

BALOK TERLENTUR BERTULANGAN TUNGGAL

3.1. PENDAHULUAN

Yang dimaksud balok bertulangan tunggal adalah balok yang hanya memerlukan tulangan tarik saja. Tulangan di daerah tekan hanya berfungsi menjaga tulangan lentur tetap pada posisinya, sebagai tulangan integritas dan menjaga bentuk dan posisi sengkang. Tulangan di daerah tekan tersebut biasa disebut sebagai tulangan praktis.

Terdapat dua jenis dalam pekerjaan balok yaitu:

1. Melakukan penilaian atas balok yang sudah ada, atau menganalisis kekuatannya, sifat kehancurannya berdasarkan ukuran penampang dan panjang balok, tegangan beton (bisa dari uji *core drill* atau *hammer*), tegangan leleh baja (bisa dari uji tarik baja di laboratorium), pengontrolan keamanan terhadap lendutan, memeriksa kesesuaian tebal selimut beton dan pemeriksaan sifat kehancurannya
2. Melakukan perencanaan yaitu memilih penampang yang mampu menahan beban yang dikenakan dan memiliki sifat daktail dan aman terhadap lendutan, meliputi: dimensi, mutu beton, mutu baja, jumlah dan letak tulangan

Balok terlentur harus memenuhi hal-hal sebagai berikut:

1. Kompatibilitas tegangan dan regangan

Tegangan pada setiap titik harus selalu berhubungan dengan regangan pada titik tersebut, kecuali pada balok pendek, dan balok tinggi. Distribusi regangan sepanjang tinggi penampang dianggap linear.

2. Keseimbangan

Antar gaya-gaya internal harus seimbang, dan gaya internal seimbang dengan akibat beban external.

3. Tipe keruntuhan daktail

Tulangan tarik leleh sebelum beton hancur.

3.2. MOMEN NOMINAL

Momen nominal didasarkan pada keruntuhan daktail, berarti tulangan leleh sebelum beton hancur. Cara mencapai keruntuhan daktail adalah dengan mendesain tulangan tarik meleleh atau mencapai f_y .

3.2.1. Tegangan dan Regangan Balok Beton Bertulang

Gaya tekan yang ada di dalam balok beton disebut C atau *compression*, dan gaya tarik disebut T atau *tension* (Gambar 2.1.3). Keduanya harus seimbang yang dinyatakan dengan Persamaan 3.1:

$$C = T \quad (3.1)$$

sehingga tercapai keseimbangan dalam.

Karena momen timbul tegangan tekan dan tarik dalam balok beton. Daerah yang tidak tertekan dan tidak tertarik disebut garis netral. Beberapa literature memberikan notasi x untuk c yaitu jarak serat tekan terluar ke garis netral atau netral axis/NA (Gambar 3.1). Tegangan lentur aktual sebenarnya berbentuk parabola (Gambar 3.1.a). Namun karena rumit, maka disederhanakan dengan memakai model Whitney seperti (Gambar 3.1.b). Karena penyederhanaan, kemungkinan perubahan beban, maka tinggi bidang yang tertekan hanya a (Persamaan 2.13). Garis kerja gaya C adalah garis berat bidang tekan atau untuk Gambar 3.1.d garis berat bidang tekan adalah $a/2$.

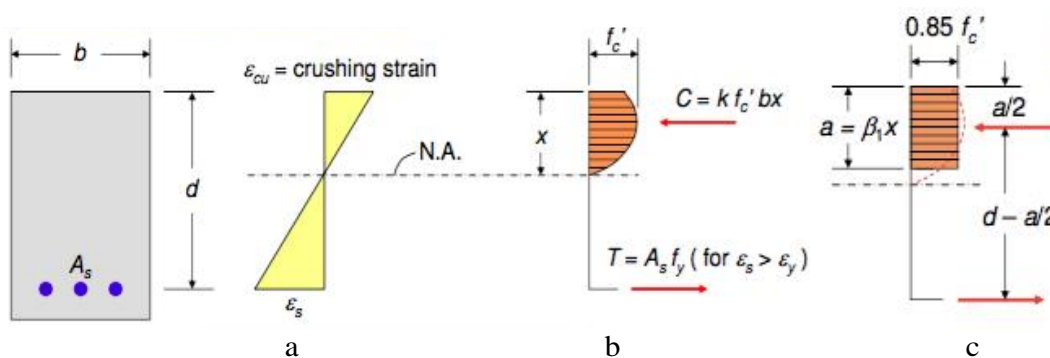
Analog dengan C, garis kerja gaya T adalah di garis berat tulangan tarik. Antara C dan T terdapat jarak. Jarak tersebut adalah:

$$Jd = d - a/2 \quad (3.2)$$

Karena C dan T berlawanan arah dan ada jarak, maka di dalam beton terjadi momen dan jd menjadi lengan momen (Gambar 3.1). Momen tersebut adalah momen dari penampang apa adanya, sehingga disebut "Momen Nominal (M_n)". Momen nominal tersebut sebesar:

$$M_n = C \cdot jd \quad \text{atau} \quad M_n = T \cdot jd \quad (3.3)$$

Momen inilah yang diperhitungkan untuk menahan momen akibat beban luar yang diperoleh dari analisis struktur.



Gambar 3.1. Regangan, tegangan aktual dan tegangan Whitney
 (a) Regangan, (b) Tegangan aktual, (c) Tegangan Whitney

3.2.2. Analisis Momen Kapasitas

Bila suatu penampang yang diketahui lebar b , tinggi h , mutu beton f'_c , mutu baja f_y , letak dan jumlah tulangan tarik (A_s dan d), diameter sengkang, maka kemampuan penampang tersebut dalam menahan momen dihitung dengan tahapan sebagai berikut:

3.2.2.1. Gaya Tekan, Gaya Tarik dan Momen

Gaya Tekan

$$C = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \quad (3.4)$$

$$A_{\text{efektif}} = b \cdot d \quad (3.5)$$

Gaya Tarik

$$\begin{aligned} A_s &= \text{luas tulangan tarik} = n \cdot \text{luas tulangan} \\ \rho &= A_s / A_{\text{efektif}} \\ A_s &= \rho A_{\text{efektif}} = \rho b d \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$T = A_s \cdot f_s \quad (3.7)$$

Agar daktail tulangan tarik dianggap leleh, maka

$$T = A_s \cdot f_y \quad (3.8)$$

Keseimbangan:

$$\begin{aligned} C &= T \\ 0,85 f'_c \cdot b \cdot a &= A_s \cdot f_y \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{\rho \cdot f_y \cdot d}{0,85 \cdot f'_c} \quad (3.10)$$

$$M_n = C \cdot \text{lengan momen} = C \cdot jd \quad (3.11)$$

Dengan memasukkan Pers. 3.2 maka

$$M_n = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a \cdot (d - a/2) \quad (3.12)$$

Dengan memasukkan nilai f'_c pada Tabel 2.5, diperoleh nilai β_1 ; maka letak garis netral c dapat dihitung:

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad (3.13)$$

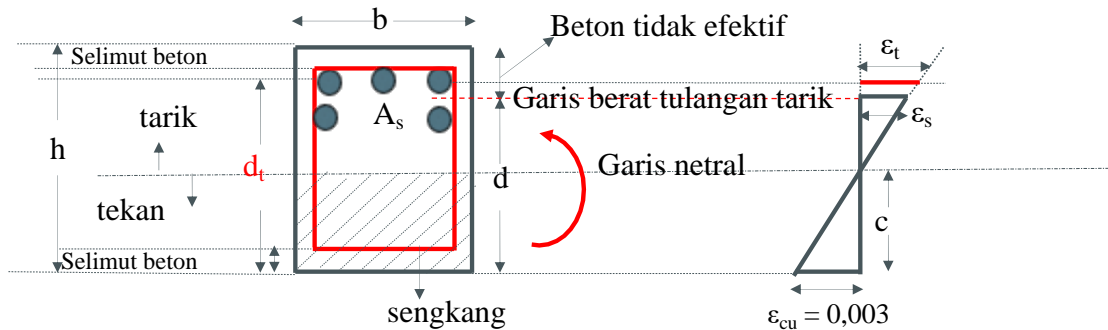
Tinggi efektif d dihitung dari titik berat tulangan (Gambar 2.3.b). Bila diketahui ϵ_{cu} (0,003), c , a dan d maka diagram tegangan Whitney dan regangan balok dapat digambarkan.

Selanjutnya ϵ_s dapat diperiksa dengan persamaan segitiga siku-siku sebangun pada diagram regangan Gambar 3.2 seperti Persamaan 3.14.

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cu}} = \frac{d-c}{c} \quad (3.14)$$

$$\epsilon_s = \left(\frac{d-c}{c}\right) \epsilon_{cu} \quad (3.14.a)$$

Tipe kehancuran duktail terpenuhi apabila tulangan tarik terluar leleh atau $\epsilon_t \geq \epsilon_y$ (Gambar 3.2).



Gambar 3.2. Regangan tarik terluar, regangan tarik dan regangan tekan

Jarak tulangan tarik terluar terhadap serat tekan terjauh adalah d_t .

$$d_t = h - \text{selimut} - \text{diameter sengkang} - \frac{1}{2} \text{ diameter tulangan} \quad (3.15)$$

Sehingga regangan tarik terluar:

$$\epsilon_t = \left(\frac{d_t-c}{c}\right) \epsilon_{cu} = \left(\frac{d_t-c}{c}\right) 0,003 \quad (3.16)$$

3.2.2.2. Pemeriksaan Kelelahan Tulangan:

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (3.17)$$

$E_s = 200.000 \text{ MPa}$

Bila $\epsilon_t \geq \epsilon_y$, maka tulangan tarik leleh sehingga persyaratan keruntuhan duktail terpenuhi.

