

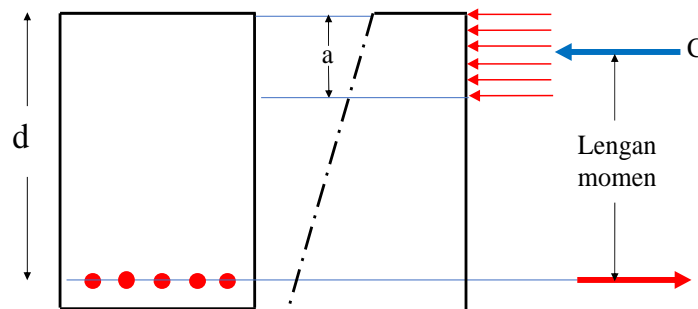
BALOK BERTULANGAN RANGKAP

5.1. PENDAHULUAN

Balok bertulangan rangkap adalah balok yang memiliki tulangan di daerah tarik (A_s) dan di daerah tekan (A_s'). Tujuan pemakaian tulangan rangkap adalah:

1. Mengurangi defleksi jangka panjang
2. Meningkatkan daktilitas
3. Merubah jenis keruntuhan menjadi tarik
4. Mempermudah pelaksanaan
5. Mengantisipasi beban gempa

Penampang balok tulangan tunggal dan tegangannya dapat dilihat pada Gambar 5.1 dimana gaya tekan C hanya ditimbulkan oleh beton dan tulangan A_s untuk memberikan gaya tarik.



Gambar 5.1. Balok bertulangan tunggal

Pada tulangan rangkap gaya tekan diberikan oleh beton (C_c) dan oleh tulangan tekan A_s' (C_s). Jarak antara A_s' dan serat tekan adalah d' (Gambar 5.2).

Pemasangan tulangan tekan membuat tinggi balok yang tertekan berkurang dan membuat garis netral mendekati serat tekan terbesar (Gambar 5.2).

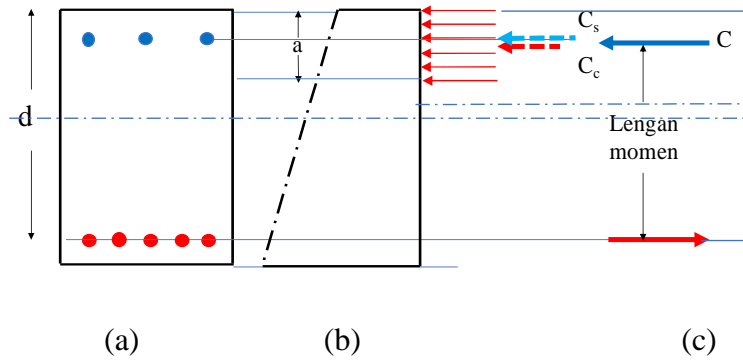
Gaya tekan dihasilkan dari beton (C_c) dan baja tekan (C_s). Keduanya menghasilkan resultante C.

$$C = C_c + C_s \quad (5.1)$$

Keseimbangan:

$$C = T \quad (5.1a)$$

$$C_c + C_s = T \quad (5.1b)$$



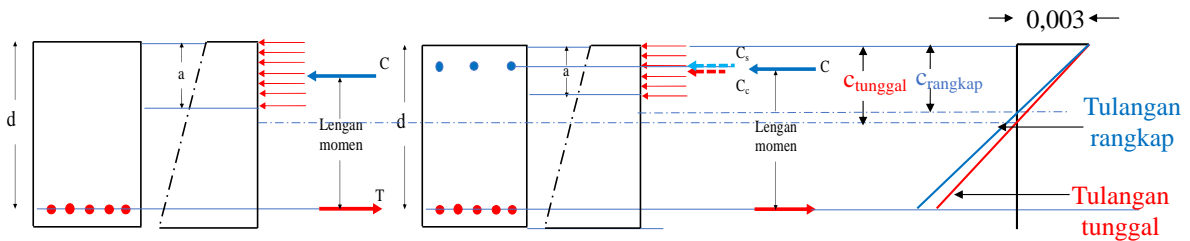
Gambar 5.2. Balok bertulangan rangkap: (a) Penampang balok bertulangan rangkap, (b) tegangan dan gaya tekan, (c) gaya tekan dan tarik dalam balok,

Lengan momen adalah jarak C ke T yaitu jd . Untuk tulangan rangkap jarak tersebut dinyatakan dengan j_2d (Gambar 5.2).

$$M = T \cdot j_2d \tag{5.2a}$$

$$M = C \cdot jd \tag{5.2b}$$

Perbedaan tegangan dan regangan pada tulangan tunggal dan tulangan rangkap dapat dilihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3. Tegangan dan regangan pada balok bertulangan tunggal dan rangkap

Jarak garis netral ke serat tekan terluar pada tulangan rangkap lebih pendek daripada tulangan tunggal (Gambar 5.3).

