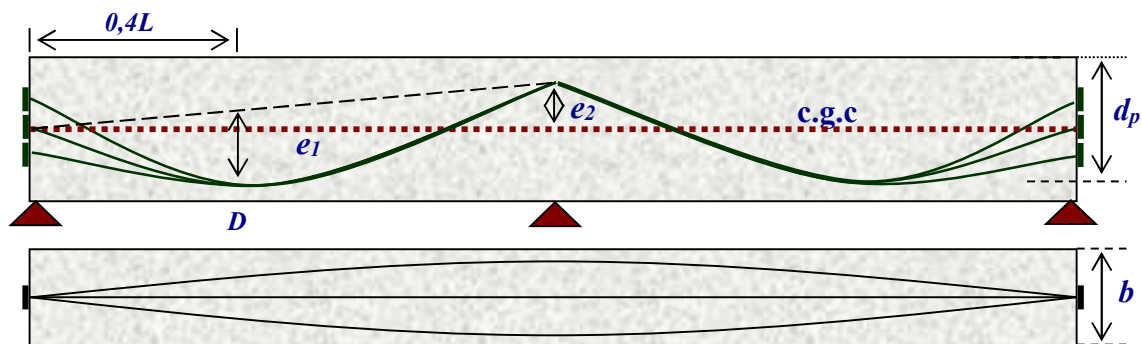
Momen nominal penampang berdasarkan variasi regangan linear :

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left( d_p - 0,59 \frac{A_{ps} f_{ps}}{f_c' b} \right)$$

$$M_n = 4145,4(1624,806) \left( 1150 - 0,59 \frac{4145,4(1624,806)}{50(600)} \right) = 685,358 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$\phi M_n = 0,8(685,358 \times 10^7) = 548,286 \times 10^7 \text{ Nmm} > M_u = 500,002 \times 10^7 \text{ Nmm} \rightarrow O.K$$

Sketsa penempatan tendon pratekan



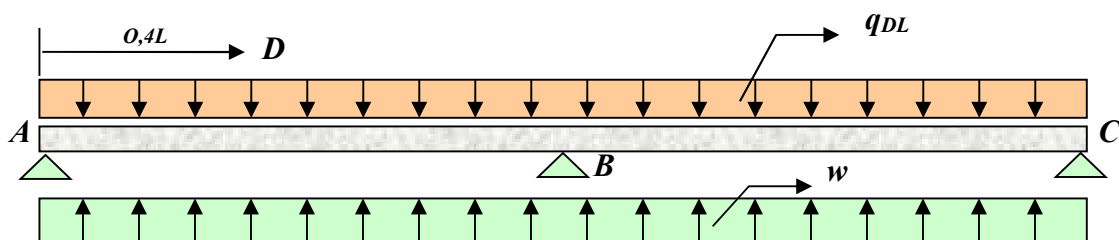
### 4. Kontrol tegangan pada kondisi beban kerja terhadap tahapan pembebanan

Syarat tegangan yang diizinkan:

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

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

Kontrol kondisi kosong pada daerah lapangan



Beban ekuivalen akibat gaya pratekan di titik D dengan eksentrisitas kabel  $e_1 = 500 \text{ mm}$ , tetap memakai  $w = 46,263 \text{ N/mm}$  sebagai akibat momen terbesar pada tumpuan B

Momen maksimum di tengah bentangan sejarak  $(3/8)L \approx 0,4L$  dari titik A:

$$M_{emp.D} = \frac{9}{128}(w - q_{DL})L^2 = \frac{9}{128}(46,263 - 30)20000^2 = 45,740 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Tegangan yang terjadi pada penampang dengan luas  $A_c = b.h = 78 \times 10^4 \text{ mm}^2$  dan momen inersia  $I_c = (1/12)(b)(h)^3 = 10,985 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ :

$$f_{emp.D} = \frac{-P}{A_c} \pm \frac{M_{emp.D}y}{I_c}$$

$$f_{emp.D} = \frac{-4626266,4}{78 \times 10^4} \pm \frac{(45,740 \times 10^7)650}{10,985 \times 10^{10}}$$

$$f_{emp.D} = -5,931 \pm 2,707$$

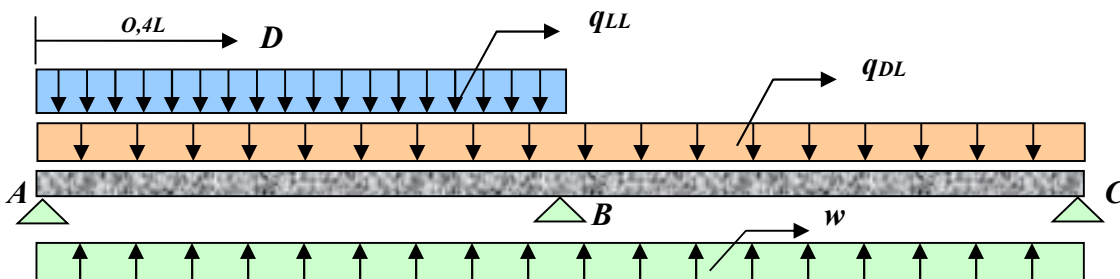
Tegangan serat atas penampang:  $f_{emp.D}^{top} = -5,931 + 2,707 = -3,224 \text{ MPa}$  (tekan)