3.2.2.3. Kapasitas Momen

Dengan mempergunakan Gambar 2.7 dan ϵ_t tersebut diperoleh faktor reduksi ϕ , sehingga kemampuan penampang balok dalam menahan momen adalah:

Momen yang mampu ditahan adalah $= \phi M_n$

3.3. DESAIN BALOK BETON BERTULANG

Pada perencanaan, biasanya diketahui peruntukannya, sehingga beban diketahui. Dimensi elemen struktur biasanya ditentukan arsitek, sedangkan mutu beton struktur umum minimum 17 MPa selengkapnya tercantum pada Tabel 19. 2.1.1 SNI, dan $\sqrt{f'_c} \leq 8,3$ MPa (Pasal 22.5.3.1, 22.6.3.1, 22.7.2.1 dan 25.4.1.4) [15]; sedangkan untuk baja f_y minimum 420 MPa (1.3.2).

Dengan demikian properti balok yang diketahui adalah:

Tinggi balok : h (tinggi minimum 2.11.4 atau cek lendutan < Tabel 2.7)

Lebar balok : b (perkiraan $\pm 30\%$ h)

Mutu beton : f'_c

Mutu baja : f_y

Selimit : Tabel 1.5

Spasi : s (2.12.3)

Tinggi efektif : d (perkiraan $\pm 80\%$ h)

Yang harus ditahan: Momen lentur (M_u)

Yang perlu dicari adalah jumlah tulangan A_s

3.3.1. Rasio Luas Tulangan dan Luas Efektif Beton

Rasio luas tulangan terhadap luas efektif beton tercantum pada Persamaan 2.6:

$$\rho = \frac{A_s}{A_{ef}}$$

Bila dikalikan dengan kualitas masing-masing material menjadi rasio kekuatan baja dan beton.

$$\frac{A_s f_y}{A_{ef} f'_c} = \frac{T}{C/0,85}$$

$$\frac{T}{C/0,85} = \rho \frac{f_y}{f'_c}$$

$$\omega = \rho \frac{f_y}{f'_c} \quad (3.18)$$

$$\rho = \frac{\omega f'_c}{f_y} \quad (3.18.a)$$

Persamaan 3.11:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{\rho \cdot f_y \cdot d}{0,85 \cdot f'_c}$$

Persamaan 3.18 dimasukkan ke Pers. 3.10, maka

$$a = \omega \left(\frac{d}{0,85} \right) \quad (3.19)$$

Momen dari Gaya Tarik

$$M_n = T \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{\omega \cdot d}{2 \cdot 0,85} \right) = A_s f_y \cdot d (1 - 0,59\omega) \quad (3.20)$$

Momen dari Gaya Tekan

$$C = 0,85 f'_c b \cdot a = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \frac{\omega \cdot d}{0,85} = f'_c \cdot b \cdot \omega \cdot d$$

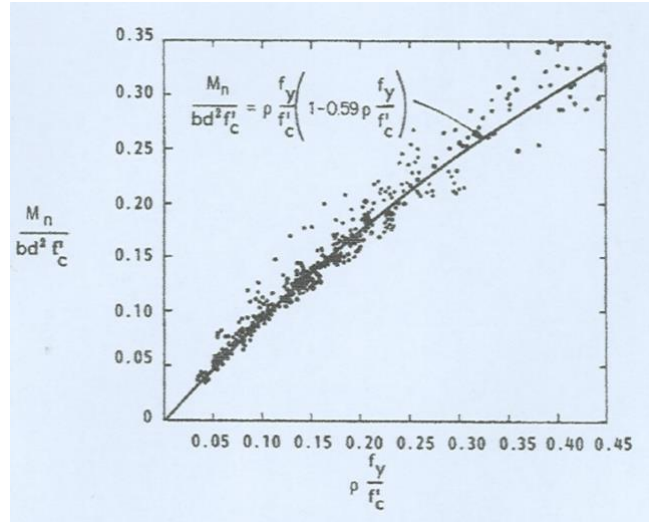
$$M_n = C \cdot \left(d - \frac{\omega \cdot d}{2 \cdot 0,85} \right) = f'_c \cdot b \cdot d^2 \cdot \omega \cdot (1 - 0,59\omega)$$

$$\frac{M_n}{b \cdot d^2} = R_n = f'_c \cdot \omega \cdot (1 - 0,59\omega)$$

$$\frac{M_n}{b \cdot d^2 f'_c} = \omega \cdot (1 - 0,59\omega) \quad (3.21)$$

Dari Pers. 2. 28.a diperoleh $M_n = \frac{M_u}{\phi}$

Hubungan antara $\frac{M_n}{b \cdot d^2 f'_c}$ dan ω atau $\rho \frac{f_y}{f'_c}$ dari pengujian 364 balok dengan $\varepsilon_s > \varepsilon_y$ dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Hubungan antara $\frac{M_n}{b.d^2 f'_c}$ dan $\rho \frac{f_y}{f'_c}$

$$\frac{M_n}{b d^2} = R_n \quad (3.22)$$

Persamaan 3.21 dapat ditulis kembali sebagai berikut

$$\frac{M_n}{b.d^2 f'_c} = \frac{R_n}{f'_c} = \omega. (1 - 0,59\omega)$$

dengan $\rho \frac{f_y}{f'_c} = \omega.$

maka $\frac{R_n}{f'_c} = \rho \frac{f_y}{f'_c} \left(1 - 0,59 \frac{f_y}{f'_c} \rho\right)$

$$\frac{R_n}{f'_c} = \rho \frac{f_y}{f'_c} \left(1 - \frac{f_y}{2.0,85 f'_c} \rho\right)$$

$$\frac{R_n}{f'_c} = \rho 0,85 \frac{f_y}{0,85 f'_c} \left(1 - \frac{f_y}{2.0,85 f'_c} \rho\right)$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 f'_c}$$

$$\frac{R_n}{f'_c} = \rho 0,85 \frac{f_y}{0,85 f'_c} \left(1 - \frac{f_y}{2.0,85 f'_c} \rho\right)$$

$$\frac{R_n}{f'_c} = \rho 0,85 m(1 - 0,5 m \rho)$$

$$\frac{R_n}{f'_c} = 0,85 \rho m - 0,85.0,5 m^2 \rho^2$$

$$0,85 \cdot 0,5 \text{ m}^2 \rho^2 - 0,85 \text{ m} \rho + \frac{R_n}{f'_c} = 0$$

$$0,5 \rho^2 - \frac{1}{\text{m}} \rho + \frac{R_n}{f'_c} \frac{1}{0,85 \text{ m}^2} \frac{f_y}{f_y} = 0$$

$$\rho^2 - \frac{1}{\text{m}} \rho + R_n \frac{1}{\text{m} f_y} = 0$$

$$\rho = \frac{\frac{1}{\text{m}} \pm \sqrt{\frac{1}{\text{m}^2} - 2 \frac{R_n}{\text{m} f_y}}}{1}$$

$$\rho = \frac{1}{\text{m}} \pm \sqrt{\frac{1}{\text{m}^2} - 2 \frac{R_n}{\text{m} f_y}}$$

$$\rho = \frac{1}{\text{m}} \pm \frac{1}{\text{m}} \sqrt{1 - 2 \frac{R_n \text{m}}{f_y}}$$

$$\rho = \frac{1}{\text{m}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2\text{m}R_n}{f_y}} \right) \quad (3.23)$$

3.3.2. Hubungan antara Variasi ρ , M_n , ϕM_n dan Perilakunya

Perubahan ρ akan mengubah kondisi balok seperti terkontrol/ terkendali tekan, transisi atau terkendali tarik. Bila suatu penampang balok diketahui sebagai berikut:

- Tinggi balok : $h = 550 \text{ mm}$
- Lebar balok : $b = 350 \text{ mm}$
- Mutu beton : $f'_c = 28 \text{ MPa}$
- Mutu baja : $f_y = 420 \text{ MPa}$
- Tinggi efektif : $d = 485 \text{ mm}$
- Sengkok : persegi tertutup
- Asumsi : tulangan tarik 1 lapis, maka $\epsilon_s = \epsilon_t$

Persamaan yang digunakan antara lain:

Tabel 2.5 : β_1

Persamaan 3.19. : $\omega = \rho \frac{f_y}{f'_c}$

Persamaan 3.11. : $a = \frac{A_s f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{\rho \cdot f_y \cdot d}{0,85 \cdot f'_c}$

Persamaan 3.14. : $c = \frac{a}{\beta_1}$

Persamaan 3.15.a : $\epsilon_s = \left(\frac{d-c}{c}\right) \epsilon_{cu}$ karena A_s 1 lapis maka $\epsilon_s = \epsilon_t$

Gambar 2.7, lainnya : ϕ

Persamaan 3.22 : $\frac{M_n}{b \cdot d^2 f'_c} = \omega \cdot (1 - 0,59\omega)$

: $M_n = \omega \cdot (1 - 0,59\omega) (b d^2 f'_c)$

Persamaan 2.8.a : $M_u = \phi M_n$

Jumlah tulangan (ρ) dinaikkan secara bertahap sehingga perhitungan seperti Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Perilaku balok beton pada berbagai luas tulangan tarik

No	b mm	h mm	d mm	$\rho = A_s/(bd)$	$A_s = \rho bd$ mm ²	f'_c MPa	f_y MPa	b_1	ω	a mm	c mm	ϵ_t	f	Mn Nmm	Mu Nmm	Ket
1	350	550	485	0,005	848,75	28	420	0,85	0,075	42,79	50,35	0,026	0,9	165.239.976	148.715.978	Terkontrol tarik
2	350	550	485	0,01	1697,5	28	420	0,85	0,15	85,59	100,69	0,011	0,9	315.179.154	283.661.238	Terkontrol tarik
3	350	550	485	0,015	2546,25	28	420	0,85	0,225	128,38	151,04	0,007	0,9	449.817.533	404.835.780	Terkontrol tarik
4	350	550	485	0,0181	3072,475	28	420	0,85	0,2715	154,91	182,25	0,005	0,9	525.609.268	473.048.341	Batas terkendali tarik
5	350	550	485	0,0207	3513,825	28	420	0,85	0,3105	177,17	208,43	0,004	0,82	584.641.372	476.515.669	Transisi, Batas daktilitas
6	350	550	485	0,025	4243,75	28	420	0,85	0,375	213,97	251,73	0,003	0,715	673.191.898	481.332.207	Transisi, Batas atas Longitudinal atas dan bawah
7	350	550	485	0,0285	4837,875	28	420	0,85	0,4275	243,93	286,97	0,002	0,656	736.913.671	483.303.323	Batas terkendali tekan
8	350	550	485	0,03	5092,5	28	420	0,85	0,45	256,76	302,08	0,0018	0,65	761.927.883	495.253.124	Terkontrol tekan