5.2. KELELEHAN TULANGAN

Kelelahan tulangan menjadi indikasi suatu struktur daktail

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \tag{5.3}$$

Tulangan tekan meledak bila:

$$\epsilon'_s \geq \epsilon_y \tag{5.4}$$

$$f'_s = f_y \tag{5.4a}$$

$$\epsilon'_s = \frac{(c-d')}{c} 0,003 \tag{5.4b}$$

$$\varepsilon'_s = \left(1 - \frac{d'}{c}\right) 0,003 \quad (5.4c)$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad (5.4d)$$

$$\varepsilon'_s = \left(1 - \frac{\beta_1 d'}{a}\right) 0,003 \quad (5.4e)$$

$\frac{d'}{a}$: indicator kelelahan tulangan tekan

$$\left(\frac{d'}{a}\right)_{\text{lim}} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{f_y}{600}\right) \quad (5.5)$$

$$\left(\frac{d'}{a}\right) > \left(\frac{d'}{a}\right)_{\text{lim}} \rightarrow \text{tulangan tekan tidak meleleh} \quad (5.5b)$$

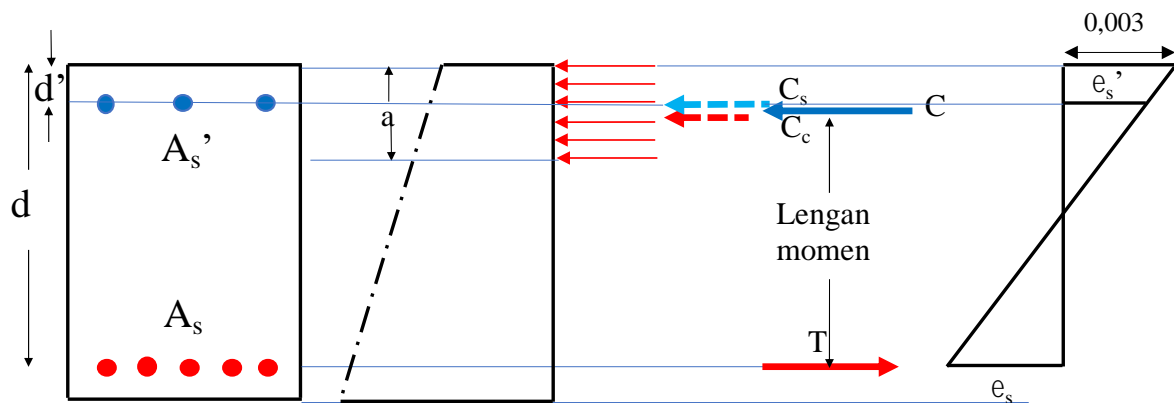
$$\left(\frac{d'}{a}\right) \leq \left(\frac{d'}{a}\right)_{\text{lim}} \rightarrow \text{tulangan tekan meleleh} \quad (5.5c)$$

$$\rho - \rho' \geq \frac{0,85 f'_c}{f_y} \beta_1 \frac{d'}{d} \left(\frac{600}{600 - f_y}\right) \rightarrow \text{tulangan tekan meleleh} \quad (5.5d)$$

5.3. METODE PERHITUNGAN

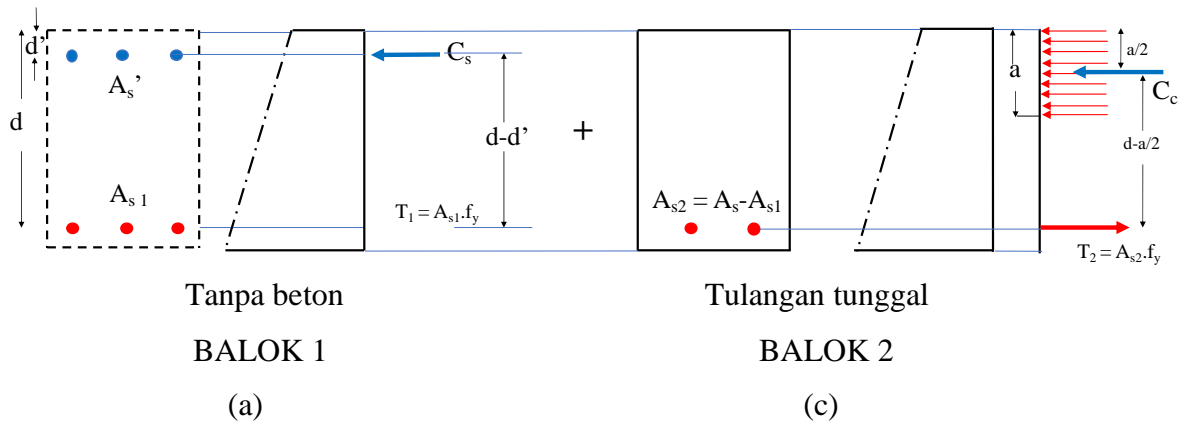
Balok beton dengan tulangan rangkap dibagi menjadi 2 bagian:

- Penampang hanya mengandung A_s' tanpa ada beton
- Penampang dengan tulangan tunggal (A_s)



(a)

=



Gambar 5.4. Jabaran perhitungan tulangan rangkap: (a) Tulangan rangkap dengan tegangan dan regangan, (b) Balok 1: Tulangan tekan tanpa beton, (c) Balok 2: Tulangan tunggal

$$\begin{array}{l} \text{Tulangan rangkap} = \\ C_s + C_c = T \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Tanpa beton} \\ C_s = T_1 \end{array} \quad + \quad \begin{array}{l} \text{Tulangan tunggal} \\ C_c = T_2 \end{array} \quad (5.6)$$