Tegangan serat bawah penampang:  $f_{emp.D}^{btm} = -5,931 - 2,707 = -8,638 \text{ MPa}$  (tekan)

$$f_{emp.D}^{top} < 0,5\sqrt{f_c'} = 3,536 \text{ MPa} \text{ (belum terjadi tarik)} \rightarrow O.K$$

$$f_{emp.D}^{btm} < 0,45f_c' = 22,5 \text{ MPa} \rightarrow O.K$$

Kontrol kondisi penuh pada daerah lapangan



Momen maksimum di tengah bentangan sejarak  $0,4L$  dari titik A:

$$M_{full.D} = \frac{9}{128}(q_{DL} - w)L^2 + \frac{49}{512}(q_{LL})L^2$$

$$M_{full.D} = \frac{9}{128}(30 - 46,263)20000^2 + \frac{49}{512}(40)20000^2$$

$$M_{full.D} = (-45,74 + 153,125) \times 10^7 = 107,385 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Tegangan yang terjadi pada penampang:

$$f_{full.D} = \frac{-P}{A_c} \pm \frac{M_{full.D}y}{I_c}$$

$$f_{full.D} = \frac{-4626266,4}{78 \times 10^4} \pm \frac{(107,385 \times 10^7)650}{10,985 \times 10^{10}}$$

$$f_{full.D} = -5,931 \pm 6,354$$

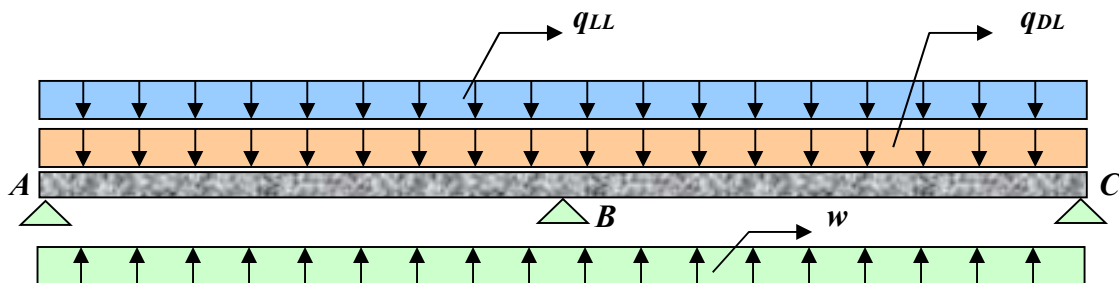
Tegangan serat atas penampang  $f_{full.D}^{top} = -5,931 - 6,354 = -12,285 \text{ MPa}$  (tekan)

Tegangan serat bawah penampang  $f_{full.D}^{btm} = -5,931 + 6,354 = 0,423 \text{ MPa}$  (tarik)

$$f_{full.D}^{top} < 0,45 f_c' = 22,5 \text{ MPa} \rightarrow O.K$$

$$f_{full.D}^{btm} < 0,5 \sqrt{f_c'} = 3,536 \text{ MPa} \rightarrow O.K$$

Kontrol kondisi penuh pada tumpuan tengah



Momen di tumpuan tengah:

$$M_{full.B} = \frac{1}{8} (q_{DL} + q_{LL} - w) L^2 = \frac{1}{8} (30 + 40 - 46,263) 20000^2 = 118,685 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Tegangan yang terjadi pada penampang

$$f_{full.B} = \frac{-P}{A_c} \pm \frac{M_{full.B}y}{I_c}$$

$$f_{full.B} = \frac{-4626266,4}{78 \times 10^4} \pm \frac{(118,685 \times 10^7)650}{10,985 \times 10^{10}}$$

$$f_{full.B} = -5,931 \pm 7,023$$

Tegangan serat atas penampang  $f_{full.B}^{top} = -5,931 + 7,023 = +1,092 \text{ MPa}$  (tarik)

Tegangan serat bawah penampang  $f_{full.B}^{btm} = -5,931 - 7,023 = -12,954 \text{ MPa}$  (tekan)



$$f_{full.B}^{top} < 0,5\sqrt{f_c'} = 3,536 \text{ MPa} \rightarrow O.K$$

$$f_{full.B}^{btm} < 0,45 f_c' = 22,5 \text{ MPa} \rightarrow O.K$$

Diagram tegangan pada tengah bentangan (0,4L)