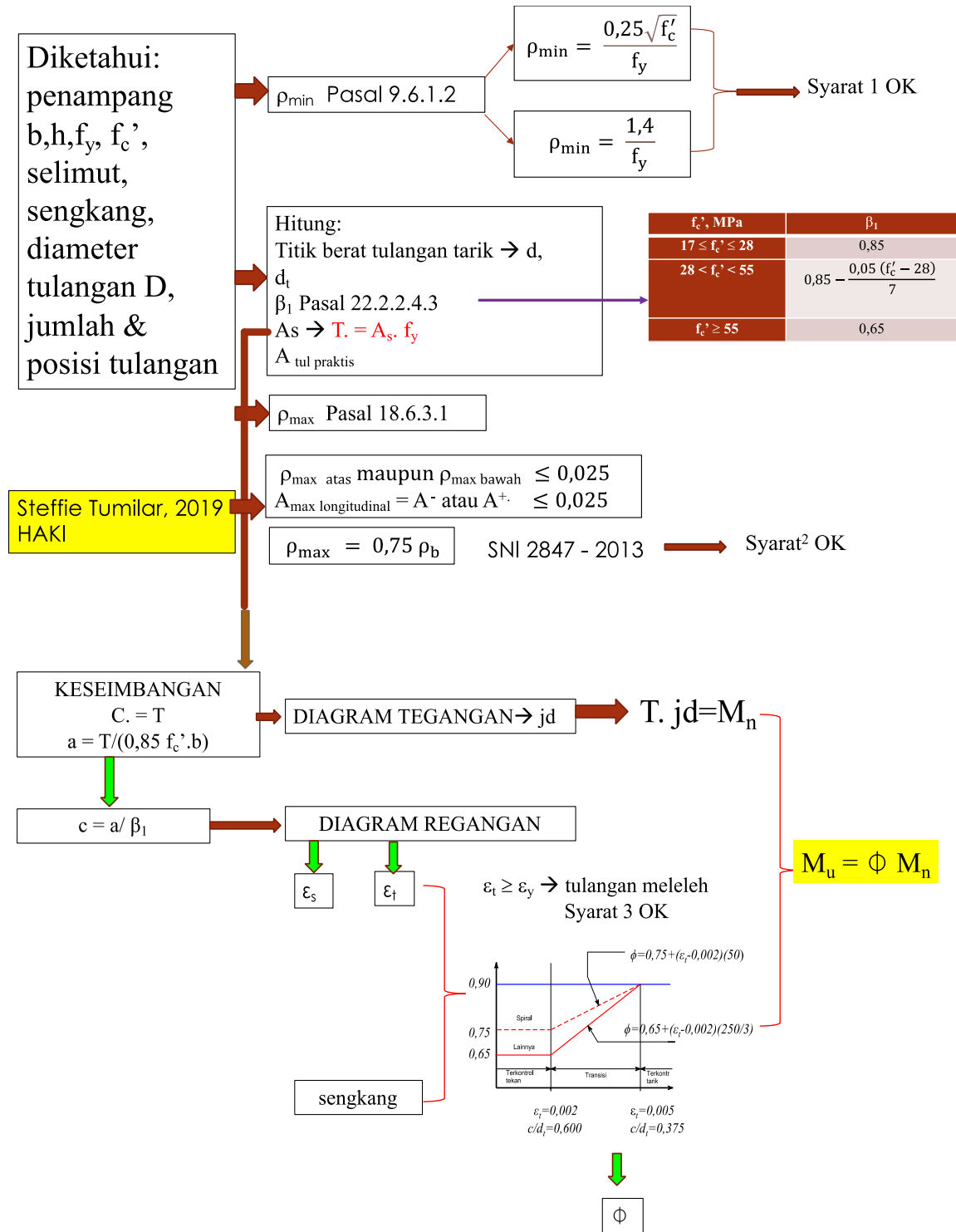
Dari Tabel 2.1.2 terlihat bahwa, $\epsilon_t = 0,005; 0,004; 0,002$ adalah kondisi seperti diuraikan pada 2.6.4. Yang perlu diwaspadai adalah nilai ρ 0,025. Karena sesuai 2.9.3 tulangan longitudinal atas maupun bawah mempunyai ρ maximum 0,025.

DASAR DESAIN: KERUNTUHAN DAKTAIL

Tulangan minimum terpenuhi, tulangan maximum terpenuhi, $\epsilon_t \geq 0,05$

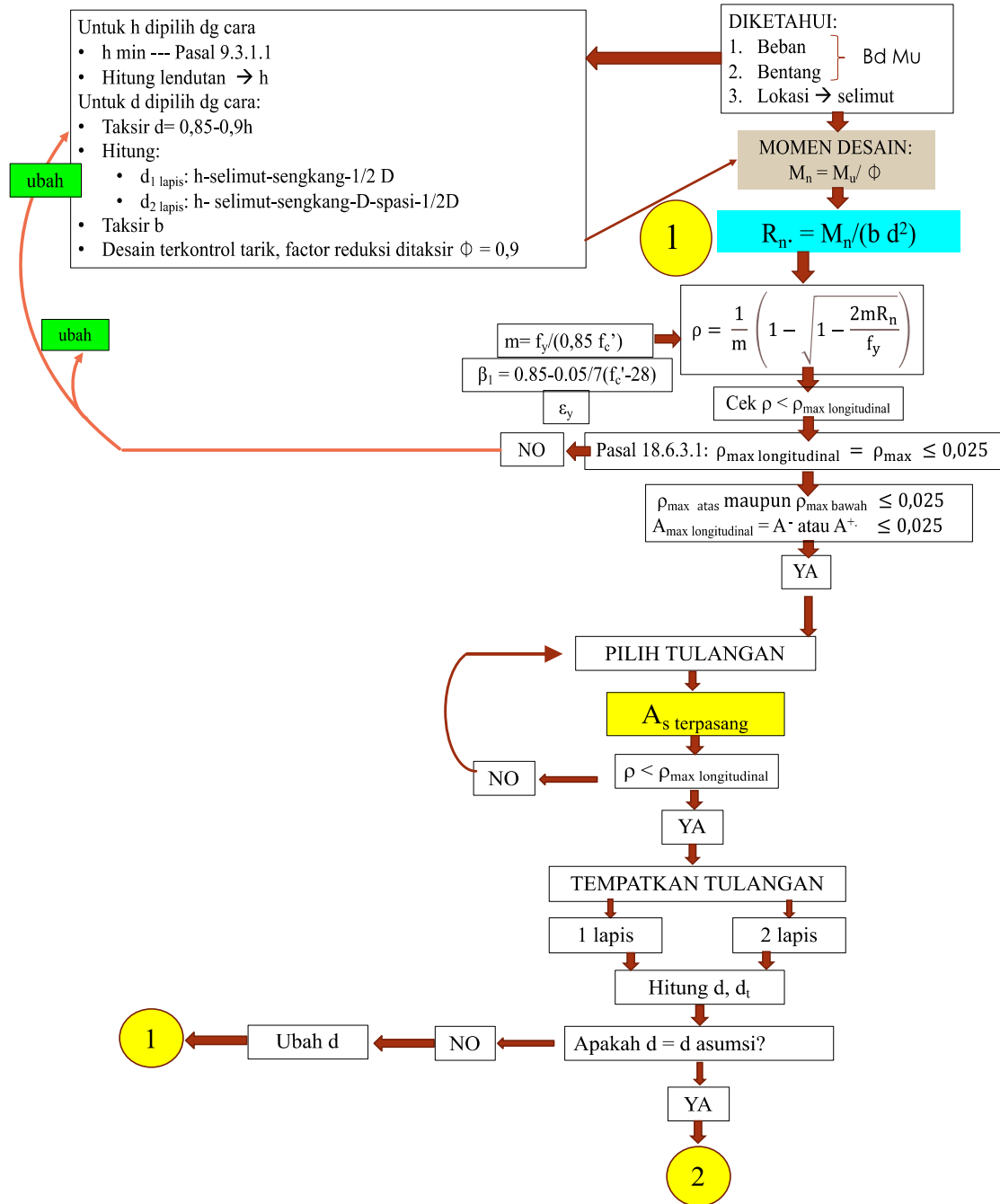
3.4. DIAGRAM ALIR

3.4.1. Diagram Alir Analisis Balok Beton Bertulangan Tunggal



Gambar 3.4. Diagram alir analisis balok beton bertulangan tunggal

3.4.2. Diagram Alir Desain Balok Beton Bertulang



Gambar 3.5. Diagram alir desain balok beton bertulangan tunggal

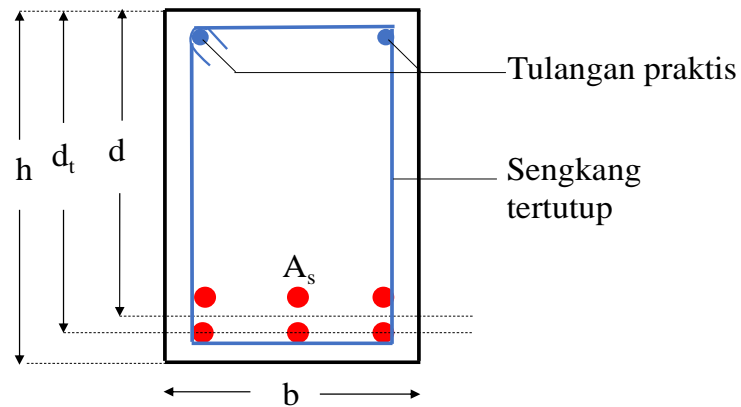
Pengecekan lebar kolom perlu dilakukan sesuai Pasal 18.8.2.3 yaitu sisi kolom $\geq 20 D$ untuk mendukung kolom kuat balok lemah.