TANPA BETON

Sebagian dari A_s yaitu A_{s1} mengimbangi A_s'

$$C_s = A_s'(f_s - 0,85f_c') \quad (5.7a)$$

$$T_1 = A_{s1}.f_y \quad (5.7b)$$

$$M_1 = C_s. (d-d') \quad (5.7c)$$

TULANGAN TUNGGAL

C_c diimbangi sisa tulangan A_{s2}

$$A_{s2} = A_s - A_{s1} \quad (5.8a)$$

$$T_2 = A_{s2}. f_y \quad (5.8b)$$

$$M_2 = C_c. (d-a/2) \quad (5.8c)$$

$$\text{Momen tulangan rangkap} = M_1 + M_2 \quad (5.9)$$

BALOK 1: Tulangan Tekan Tanpa Beton

Kasus 1: Tulangan Tekan Leleh

$$C_s = T_1 \quad (5.10a)$$

$$A_s'. f_y = A_{s1}. f_y \quad (5.10b)$$

$$A_{s1} = A_s' \quad (5.10c)$$

$$M_{n1} = A_s' \cdot f_y (d-d') \quad (5.10d)$$

BALOK 2: Tulangan Tunggal

$$C_c = T_2 \quad (5.11a)$$

$$A_{s2} = A_s - A_{s1} \quad (5.11b)$$

$$A_{s2} = A_s - A_s' \quad (5.11c)$$

Kasus 2: Tulangan Tarik Leleh

$$T_2 = A_{s2} \cdot f_y \quad (5.12a)$$

$$T_2 = (A_s - A_{s1}) \cdot f_y \quad (5.12b)$$

$$C_c = T_2 \quad (5.12c)$$

$$0,85 f_c' \cdot a \cdot b = (A_s - A_{s1}) \cdot f_y \quad (5.12d)$$

$$a = \frac{(A_s - A_{s1}) f_y}{0,85 f_c' b} \quad (5.12e)$$

$$M_{n2} = T_2 (d-a/2) \quad (5.12f)$$

$$M_{n2} = (A_s - A_{s1}) \cdot f_y (d-a/2) \quad (5.12g)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (5.13a)$$

$$M_n = A_s' \cdot f_y (d-d') + (A_s - A_{s1}) \cdot f_y (d-a/2) \quad (5.13b)$$

5.4. PANJANG PENYALURAN TEKAN

Pada balok bertulangan tunggal, panjang penyaluran tarik harus diperhitungkan. Pada tulangan rangkap, selain panjang penyaluran tarik, juga harus diperhitungkan panjang penyaluran tekan. Efek perlemahan yang disebabkan retak akibat gaya tarik lentur tidak terdapat pada batang dan kawat pada daerah tekan. Biasanya daya dukung ujung dari batang pada beton sangat bermanfaat. Oleh karena itu panjang penyaluran yang lebih pendek digunakan secara lebih khusus pada daerah tekan dibandingkan dengan daerah tarik (R25.4.9.1).

Panjang penyaluran batang ulir dalam kondisi tekan (l_{dc}) adalah yang terbesar dari:

$$a) \left(\frac{0,24 f_y \psi_r}{\lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b \quad (5.14a)$$

$$b) 0,043 f_y \psi_r d_b \quad (5.14b)$$

$$c) \geq 200 \text{ mm.}$$

Nilai konstanta 0,043 memiliki satuan mm^2/N

Dimana:

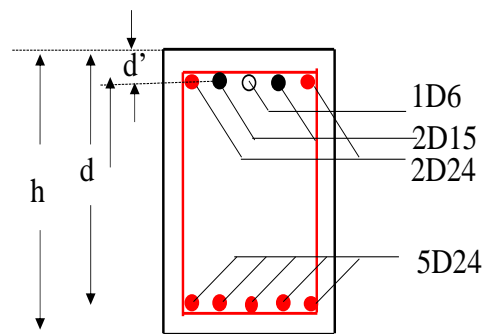
- ψ_r : faktor yang digunakan untuk memodifikasi panjang penyaluran berdasarkan tulangan pekekang
- ψ_r : 1 bila spasi sengkang > 100 mm; 0,75 bila spasi sengkang ≤ 100 mm (Pasal 25.4.9.3)
- λ : 1 untuk beton normal (Pasal 25.4.9.3)

5.5. CONTOH SOAL

5.5.1. CONTOH SOAL 1

1. DIKETAHUI:

Balok beton b 350 mm, h 500 mm, f_c' 31 MPa, f_y 400 MPa, lokasi di daerah rawan gempa, selimut 40 mm, sengkang 10 mm, spasi antar tulangan 25mm (Pasal 25.2). Balok menahan momen positif dengan penampang sebagai berikut:



Gambar 5.5. Penampang contoh soal 1

SOAL

- Periksalah apakah memenuhi ρ max longitudinal?
- Berapa momen yang mampu ditahan
- Bandingkan dengan bila memakai tulangan tunggal

PENYELESAIAN

- Pemeriksaan terhadap ρ_{maximum} longitudinal

$$\text{Tinggi efektif } d = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - \frac{1}{2} D = 500 - 40 - 10 - \frac{1}{2} \cdot 24 = 438 \text{ mm}$$

Jarak titik pusat tulangan tekan terhadap serat tekan terluar adalah d' .

$$d' = \text{selimut} + \text{sengkang} + 0,5D = 40 + 10 + 0,5 \cdot 24 = 62 \text{ mm}$$