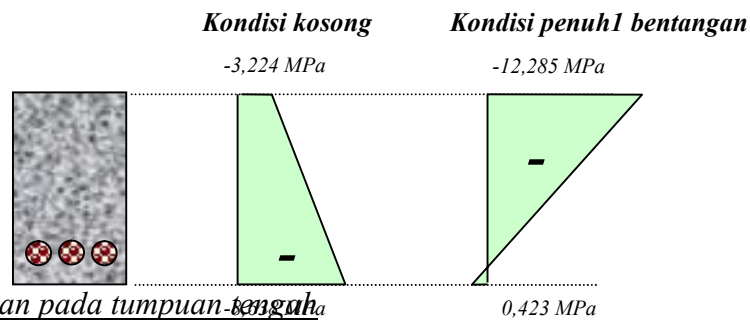
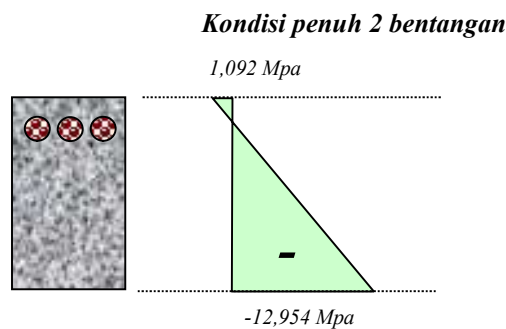


Diagram tegangan pada tumpuan tengah



### 5. Kontrol lendutan maximum

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

Lendutan akibat gaya pratekan di tengah bentangan:

$$\delta_{ps} = \frac{5}{48} \left( \frac{P \cdot e_1 \cdot L^2}{E_c I_c} \right) - \frac{1}{24} \left( \frac{P \cdot e_2 \cdot L^2}{E_c I_c} \right)$$

$$\delta_{ps} = \frac{5}{48} \left( \frac{(-4626266,4)(500)(20000)^2}{33234,019(10,985 \times 10^{10})} \right) - \frac{1}{24} \left( \frac{(-4626266,4)(500)(20000)^2}{33234,019(10,985 \times 10^{10})} \right)$$

$$\delta_{ps} = -26,40 + 10,56 = -15,84 \text{ mm}$$

(ke atas)

Lendutan elastis maksimum untuk balok menerus dengan dua bentangan simetris, pembebanan simetris terbagi rata dan sendi di kedua tumpuan tepi adalah:

$$\delta = 0,0054 \frac{qL^4}{E_c I_c}$$

Pada kondisi yang sama, namun salah satu bentangan tidak diberi beban terbagi rata, maka lendutan elastis maksimum sebesar:

$$\delta = 0,0092 \frac{qL^4}{E_c I_c}$$

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 bekerja penuh di semua bentangan:

$$\delta_{DL} = 0,0054 \frac{q_{DL} L^4}{E_c I_c} \rightarrow \delta_{DL} = 0,0054 \frac{(30)(20000)^4}{(33234,019)(10,985 \times 10^{10})} = 7,10 \text{ mm}$$

( kebawah)

Akibat beban hidup bekerja penuh di semua bentangan:

$$\delta_{LL.A-C} = 0,0054 \frac{q_{LL} L^4}{E_c I_c}$$

$$\delta_{LL.A-C} = 0,0054 \frac{(40)(20000)^4}{(33234,019)(10,985 \times 10^{10})} = 9,467 \text{ mm}$$

( ke bawah)

Akibat beban hidup bekerja penuh di salah satu bentangan sedang bentangan yang lain tidak dibebani:

$$\delta_{LL.A-B} = 0,0092 \frac{q_{LL} L^4}{E_c I_c}$$

$$\delta_{LL.A-B} = 0,0092 \frac{(40)(20000)^4}{(33234,019)(10,985 \times 10^{10})} = 16,128 \text{ mm}$$

(ke bawah)

Lendutan akibat gaya pratekan dan beban mati:

$$\delta_1 = \delta_{ps} + \delta_{DL} = -15,84 + 7,10 = -8,74 \text{ mm} < \delta_u \rightarrow O.K \quad (\text{ke atas})$$

Lendutan akibat gaya pratekan + beban mati + beban hidup<sub>(A-B)</sub>:

$$\delta_2 = \delta_{ps} + \delta_{DL} + \delta_{LL.A-B}$$

$$\delta_2 = -15,84 + 7,10 + 16,128 = 7,388 \text{ mm} < \delta_u \rightarrow O.K$$

(ke bawah)

Lendutan akibat gaya pratekan + beban mati + beban hidup<sub>(A-C)</sub>:

$$\delta_2 = \delta_{ps} + \delta_{DL} + \delta_{LL.A-C}$$

$$\delta_2 = -15,84 + 7,10 + 9,467 = 0,727 \text{ mm} < \delta_u \rightarrow O.K$$

(ke bawah)

Kontrol terhadap lendutan jangka panjang

Karena pengaruh rangkai dan susut tidak diperhitungkan secara detail maka lendutan akibat beban tetap dikalikan dengan suatu faktor ( $\lambda$ )

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

$\rho' = 0$  (tulangan non pratekan hanya sebagai tulangan praktis)

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

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

Lendutan total jangka panjang adalah:

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

$$\delta_{tot..Jp} = (\delta_{ps} + \delta_{DL})(1 + \lambda) + \delta_{LL.A-B}$$

$$\delta_{tot..Jp} = (-15,84 + 7,10)(3) + 16,128 = -10,092 \text{ mm} < \delta_u \rightarrow O.K$$

(ke atas)