3.5. CONTOH SOAL

3.5.1. Contoh Soal 1

ANALISIS BALOK

DIKETAHUI: Penampang balok seperti Gambar 3.6



Gambar 3.6 Penampang balok

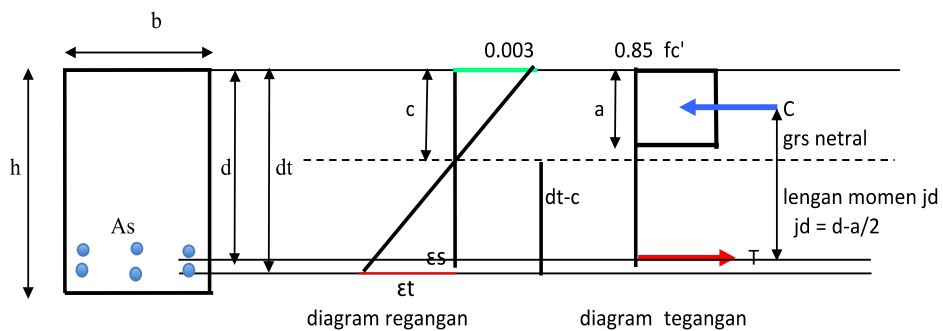
b	350 mm	f_c'	32 MPa
h	550 mm	f_y	420 MPa
Balok tidak langsung berhubungan dengan tanah			
Sesuai SNI 2019 Tabel 20.6.1.3.1 selimut 40 mm			

Sengkang	12 mm
D	14 mm
Jarak antar tulangan/spasi	25 mm
Tulangan praktis	2 D 12

SOAL: Beberapa momen yang mampu ditahan ?

PENYELESAIAN

Diagram tegangan dan regangan seperti Gambar 3.7



Gambar 3.7 Penampang balok, diagram regangan dan diagram tegangan

$$\frac{d_t}{0,003} = \frac{d_t - c}{c}$$

$$\varepsilon_t = 0,003 (d_t - c)/c$$

$$\frac{\varepsilon_s}{0,003} = \frac{d - c}{c}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 (d - c)/c$$

$$A_{1 \text{ tulangan}} = 154 \text{ mm}^2$$

$$n = 6$$

$$A_s = 924 \text{ mm}^2$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05/7(f_c' - 28)$$

$$\beta_1 = 0,821$$

$$a = \beta_1 \cdot c$$

$$d = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - D - 0,5 \text{ spasi}$$

$$d = 471,5 \text{ mm}$$

$$d_t = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - 0,5D = 491 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} (d - c)/c$$

$$\varepsilon_y = f_y/E_s = 0,0021$$

$$\varepsilon_s = 0,0255 > \varepsilon_y \rightarrow \text{leleh}$$

$$\varepsilon_t = 0,003 (d_t - c)/c$$

$$0,0267 > 0,005 \text{ terkendali tarik, keruntuhan daktil}$$

Faktor reduksi kekuatan ϕ

$$\phi = 0,65 + (\varepsilon_t - 0,002)(250/3)$$

$$\phi = 2,707$$

Dipakai ϕ max 0,9, jadi dipakai ϕ 0,9

Lengan momen

$$J_d = d - a/2$$

$$J_d = 451,1 \text{ mm}$$

$$M_n = C \cdot j_d = T \cdot j_d$$

$$M_n = 175.069.736 \text{ Nmm}$$

$$M_n = A_s \cdot f_y (d - a/2)$$

$$M_n = 175069736 \text{ Nmm}$$

$$M_u = \phi M_n = 0,9 \cdot 175069736 = 157.562.762,8 \text{ Nmm}$$

$$M_u = 157,6 \text{ KNm}$$

Keseimbangan

$$C = T$$

$$0,85 f_c' \cdot b \cdot a = A_s \cdot f_s$$

f_s belum tahu

agar “runtuh ulet” dibuat

baja leleh sehingga $f_s = f_y$

$$0,85 f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = A_s \cdot f_y$$

$$7820 c = 388080$$

$$c = 49,6 \text{ mm}$$

$$a = 40,76 \text{ mm}$$

$$A_{s,\min} = \frac{0,25\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \geq \frac{1,4 b_w d}{f_y}$$

$$\begin{array}{rcl} 555,668 & > & 550,083 \\ A_{s,\text{terpasang}} & > & A_{s,\min} \text{ (OK)} \end{array}$$

$$\rho_{\max \text{ longitudinal bawah}} = 924 / (350 \cdot 471,5) = 0,00569 < 0,025 \dots \text{ OK}$$

$$\text{dengan } \varepsilon_t = 0,0267$$

$$\rho_{\max \varepsilon_t} = 0,0053$$

$$\rho_{\max \varepsilon_{0,004}} = 0,0228$$

$$\rho_{\max \varepsilon_{0,005}} = 0,0199$$

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y}$$

$$\rho_b = 0,0313$$

$$\rho_{\text{terpasang}} = 0,0056 < \rho_{\max \varepsilon_{0,005}}$$

$$\rho_{\text{terpasang}} = 0,0056 < \rho_{\max \varepsilon_{0,004}}$$

$$\rho_{\text{terpasang}} = 0,18 \rho_b < 0,75 \rho_b$$

$$\rho_{\text{longitudinal bawah}} = 0,00569 < 0,025$$

$$A_{s,\min} < A_{s,\text{terpasang}} < \rho_{\max \text{ longitudinal}}$$

3.5.2. Contoh Soal 2

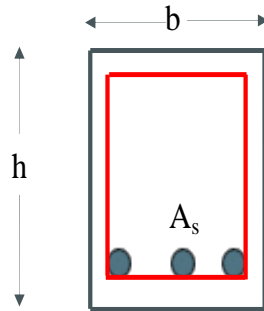
ANALISIS BALOK

DIKETAHUI:

Balok dengan penampang seperti Gambar 3.8, $b = 250\text{mm}$, $h = 550\text{mm}$, selimut beton 40mm , tulangan tarik 3D28, spasi antar tulangan 25mm , sengkang D12, $f_y 420 \text{ MPa}$, $f'_c 30\text{MPa}$, tulangan praktis 2D10.

SOAL:

- 1. Sebutkan jenis momen
- 2. Hitung Momen kapasitas penampang
- 3. Periksa memenuhi syarat atau tidak



Gambar 3.8. Penampang balok

PENYELESAIAN:

1. Momen positif

$$E_s = 200.000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = f_y/E_s = 0,0021$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05(f'_c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05(30 - 28)}{7} = 0,8357$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi efektif } d &= h - \text{selimut} - \text{sengkang} - 0,5D = 550 - 40 - 12 - 0,5 \cdot 28 \\ &= 484 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$A_{ef} = b \cdot d = 250 \cdot 484 = 121000 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 3 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 = 3 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 28^2 = 1848 \text{ mm}^2$$

$$T = A_s \cdot f_y = 1848 \cdot 420 = 776.160 \text{ N}$$

Keseimbangan

$$C = T$$

$$0,85 f'_c \cdot b \cdot a = 776.160$$

$$0,85 \cdot 30 \cdot 250 \cdot a = 776.160$$

$$a = 121,75 \text{ mm}$$

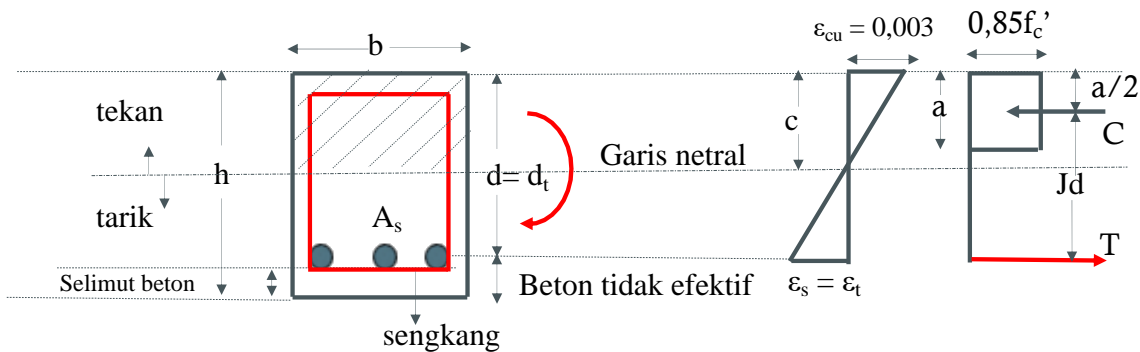
$$c = a/\beta_1 = 121,75/0,8357 = 145,68 \text{ mm}$$

Maka diagram regangan dan tegangan dapat digambarkan.

$$\varepsilon_t = \left(\frac{d-c}{c} \right) \varepsilon_{cu} = \left(\frac{484-145,68}{145,68} \right) = 0,00697 > \varepsilon_y \text{ tulangan tarik meleleh, dengan}$$

demikian tipe kehancuran balok
daktail--- OK

$\epsilon_t = 0,00697 > 0,005$ (Gambar 3.9), maka dari Gambar 2.7 faktor reduksi $\phi = 0,9$



Gambar 3.9. Penampang balok, diagram tegangan dan regangan pada penampang balok

2. Momen Kapasitas

$$\text{Lengan momen } jd = d - a/2 = 484 - 121,75/2 = 423,125 \text{ mm}$$

$$M_n = T \cdot jd = 776160 \cdot 423,125 = 328412472 \text{ Nmm} = 328,4 \text{ KNm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \cdot 328,4 = 295,56 \text{ KNm}$$

3. Pemeriksaan Persyaratan

$$A_s = 1848 \text{ mm}^2$$

$$A_{ef} = 121000 \text{ mm}^2$$

3.a. Tulangan minimum

Pada balok persegi $b_w = b$

$$A_{s \text{ min}} = 0,25 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d = 394,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \frac{1,4}{f_y} b_w d = 403,3 \text{ mm}^2$$

Dipilih yang lebih besar yaitu $A_{s \text{ min}} = 403,3 \text{ mm}^2$. Jadi $A_s > A_{s \text{ min}}$ --- keruntuhan duktail

3.b. Tulangan maximum

SNI Pasal 18.6.3.

$$\rho_{\text{max longitudinal bawah}} = \rho_{\text{max}} \leq 0,025$$

$$\text{Luas tulangan tarik} = A_s = 1848 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{\text{longitudinal}} = \frac{\text{Luas tulangan longitudinal}}{\text{Luas efektif beton}} = \frac{1848}{121000} = 0,0153 < 0,025$$

Keruntuhan daktail

Dengan demikian memenuhi syarat.