Rasio tulangan tarik dan luas efektif ρ dibuat maximum. Pasal 18.6.3.1 menyatakan bahwa ρ_{maximum} baik tulangan atas maupun bawah berarti tulangan tekan maupun tarik adalah 0,025.

$$A_{\text{max longitudinal}} = 0,025 \cdot 350 \cdot 438 = 3832,5 \text{ mm}^2$$

Diameter dibuat dengan cara coba-coba dengan memaksimalkan lebar balok.

$$A_{\text{bawah}} = A_s = 5D24 = 5 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 = 5 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 24^2 = 2455,4 \text{ mm}^2$$

Tulangan atas (A_s'):

$$\begin{aligned} 2 \text{ D24} &= 2 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 24^2 &= 982,14 \text{ mm}^2 \\ 2 \text{ D15} &= 2 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 15^2 &= 353,57 \text{ mm}^2 \\ 1 \text{ D6} &= 1 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 6^2 &= 28,29 \text{ mm}^2 \\ A_{\text{atas}} &= A_s' &= 1364 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

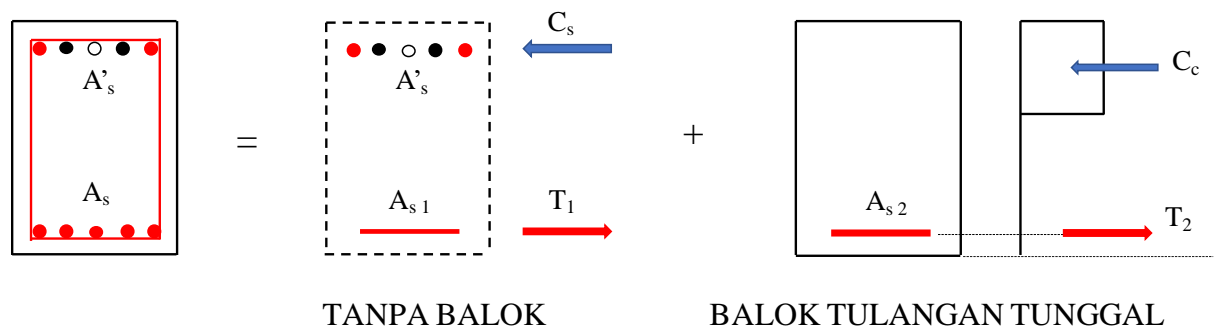
Tumilar, 2019 [16], menyatakan bahwa $A_{\text{max longitudinal}} = A^-$ or A^+ adalah 0,025 yang dapat diartikan salah satu atau jumlah keduanya pada tulangan rangkap.

$$A_{\text{longitudinal atas maupun bawah}} = A_s + A_s' = 2455,4 + 1364 = 3819,4 \text{ mm}^2$$

$$< 3832,5 \text{ mm}^2 (A_{\text{max longitudinal}} \text{ maka memenuhi Pasal 18.6.3.1)}$$

$$A_{\text{longitudinal atas maupun bawah}} / A_{\text{max longitudinal}} = 3819,4 / 3832,5 = 0,9966$$

b. Momen yang mampu ditahan

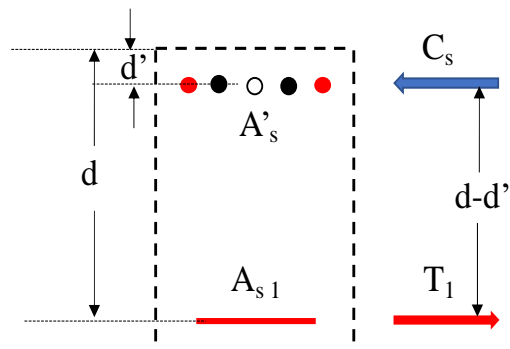


Gambar 5.6. Penampang balok bertulangan rangkap, (a) Tanpa tulangan, (b) Balok tulangan tunggal

Momen yang mampu ditahan = Momen tanpa balok + Momen tulangan tunggal

$$M = M_1 + M_2$$

TANPA BALOK



Gambar 5.7. keseimbangan tulangan tekan

Dianggap tulangan tarik meleleh

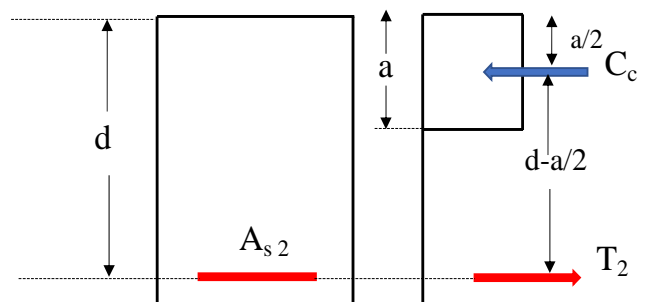
$$\begin{aligned} A_{s1} &= A_s' \\ A_{s1} &= 1364 \\ T_1 &= A_{s1} \cdot f_y = 1364 \cdot 400 = 545\,600 \text{ N} \end{aligned}$$

Keseimbangan

$$\begin{aligned} C_s &= T_1 \\ C_s &= A_s' (f_s - 0,85 f_c') \\ 545\,600 &= 1364 (f_s - 0,85 \cdot 31) \\ f_s &= 426,35 \text{ MPa jadi tulangan tekan telah meleleh, } f_s = f_y = 400 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_1 &= C_s (d-d') \\ M_1 &= 545\,600 (438 - 62) = 205\,145\,600 \text{ Nmm} = 205,15 \text{ KNm} \end{aligned}$$

BALOK TULANGAN TUNGGAL



Gambar 5.8. Balok bertulangan tunggal

$$\begin{aligned} A_{s2} &= A_s - A_{s1} = 2455,4 - 1364 = 1091,4 \text{ mm}^2 \\ T_2 &= A_{s2} \cdot f_y = 1091,4 \cdot 400 = 436\,542,86 \text{ MPa} \\ C_c &= 0,85 f_c' \cdot a \cdot b = 0,85 \cdot 31 \cdot a \cdot 350 = 9222,5 a \text{ N} \end{aligned}$$

Keseimbangan

$$\begin{aligned} C_c &= T_2 \\ 9222,5 a &= 436\,542,86 \end{aligned}$$

$$a = 47,3 \text{ mm}$$

$$M_2 = T_2 \cdot (d-a/2)$$

$$M_2 = 436\,542,86 (438 - 47,3/2) = 180\,873\,992,3 \text{ Nmm} = 180,1 \text{ KNm}$$

Momen yang mampu ditahan:

$$M = M_1 + M_2 = 205,15 + 180,1 = \mathbf{386 \text{ KNm}}$$

Pemeriksaan kelelahan tulangan tekan

Pasal 22.2.2.4.3 mensyaratkan batasan seperti Persamaan 5.5

$$\left(\frac{d'}{a}\right)_{\text{lim}} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{f_y}{600}\right)$$

Bila nilai $d'/a \leq d'/a_{\text{lim}}$ maka tulangan tekan meleleh.

$$d' = \text{selimut} + \text{sengkang} + 1/2D = 40 + 10 + 1/2 \cdot 24 = 62 \text{ mm}$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05(f'_c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05(31 - 28)}{7} = 0,8286$$

$$\left(\frac{d'}{a}\right)_{\text{lim}} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{f_y}{600}\right) = \frac{1}{0,8286} \left(1 - \frac{400}{600}\right) = 0,4023$$

$$(d'/a)_{\text{lim}} = 0,4023$$

$$(d'/a) = 62/47,3 = 1,31 > 0,4023 \rightarrow \text{tulangan tekan tidak meleleh}$$

c. Perbandingan dengan tulangan tunggal

$$A_{\text{max longitudinal atas maupun bawah}} = 0,025 \cdot 350 \cdot 438 = 3832,5 \text{ mm}^2$$

$$A_s / A_{s \text{ max tulangan rangkap}} = 0,9966$$

Untuk keperluan perbandingan, diusahakan:

$$A_s \text{ mendekati } 3832,5 \text{ mm}^2 \text{ atau}$$

$$A_s / A_{s \text{ max}} \text{ mendekati } 0,9966$$

Tulangan tarik A_s

Untuk mendekati nilai tersebut, dicoba beberapa nilai D sebagai berikut:

D 6

$$A_{1 \text{ tul}} = 0,25 \cdot \pi \cdot 6^2 = 28,29 \text{ mm}^2$$

D 28

$$A_{1 \text{ tul}} = 0,25 \cdot \pi \cdot 28^2 = 616 \text{ mm}^2$$

Menghitung jumlah tulangan maximum yang dapat dipasang setiap lapis:

Dicoba 5 tulangan D 28

Sisa tempat: $b - 2 \text{ selimut} - 2 \text{ sengkang} - n D - (n-1) \text{ spasi}$
 Sisa tempat = $350 - 2 \cdot 40 - 2 \cdot 10 - 5 \cdot 28 - (5-1) 25 = 10 \text{ mm}$

Dicoba:

$$\begin{array}{l} 6 D28 \quad \text{Luas: } 6 \cdot 616 = 3696 \quad \text{mm}^2 \\ \underline{1 D6 \quad \text{Luas: } 1 \cdot 28,29 = 28,29 \quad \text{mm}^2} \\ A_s = 3724,29 \quad \text{mm}^2 \text{ mendekati } A_{s \text{ max}} = 3832,5 \text{ mm}^2 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} A_s / A_{s \text{ max}} \text{ tulangan tunggal} = 0,9735 \text{ mendekati} \\ A_s / A_{s \text{ max}} \text{ tulangan rangkap} = 0,9966 \end{array}$$

Karena pada 1 baris jumlah tulangan D28 adalah 5 buah, maka A_s dipasang 2 baris sebagai berikut:

Penempatan tulangan:

Posisi	Jumlah tulangan	Tulangan	Luas, mm ²	Jarak ke serat terbawah, mm		Statis momen ke sisi bawah, Nmm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) = (4)·(6)
Lapis 1	4	D28	2464	40+10+28/2	64	236 544
Lapis 1	1	D6	28,29	40+10+6/2	53	1499
Lapis 2	2	D28	1232	40+10+28+25+14	117	144 144
Jumlah	10	A_s	3724,29		y	77,1
			d	500-77,1		422,9

$$T = A_s \cdot f_y = 3724,29 \cdot 400 = 1\,489\,714,29 \text{ N}$$

Keseimbangan

$$\begin{array}{l} C = T \\ 0,85 f_c' \cdot a \cdot b = T \\ 0,85 \cdot 31 \cdot 350 \cdot a = 1\,489\,714,29 \\ a = 161,53 \text{ mm} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} M = T (d - a/2) \\ M = 1\,489\,714,29 (422,9 - 161,53/2) \\ M = 450\,243\,485 \text{ Nmm} = \mathbf{450,24 \text{ KNm}} \end{array}$$