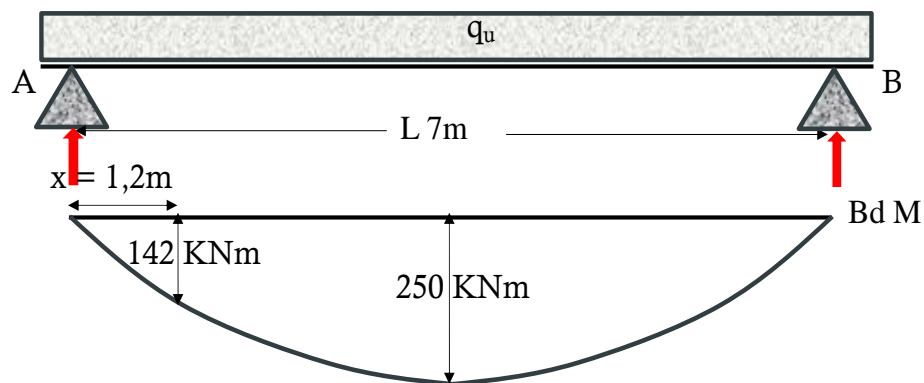
3.5.3. Contoh Soal 3

DESAIN BALOK BETON BERTULANG

DIKETAHUI : Momen 250 KNm, bentang 7m sendi-rol seperti Gambar 3.10

SOAL : rencanakan balok tersebut

PENYELESAIAN :



Gambar 3.10. Balok dengan tumpuan sederhana dan bidang Momen

$$\begin{aligned} M_{u \text{ max}} &= 250 \text{ KNm} \\ 1/8 q_u l^2 &= 250 \\ q_u &= 40,82 \text{ KN/m} \end{aligned}$$

Dipakai cara coba-coba
Properti balok diasumsikan sebagai berikut:

Percobaan 1:

Tumpuan sederhana: sendi-rol

Bila tidak menghitung lendutan, maka tinggi minimum balok dengan tumpuan sederhana (Pasal 9.3.1.1):

$$h_{\min} = L/16 = 7000/16 = 437,5\text{mm dibuat } 500\text{mm}$$
$$b = 310\text{mm}$$

Taksiran:

$$d = 0,85 \text{ sampai } 0,9 h$$
$$b = 0,25 \text{ sampai } 0,6 d$$

Selimut= 40mm, sengkang = 12 mm, spasi antar tulangan 25mm

$$f_c' = 28 \text{ MPa}, \beta_1 = 0,85$$

$$f_y = 420 \text{ MPa}, E_s = 200.000 \text{ MPa}, \epsilon_y = f_y/E_s = 0,0021$$

$$D = 20 \text{ mm}, A_{1 \text{ tul}} = 314, 29\text{mm}^2$$

Perhitungan:

$$\text{Spasi bersih untuk tulangan} = b - 2 \text{ selimut} - 2 \text{ sengkang} = 310 - 2 \cdot 40 - 2 \cdot 12 = 206 \text{ mm}$$

Tinggi efektif dihitung untuk 1 lapis dan 2 lapis

$$d_{1 \text{ lapis}} = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - \frac{1}{2} D = 438\text{mm}$$

Untuk 2 lapis, dianggap jumlah tulangan lapis 1 = lapis 2. Jadi titik berat di tengah

$$d_{2 \text{ lapis}} = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - D_{\text{lapis 1}} - 0,5 \text{ spasi} = 393\text{mm}$$

Dasar desain:

KERUNTUHAN DAKTAIL

- Tulangan minimum terpenuhi
- Tulangan maximum terpenuhi

Supaya keruntuhan daktail maka diambil faktor reduksi $\phi = 0,9$

$$\text{Momen yang dipakai sebagai dasar desain} = M_n = M_u/\phi = 280/0,9 = \mathbf{277,78 \text{ KNm}}$$

$$R_n \text{ 1 lapis} = M_n/(b d_{1\text{lapis}}^2) = 4,67 \text{ MPa}$$

$$R_n \text{ 2 lapis} = M_n/(b d_{2\text{lapis}}^2) = 5,80 \text{ MPa}$$

$$m = f_y/(0,85 f_c') = 17,65$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right)$$

$$\rho_{1\text{lapis}} = 0,035 > 0,025 \text{ yaitu } \rho_{\text{max longitudinal}} \text{ (Pasal 9.6.1.2)}$$

$$\rho_{2\text{lapis}} = 0,017 < 0,025 \text{OK}$$

Maka dengan properti tersebut hanya bisa dipasang 2 lapis.

Pemeriksaan kebutuhan tulangan

$$A_{s\ 2\ \text{lapis}} = \rho\ b\ d = 0,0171 \cdot 310 \cdot 393 = 2082,52\ \text{mm}^2$$

$$\text{Jumlah tulangan D 20} = 2082,52/314,29 = 6,6 \text{ buah, dibulatkan 7 buah}$$

$$\text{Kebutuhan } space = 7 \cdot 20 + (7-1) \cdot 25 = 290\text{mm}$$

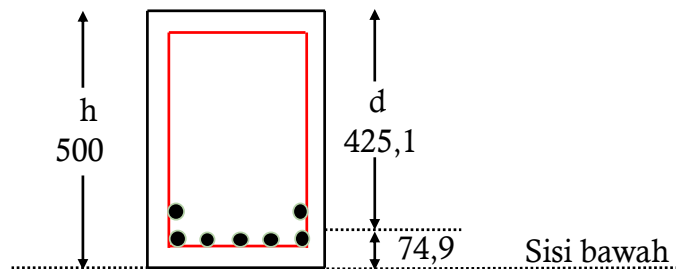
$$\text{Spasi bersih untuk tulangan yang tersedia} = 206\text{mm}$$

$$\text{Jumlah tulangan maximum 1 lapis 5 buah, } space = 5 \cdot 20 + (5-1) \cdot 25 = 200\ \text{mm} < 206\text{mm}$$

Jadi 7 buah tulangan benar dipasang dalam 2 lapis yaitu 5 tulangan di lapis terluar atau lapis 1 dan 2 tulangan di lapis kedua. Tinggi efektif d berubah karena jumlah tulangan tidak dipasang sama banyak pada lapis 1 dan 2.

Menghitung tinggi efektif tulangan terpasang (Gambar 3.10)

Berdasarkan Gambar 3.10, dihitung tinggi efektif dengan statis momen ke salah satu sisi. Pada contoh ini dipilih sisi bawah (Gambar 3.11).



Gambar 3.11. Statis momen ke sisi bawah

Posisi	Jumlah tulangan	Jarak ke sisi bawah	Statis momen ke sisi bawah
Lapis 1	5	62	310
Lapis 2	2	107	214
	7	y	524

Diperoleh persamaan:

$$7\ y = 524$$

$$y = 74,86\ \text{mm}$$

Tinggi efektif balok dengan momen terpasang:

$$d_{\text{tul terpasang}} = h - y = 500 - 74,9 = 425,1\ \text{mm}$$

Tulangan praktis 2 D 12

$$A_{\text{longitudinal bawah}} = 2200\ \text{mm}^2$$

$$\rho_{\text{longitudinal}} = A_{\text{longitudinal}} / (b \cdot d_{\text{tul terpasang}}) = 2200 / (300 \cdot 425,1) = 0,0172 < 0,025 \text{..OK}$$

$$\rho_{\text{min}} = 0,25 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} = 0,0031$$

$$\rho_{\text{min}} = \frac{1,4}{f_y} = 0,0033$$

$$\rho_{\text{terpasang}} = 0,0172 > \rho_{\text{min}}$$

Kesimpulan: $\rho_{\text{min}} < \rho_{\text{terpasang}} < \rho_{\text{max}}$

Pada Momen 1,2m dari tumpuan

$$M_{u \ 1,2m} = 0,5 q_u \cdot x \cdot (l-x)$$

$$M_{u \ 1,2m} = 0,5 \cdot 40,82 \cdot 1,2 \cdot (7-1,2) = 142,05 \text{ KNm}$$

$$M_n = M_u / \phi = 142,05 / 0,9$$

$$M_{n \ 1,2 \ m} = 157,83 \text{ KNm}$$

$$\text{Dipasang 1 lapis, } d_{1 \text{lapis}} = 438 \text{ mm}$$

$$R_n \ 1 \ \text{lapis} = 2,65 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right)$$

$$\rho = 0,00672 <$$

$$A_{s \ 1m} = \rho \cdot b \cdot d = 0,00672 \cdot 300 \cdot 436 = 912,06 \text{ mm}^2$$

Jumlah tulangan D20 = $1523,4 / 314,29 = 2,9$ buah \rightarrow 3 buah jumlah maximum tulangan dalam 1 lapis

Jadi terjadi pengurangan dari 7 buah tulangan pada tengah bentang menjadi 3 buah tulangan sejarak 1,2 m dari tumpuan.