Meskipun dengan jumlah tulangan yang lebih kecil, Rasio M tulangan rangkap terhadap M tulangan tunggal adalah 85,7%

CONTOH SOAL 2

DIKETAHUI: balok beton b 300 mm, h 520 mm, f_c' 31 MPa, f_y 400 MPa, selimut 40 mm, sengkang 10 mm. Dibuat tulangan atas dan bawah untuk menahan gempa. spasi antar tulangan 25 mm

SOAL : Berapa momen maximum untuk menahan gempa

PENYELESAIAN:

Jarak titik pusat tulangan tekan terhadap serat tekan terluar adalah d' .

$$d' = \text{selimut} + \text{sengkang} + 0,5D = 40 + 10 + 0,5 \cdot 22 = 61 \text{ mm}$$

$$d_{1 \text{ baris}} = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - 0,5 D = 520 - 40 - 10 - 0,5 \cdot 22 = 459 \text{ mm}$$

$$\text{Luas 1 D22} = 0,25 \cdot 22/7 \cdot 22^2 = 380,3 \text{ mm}^2$$

Pasal 18.6.3.1 menyatakan bahwa ρ_{maximum} baik tulangan atas maupun bawah adalah 0,025.

ρ_{maximum} baik tulangan atas maupun bawah berarti ρ_{maximum} longitudinal.

$$A_{s \text{ max longitudinal}} = \rho_{\text{max long}} b d = 0,025 \cdot 300 \cdot 459 = 4016,25 \text{ mm}^2$$

Dipakai D 22

$$\text{Jumlah max tulangan longitudinal} = 4016,25/380,3 = 10,56 \text{ buah tulangan}$$

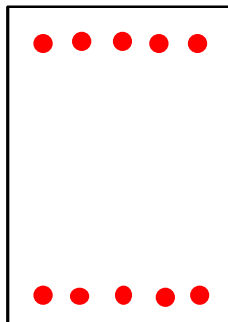
$$\text{Dipakai tulangan longitudinal atas dan bawah} = 10 \text{ buah}$$

Gaya gempa berarah bolak-balik, maka tulangan dibuat simetri atas dan bawah.

$$A_{\text{atas}} = A_{\text{bawah}} = 5 \text{ buah}$$

Berdasarkan penempatan yang simetris tersebut, diambil asumsi sebagai berikut:

Asumsi 1: Tulangan rangkap

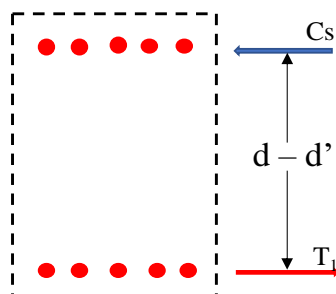


Bila didekati sebagai tulangan rangkap, maka Analisa dibagi 2 tahap:

1. tanpa balok
2. balok tulangan tunggal.

Gambar 5.9. Tulangan rangkap

TANPA BALOK



$$C_s = 5 \cdot \text{Luas D22} \cdot f_y$$

$$C_s = 5 \cdot 380,3 \cdot 400 = 760 571,43 \text{ N}$$

$$T_1 = C_s$$

Maka seluruh tulangan bagian bawah dipergunakan untuk mengimbangi C_s sehingga tidak ada perhitungan tahap 2 yaitu tulangan tunggal

Gambar 5.10. Keseimbangan tulangan tekan

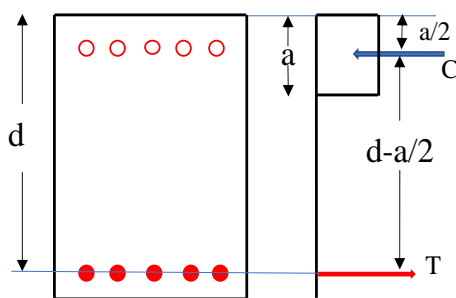
$$\begin{aligned}
 d-d' &= 459 - 61 = 398 \text{ mm} \\
 M &= C_s (d-d') = 760\,571,43 \cdot 398 \\
 M &= 302\,707\,429 \text{ Nmm} = 302,7 \text{ KNm}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian beton tidak memberikan kontribusi pada momen.

Selanjutnya, dicoba dengan beberapa asumsi.

1. Tulangan atas dianggap tidak bekerja, jadi merupakan tulangan tunggal
2. Beberapa tulangan bagian atas dianggap sebagai tulangan tekan, dihitung sebagai tulangan rangkap

Asumsi 2: Tulangan atas dianggap tidak bekerja, jadi merupakan tulangan tunggal



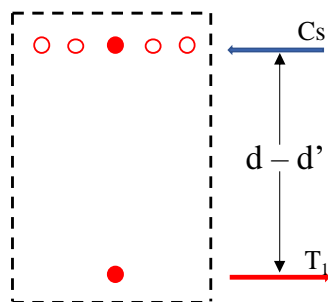
$$\begin{aligned}
 T &= 5 \cdot \text{Luas } 22 \cdot f_y = 5 \cdot 380,3 \cdot 400 \\
 T &= 760\,571,43 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Keseimbangan} &= T \\
 0,85 f_c' \cdot a \cdot b &= 760\,571,43 \\
 0,85 \cdot 31 \cdot 350 \cdot a &= 760\,571,43 \\
 a &= 82,47 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Gambar 5.11. Tulangan atas dianggap tidak bekerja