PANJANG PENYALURAN TARIK

Dengan kait

Pasal 25.4.3.1:

$$a. \left[\frac{0,24 f_y \psi_e \psi_c \psi_r}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b = \left[\frac{0,24 \cdot 420 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{1 \sqrt{28}} \right] 19 = 380,99 \text{ mm}$$

Tulangan tanpa epoksi $\psi_e = 1$

Pasal 25.4.3.2 mengizinkan:

Selimit: $\psi_c = 1$, tulangan pengekang $\psi_r = 1$

b. $8d_b = 8.20 = 160\text{mm}$

c. 150mm

Pasal 18.8.5.1: ada tambahan

$$l_d = \frac{f_y d_b}{5,4 \lambda \sqrt{f'_c}} = 294\text{mm}$$

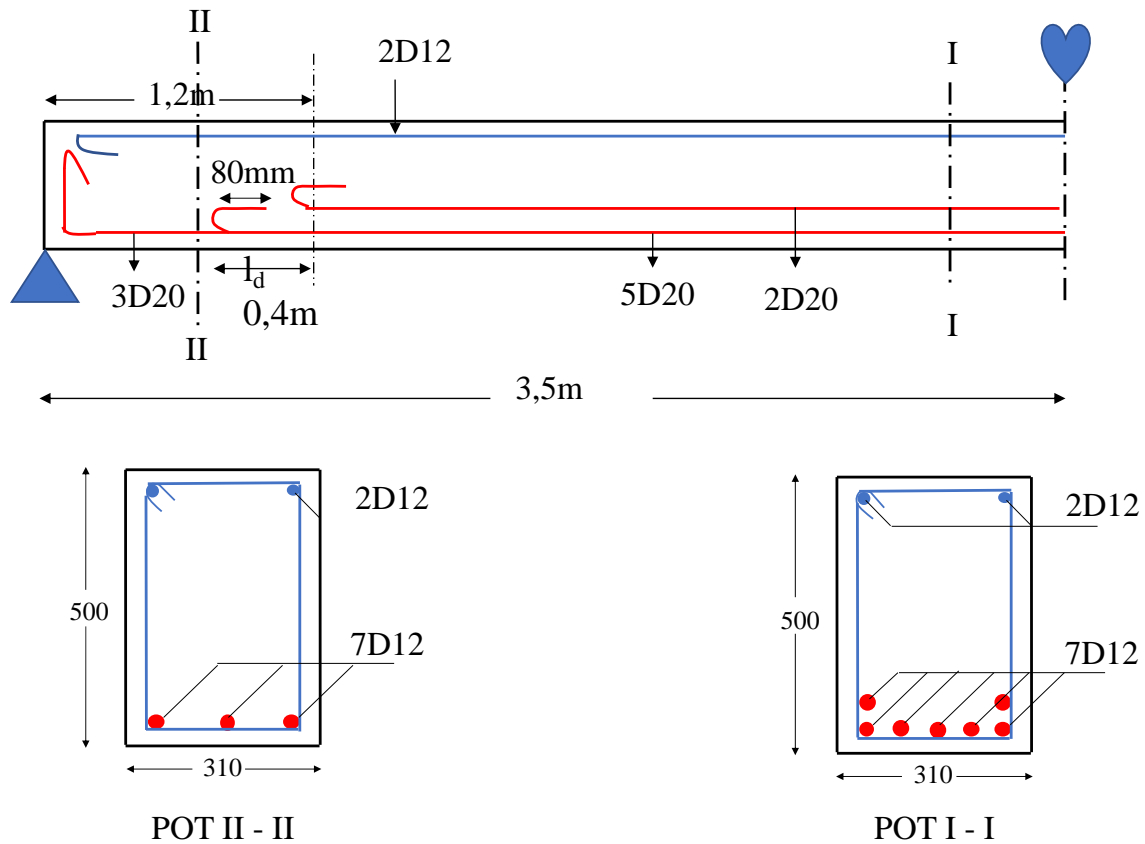
Jadi panjang penyaluran > 381mm dibuat 400mm

Bila memakai kait 180° (Tabel 25.3.1 atau Tabel 2.10):

$$l_{ext} = 4 d_b = 4.20 = 80 \text{ mm}$$

dan 65mm

Jadi dipilih 80mm

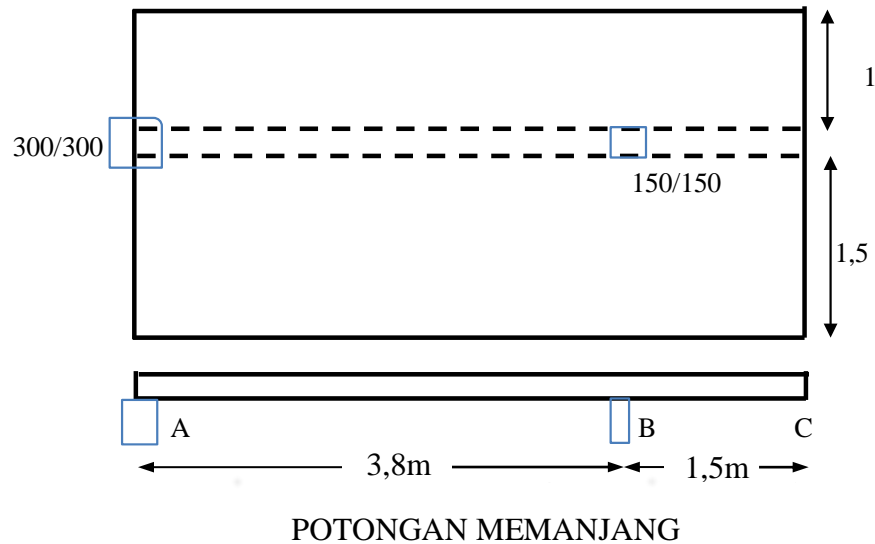


Gambar 3.12. Penulangan balok

3.5.5. Contoh Soal 4

DESAIN BALOK BETON BERTULANG

DIKETAHUI : Balok yang memikul pelat seperti Gambar 3.13.



Gambar 3.13. Balok dengan pelat sayap sebagai beban

Balok A-B-C menahan pasangan bata di atasnya setinggi 3,5 m, balok untuk atap rumah tinggal, lokasi dipantai. Tebal pelat 120 mm.

Tulangan balok D16, $f_c' = 50$ MPa, $f_y = 410$ MPa

Berat jenis beton 24 KN/m³

Beban pasangan bata 25 KN/m²

Beban hidup (parkir) 8 KN/m²

Beban hidup manusia 3 KN/m²

SOAL : Hitung dan gambar tulangan balok A-B-C

PENYELESAIAN:

1. Menaksir ukuran balok

Agar tidak memperhitungkan lendutan maka dipakai SNI 2019 Tabel 9.3.1.1

Karena di B terdapat Momen negatif, maka akan mengurangi lendutan dibentang A-B, sehingga dipilih tinggi minimum $h = L/18.5$ (satu bentang menerus).

$h = 3800/18,5 = 205,4$ mm; karena $f_y \neq 420$ MPa, maka sesuai SNI 2019 Tabel 9.3.1.1, tinggi balok harus dikalikan dengan faktor (Pasal 9.3.1.1.1). Faktor = $(0,4 + f_y/700) = 0,986$.

h dipilih 400 mm

$d = 0,85$ sampai $0,9 h = 340$ mm
 $b = 0,25$ sampai $0,6 d = 204$ mm dibuat 300 mm

2. Pembebanan

2.1. Beban Mati

Berat sendiri balok = b.h.BJ beton = $0,3 \cdot 0,4 \cdot 24 = 2,9$ KN/m'
 Berat pasangan bata = tinggi.berat = $3,5 \cdot 25 = 87,5$ KN/m'
 Berat sendiri pelat = lebar pelat yang ditanggung.tebal.BJ
 $(1+1,5) \cdot 0,12 \cdot 24 = \underline{7,2}$ KN/m'

Beban mati = DL = $97,6$ KN/m'

2.2. Beban hidup bekerja dipelat

Beban hidup yang diterima balok (LL)

LL_{orang} = lebar pelat yang ditanggung. beban hidup
 $= (1+1,5) \cdot 3$
 $LL_{\text{orang}} = 7,5$ KN/m'

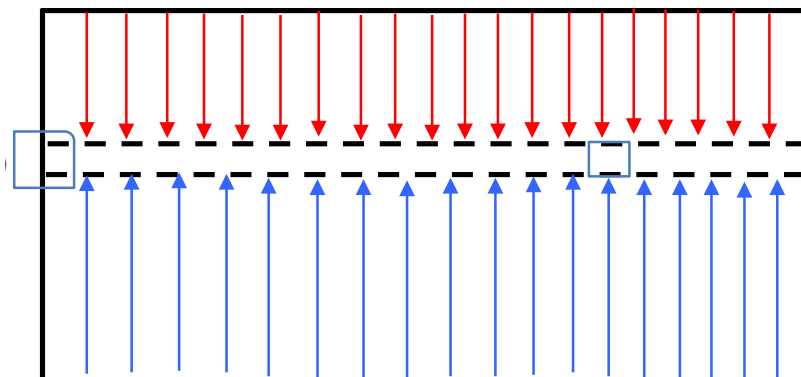
Beban air hujan, tinggi genangan 10 cm (L_r)

$LL_{\text{air hujan}}$ = tebal genangan. lebar pelat. BJ air
 $LL_{\text{air hujan}} = 0,1 \cdot (1+1,5) \cdot 1$
 $= 0,25$ KN/m'

Beban hidup pelat (R)

L_r = beban hidup pelat. lebar pelat
 $L_r = 0,05 (1+1,5)$
 $L_r = 0,125$ KN/m'

Semua beban di pelat akan di transfer ke balok, sesuai penempatan balok. Untuk soal di atas maka transfer beban seperti Gambar 3.14.



Gambar 3.14. Beban balok dari pelat

2.3. Beban perlu

Pasal 9.2.1 SNI 2013 menentukan :

$$q_u = 1,2 DL + 1,6 LL + 0,5Lr + 0,5 R$$

$$q_u = 1,2 \cdot 97,6 + 1,6 \cdot 7,5 + 0,5 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,125$$

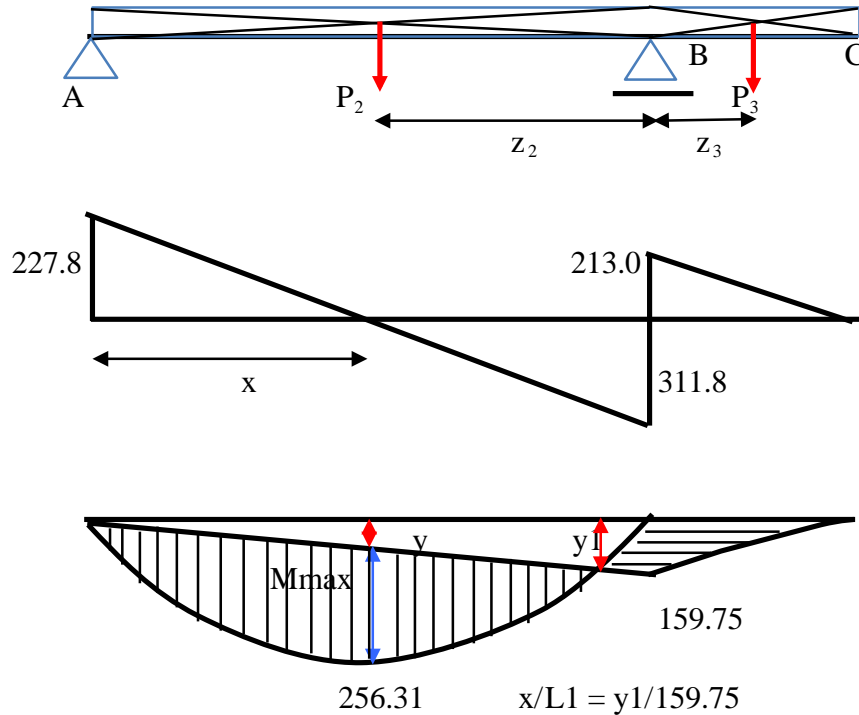
$$q_u = 129,283 \text{ KN/m'}$$

q_u dibuat 142 KN/m'

Selimit beton sesuai SNI 2019 Tabel 20.6.1.3.1: beton berhubungan dengan cuaca laut 50 mm.

3. Momen yang harus ditahan

Bidang Momen dan bidang Gaya Lintang seperti Gambar 3.15.



Gambar 3.15. Bidang Gaya Lintang dan Bidang Momen

ANALISIS STRUKTUR

$$P_1 = q (L_1 + L_2)$$

$$P_1 = 142 (3,8 + 1,5)$$

$$P_1 = 752,6 \text{ KN}$$

M_{\max}

$$P_2 = q \cdot L_1$$

$$P_2 = 142 \cdot 3,8$$

$$P_2 = 539,6 \text{ KN}$$

$$P_3 = q \cdot L_2$$

$$P_3 = 142 \cdot 1,5$$

$$P_3 = 213 \text{ KN}$$

$$\text{Jarak } P_1 \text{ ke A } L_1 - (L_1 + L_2)/2 \quad \text{Jarak } P_2 \text{ ke B } L_1/2 \quad \text{Jarak } P_3 \text{ ke B } L_2/2$$

$$z_1 = 2,56 \text{ m} \qquad z_2 = 1,9 \text{ m} \qquad z_3 = 0,75 \text{ m}$$

$$\Sigma M_A = 0 \qquad \Sigma M_B = 0$$

$$R_B \cdot L_1 - P_1 \cdot z_1 = 0 \qquad R_A \cdot L_1 - P_2 \cdot z_2 + P_3 \cdot z_3 = 0$$

$$R_B = 524,8 \text{ KN} \qquad R_A = 227,8 \text{ KN}$$

Kontrol $\Sigma K_v = 0$

$$R_A + R_B - P_1 = 0$$

$$\Sigma K_v = 0$$

Membuat bidang momen

Cara : super posisi

Bentang AB

$$M_x = 0,5 \cdot q_x \cdot (L_1 - x)$$

$$M_{\max} = 1/8 \cdot q \cdot l^2$$

$$M_{\max} = 256,31 \text{ KNm}$$

Letak M max :

Bentang BC

$$M_B = 1/2 \cdot q \cdot (L_2)^2$$

$$M_{B,\text{neg}} = 159,75 \text{ KNm}$$

$$x = (L_1 - x) \cdot R_A / (P_2 - R_B)$$

$$311,8x = 227,76 \cdot L_1 - 227,76 x$$

$$539,6x = 865,49$$

$$x = 1,6 \text{ m dari A}$$

$$M_x = 0,5 \cdot q \cdot x \cdot (L_1 - x)$$

$$M \text{ di } x \text{ meter} = 250,09 \text{ KNm}$$

$$y \text{ di } x \text{ meter} = \frac{x}{L_1} (M_B) = 67,429 \text{ KNm}$$

$$M_{\max} = M \text{ di } x \text{ meter} - y \text{ di } x \text{ meter}$$

$$M_{\max} = 182,658 \text{ KNm}$$

Letak titik potong

$$M_x = 0,5 q_x (L_1 - x)$$

$$M_x = 0,5 \cdot q \cdot x \cdot L_1 - 0,5 \cdot q \cdot x^2$$

$$M_x = 269,8x - 71 x^2$$

$$M_x = y_1 = x/L_1 \cdot M_B = 42,039x$$

Persamaan:

$$71x^2 - 269,8x + 42,039 = 0$$

$$x^2 - 3,207895x = 0$$

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = 3,208 \text{ m dari A}$$

$$M_x = 134,858 \text{ KNm}$$

$$M_u^+ \text{ ekstrim} = 182,658 \text{ KNm}$$

$$\text{Dianggap } \phi = 0,9$$

$$M_n^+ \text{ ekstrim} = 202,953 \text{ KNm}$$

$$M_u^- \text{ ekstrim} = 159,75 \text{ KNm}$$

$$M_u^- \text{ ekstrim} = 177,5 \text{ KNm}$$

4. Menghitung tulangan

Dianggap tulangan 1 lapis maka $d = d_t$

Dipakai batas daktil, jadi $\epsilon_t = 0,004$

$$\beta_1 = 0,85 \text{ untuk } f_c' \leq 28 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05(f_c' - 28)/7$$

$$\beta_1 = 0,693$$

$$\rho_{\max 0,005} = 0,85 \cdot \beta_1 (f_c'/f_y) (\epsilon_{cu}/(\epsilon_{cu} + 0,005))$$

$$\rho_{\max 0,005} = 0,85 \cdot 0,693 (50/410) (0,003/(0,003 + 0,005))$$

$$\rho_{\max 0,005} = 0,0269$$

Dengan berpedoman pada ρ_{\max} sebagai nilai ρ tertinggi dan berpedoman pada nilai M_n^+ ekstrim 202,953 KNm dan M_n^- ekstrim 177,5 KNm; dicoba berbagai nilai ρ seperti Tabel 3.2.

Perhitungan tulangan dan Momen yang dapat ditahan

Perencanaan tulangan akan dipakai 2 cara yaitu: memakai ρ coba-coba (Tabel 3.2.) dan cara R_n .

4.1. Perhitungan tulangan Momen positif memakai cara ρ coba-coba

Dicoba berbagai nilai ρ yang dengan nilai maximum ρ pada $\epsilon_t 0,005$ atau $\rho_{\max 0,005} = 0,0269$

Tabel 3.2. Momen dari berbagai nilai ρ

$\rho = A_s/(bd)$	$A_s = \rho \cdot b \cdot d$ mm ²	$T = A_s \cdot f_y$ N	$a = T/(0,85 f_c' \cdot b)$ mm	$j_d = d - a/2$ mm	$M = T \cdot j_d$ KNm
0,0269	3231,925	1325089,29	103,929	288,036	381,673
0,02	2400	984000	77,176	301,412	296,589
0,019	2280	934800	73,318	303,341	283,563
0,018	2160	885600	69,459	305,271	270,348
0,017	2040	836400	65,6	307,2	256,942
0,016	1920	787200	61,741	309,129	243,347
0,015	1800	738000	57,882	311,059	229,561
0,014	1680	688800	54,024	312,988	215,586
0,013	1560	639600	50,165	314,918	201,421
0,012	1440	590400	46,306	316,847	187,067
0,011	1320	541200	42,447	318,776	172,522

Dari Tabel 3.2., nilai ρ yang memenuhi M_n^+ ekstrim 202,953 KNm dan M_n^- ekstrim 177,5 KNm adalah $\rho = 0,014$ yang menghasilkan M 215,586 KNm.