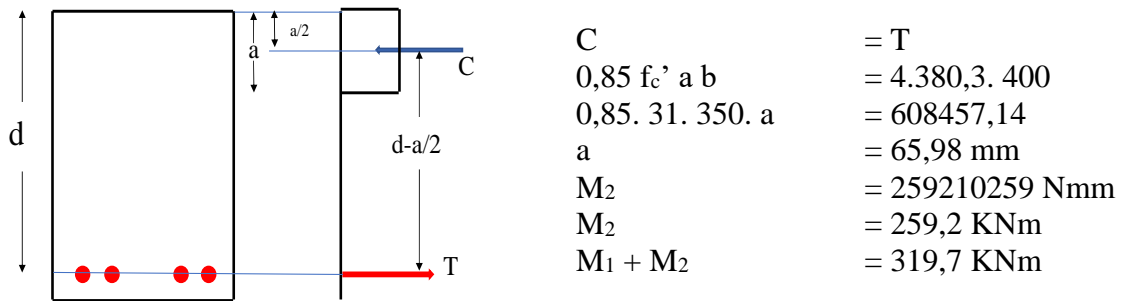
$$\begin{aligned}
 \text{Lengan momen: } d-a/2 &= 459 - 82,47/2 = 417,76 \text{ mm} \\
 M &= T \cdot \text{lengan momen} = T (d-a/2) = 760\,571,43 \cdot 417,76 = 317\,740\,459 \text{ Nmm} = 317,7 \text{ KNm}
 \end{aligned}$$

Asumsi 3: tulangan rangkap dengan 4 tulangan bagian atas dianggap tidak bekerja



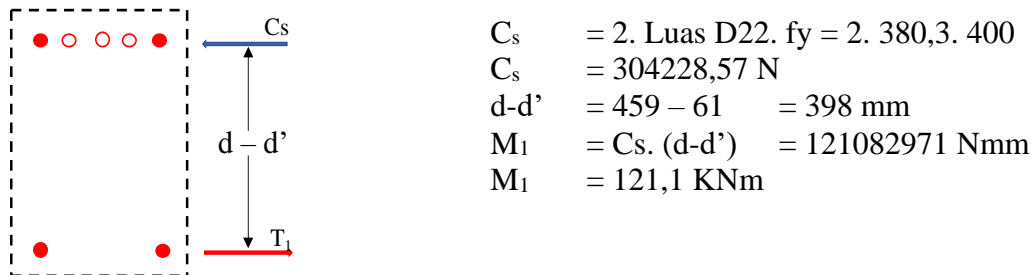
$$\begin{aligned}
 C_s &= 1 \cdot \text{Luas } D22 \cdot F_y = 1 \cdot 380,3 \cdot 400 \\
 C_s &= 152\,114,3 \text{ N} \\
 d-d' &= 459 - 61 = 398 \text{ mm} \\
 M_1 &= C_s \cdot (d-d') = 605\,414\,85,7 \text{ Nmm} \\
 M_1 &= 60,5 \text{ KNm}
 \end{aligned}$$

Gambar 5.12. Satu tulangan bagian atas dianggap As'

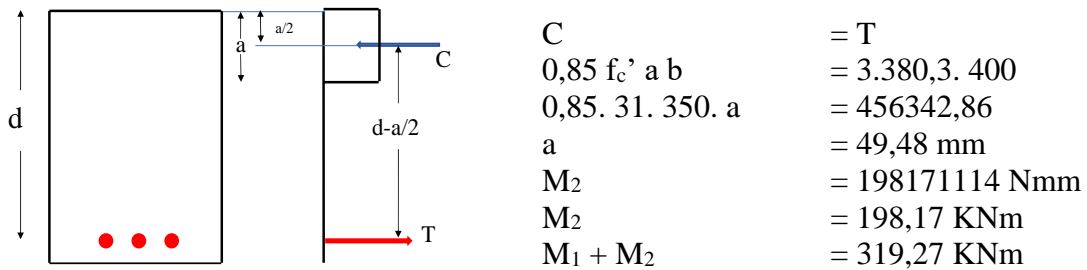


Gambar 5.13. Empat tulangan bagian bawah dianggap tulangan tunggal

Asumsi 4: tulangan rangkap dengan 3 tulangan bagian atas dianggap tidak bekerja

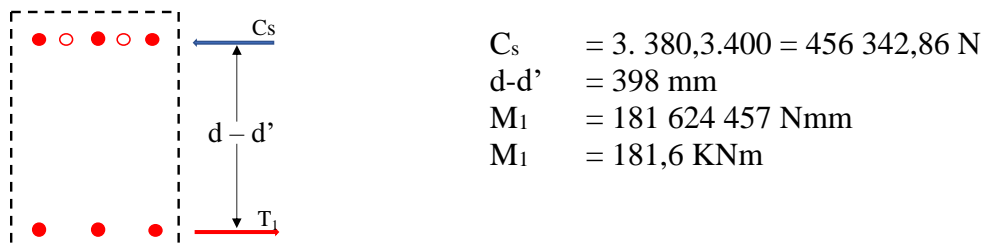


Gambar 5.14. Dua tulangan atas dianggap bekerja sebagai A_s'



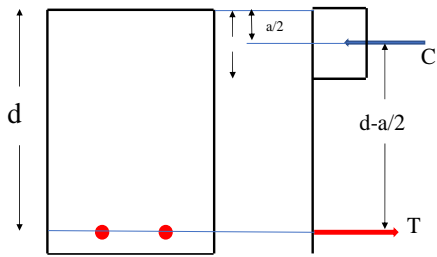
Gambar 5.15. Tiga tulangan bagian bawah dianggap tulangan tunggal

Asumsi 5: tulangan rangkap dengan 2 tulangan bagian atas dianggap tidak bekerja



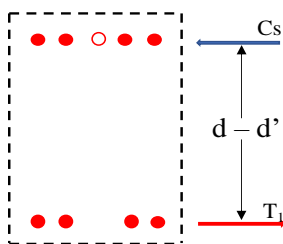
Gambar 5.16. Tiga tulangan bagian atas dianggap A_s'

C	$= T$
$0,85 f_c' a b$	$= 2.380,3. 400$
$0,85. 31. 350. a$	$= 304228,57$
a	$= 32,99 \text{ mm}$
M_2	$= 134623022 \text{ Nmm}$
M_2	$= 134,6 \text{ KNm}$
$M_1 + M_2$	$= 315,2 \text{ KNm}$



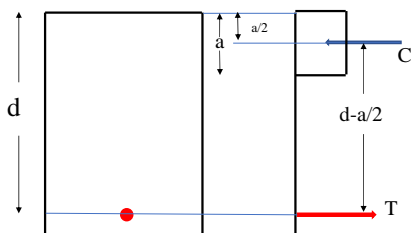
Gambar 5.17. Dua tulangan bagian bawah dianggap tulangan tunggal

Asumsi 6: tulangan rangkap dengan 1 tulangan bagian atas dianggap tidak bekerja



$$\begin{aligned}
 C_s &= 4 \cdot 380,3 \cdot 400 = 608\,457,1 \text{ N} \\
 d-d' &= 398 \text{ mm} \\
 M_1 &= 242\,165\,943 \text{ Nmm} \\
 M_1 &= 242,16 \text{ KNm}
 \end{aligned}$$

Gambar 5.18. Empat tulangan bagian atas dianggap A_s'



$$\begin{aligned}
 C &= T \\
 0,85 f_c' a b &= 1.380,3 \cdot 400 \\
 0,85 \cdot 31 \cdot 350 \cdot a &= 152114,3 \\
 a &= 16,49 \text{ mm} \\
 M_2 &= 68565984,1 \text{ Nmm} \\
 M_2 &= 68,56 \text{ KNm} \\
 M_1 + M_2 &= 310,72 \text{ KNm}
 \end{aligned}$$

Gambar 5.19. Satu tulangan bagian bawah dianggap tulangan tunggal

Direncanakan tulangan tekan meleleh agar tercapai daktilitas.

Pasal 22.2.2.4.3 mensyaratkan Batasan seperti Persamaan 5.5

$$\left(\frac{d'}{a} \right)_{\text{lim}} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{f_y}{600} \right)$$

Bila nilai $d'/a \leq d'/a_{\text{lim}}$ maka tulangan tekan meleleh.

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05(f_c' - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05(31 - 28)}{7} = 0,8286$$

$$\left(\frac{d'}{a} \right)_{\text{lim}} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{f_y}{600} \right) = \frac{1}{0,8286} \left(1 - \frac{400}{600} \right) = 0,4023$$

$$\left(\frac{d'}{a}\right)_{\text{lim}} = 0,4023$$

Rekapitulasi perbandingan metode penulangan dan momen yang dapat ditahan

Asumsi	Metode Tulangan	Tulangan atas, buah	Tulangan bawah, buah	Momen, KNm	a	d'/a
1	Rangkap	5	5	302,7	0	-
2	Tunggal	0, 5 tul diabaikan	5	317,7	82,47	0,74
3	Rangkap	1, 4 tul diabaikan	4	319,7	65,98	0,92
4	Rangkap	2, 3 tul diabaikan	3	319,3	49,48	1,23
5	Rangkap	3, 2 tul diabaikan	2	315,2	32,99	1,85
6	Rangkap	4, 1 tul diabaikan	1	310,7	16,49	3,7

Kesimpulan:

1. Momen terbesar dicapai pada tulangan rangkap dengan asumsi 4 tulangan bagian atas tidak berkontribusi
2. Pendekatan sebagai tulangan tunggal bernilai 99,4% dari kesimpulan butir 1, dengan demikian taksiran momen dapat didekati sebagai tulangan tunggal
3. Pada semua asumsi, tulangan tekan tidak meleleh

5.6. LATIHAN

1. Sebuah balok menahan M_u pos 450 KNm, b 280mm, h 550 mm, f_c' 32 MPa, f_y 400 MPa, sengkang D10, selimut 40mm. Hitung dan gambar tulangan lenturnya.
2. Bila nomor 1 adalah dari struktur sendi-rol dengan bentang 7m, berapa beban yang mampu ditahan?
3. Bila nomor 1 adalah dari struktur jepit-jepit dengan bentang 8m, berapa beban yang mampu ditahan.