Dari Tabel 3.2 di atas dibuat perencanaan awal untuk tulangan Momen positif

Dipakai $D = 20$

$$A_{1 \text{ tul}} = 314,29 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 1680 \text{ mm}^2 \text{ (Tabel 3.2)}$$

n = 5,345 buah

$\rho = 0,014$

Dari perencanaan awal, jumlah tulangan dibulatkan ke atas menjadi 6 buah

$$A_{s \min} = 0,25 (\sqrt{f_c'}) \cdot b_w \cdot d / f_y \geq 1,4 \cdot b_w \cdot d / f_y$$
$$407,449 > 322,68$$

Jadi $A_{s \min}$ dipakai 407,449 mm²

D	20	Senggang D	10 mm
$A_{1 \text{ tul}}$	314,286 mm ²	$\rho = A_s / (bd)$	
n	6 buah	jarak antar tulangan	25 mm
$A_s = n A_{1 \text{ tul}} =$	1885,71 mm ²	$> A_{s \min}$	} OK
		$< A_{s \max}$	

Penempatan tulangan

lebar bersih = b - 2 . Selimut - 2 . senggang
180 mm

Bila tulangan 2 baris

Pemeriksaan:

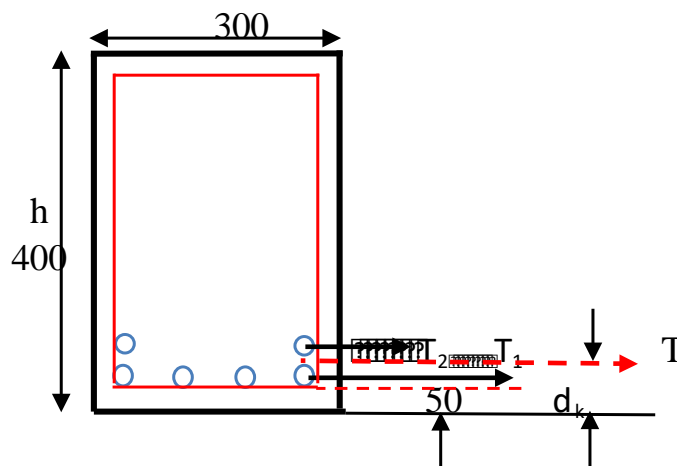
jumlah tulangan maximum dalam 1 baris pertama 4 buah dengan perhitungan sbb:

*lebar untuk 4 tulangan: 4 . diameter = 4 . 20 = 80 mm

*lebar spasi untuk jarak 4 tulangan ada 3: (4-1).25 = 75 mm

Jumlah spasi minimum yang dibutuhkan 4 tulangan 155 < lebar bersih (180mm)

Jadi lebar bersih > lebar minimum untuk 4 tulangan OK



Gambar 3.16. Penampang untuk statis momen untuk momen positif

Mencari letak resutan T dengan statis momen.

Statis momen ke sisi bawah = Gaya . Lengan momen

Lapis kedua, 2 buah tulangan (T_2):

Statis momen: $2 \cdot A_{s \text{ 1 tul}} \cdot f_y$ (selimut+senggang+D+jarak antar tul+1/2D) = 230 Nmm

Lapis pertama, 4 buah tulangan (T_1):

Statis momen: $4 \cdot A_s \cdot f_y$ (selimut+sengkang+1/2D) = 280 Nmm

Statis momen semua tulangan: $6 A_s \cdot f_y \cdot d_k$ = 510 Nmm

$d_k = 510/6 = 85 \text{ mm}$

$d = h - d_k = 400 - 85 = 315 \text{ mm}$

$d_t = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - 1/2D = 400 - 50 - 10 - 0,5 \cdot 20 = 330 \text{ mm}$

Kemudian dilakukan perhitungan lagi

$A_s = 1885,71 \text{ mm}^2$

$\rho = A_s/(bd) = 0,01995$

$T = A_s \cdot f_y = 773142,86 \text{ KN}$

Keseimbangan: $C = T$

$C = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a$

$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a$

$a = A_s \cdot f_y / (0,85 \cdot f_c' \cdot b) = 773142,86 / (0,85 \cdot 50 \cdot b)$

$a = 60,6 \text{ mm}$

$c = a/\beta_1 = 87,5 \text{ mm}$

Regangan

$\epsilon_y = f_y/E = 0,00205$

$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \cdot (d-c)/c$

$\epsilon_s = 0,0078 > \epsilon_y$ -- tulangan tarik leleh

$\epsilon_t = \epsilon_{cu} \cdot (d_t-c)/c$

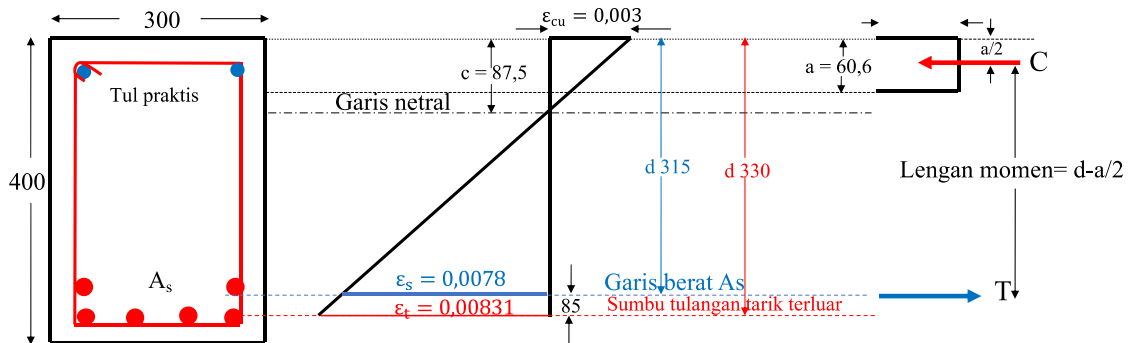
$\epsilon_t = 0,00831 > 0,005 \rightarrow$ terkendali tarik

$M_n = A_s \cdot f_y \cdot (d-a/2)$

$\phi = 0,9$

$M_n = 220098828,3 \text{ Nmm}$

$M_n = 220,10 \text{ KNm} > M_n^+ \text{ ekstrim} \rightarrow \text{OK}$



Gambar 3.17. Diagram regangan dan tegangan

4.2. Perhitungan tulangan Momen negatif memakai cara R_n

$$M_u = 177,5 \text{ KNm}$$

$$M_u = 177.500.000 \text{ Nmm}$$

$$M_n = M_u/\phi = M_u/0,9 = 197.222.222 \text{ Nmm}$$

$$R_n = M_n/(bd^2)$$

$$R_n = 6,63 \text{ MPa}$$

$$m = f_y/(0,85f_c') = 9,65$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right)$$

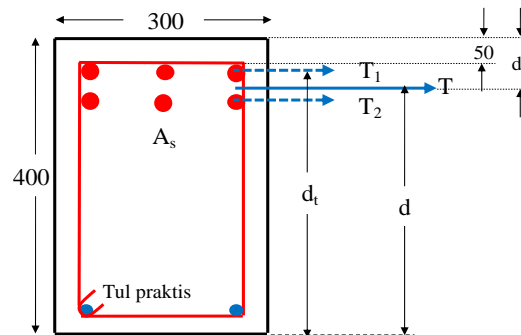
$$\rho = 0,0177 < \rho_{\max}$$

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d = 1669,3 \text{ mm}^2$$

$$n = A_s/A_s \text{ 1 tul}$$

$$n = 5,3 = 6 \text{ buah}$$

Dipasang 6 buah tulangan dengan kemungkinan pemasangan sbb:
 4 buah pada lapis pertama dan 2 buah pada lapis kedua (seperti perhitungan tulangan Momen positif) atau 3 buah pada lapis pertama dan 3 buah pada lapis kedua.



Gambar 3.18. Penampang untuk statis momen untuk momen negatif

Statis momen ke sisi atas

$$\text{Lapis kedua, 3 buah tulangan} = T_2 (\text{selimut} + \text{sengkang} + D + \text{jarak antar tul} + 1/2D)$$

$$= 2 \cdot A_s \cdot f_y (\text{selimut} + \text{sengkang} + D + \text{jarak antar tul} + 1/2D)$$

$$= 345 A_s \cdot f_y \text{ Nmm}$$

$$\text{Lapis pertama, 3 bh tulangan} = T_1 (\text{selimut} + \text{sengkang} + 1/2D)$$

$$= 3 A_s \cdot f_y (\text{selimut} + \text{sengkang} + 1/2D)$$

$$= 210 A_s f_y \text{ Nmm}$$

$$6 A_s \cdot f_y \cdot d_r = (345 + 210) A_s f_y = 555 A_s f_y$$

$$d_r = 555/6 = 92,5 \text{ mm}$$

$$d = h - d_r = 400 - 92,5 = 307,5 \text{ mm}$$

$$d_t = h - \text{selimut} - \text{sengkang} - 1/2D = 330 \text{ mm}$$

Nilai d mengalami perubahan, sehingga dilakukan perhitungan lagi dengan d terbaru

$$R_n = M_n / (bd^2) = 197.222.222 / (300 \cdot 307,5^2)$$

$$R_n = 6,95 \quad \text{MPa}$$

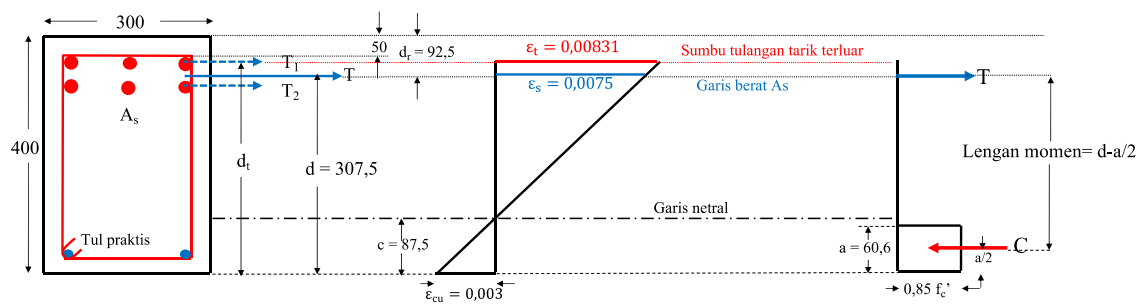
$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) = 0,0186$$

$$A_s = \rho b d = 0,0186 \cdot 300 \cdot 307,5 = 1718,8 \text{ mm}^2$$

Dipakai D 20

$$A_{1 \text{ tul}} = 314,29 \text{ mm}^2$$

$n = 1718,8 / 314,29 = 5,47 \approx 6$ buah \rightarrow jumlah sama, penempatan tulangan sama \rightarrow perhitungan tidak perlu diulang



Gambar 3.19. Regangan dan tegangan

$$\epsilon_t = 0,003 (d_t - 87,5) / 87,5$$

$$\epsilon_t = 0,0083 > 0,005. \rightarrow \text{terkendali tarik}$$

$$\epsilon_t = 0,0083 > 0,00205 \rightarrow \text{leleh}$$

$$\epsilon_s = (d - c) / c \cdot \epsilon_{cu}$$

$$\epsilon_s = (307,5 - 87,5) / 87,5 \cdot 0,003 = 0,0075 > \epsilon_y$$

$$\epsilon_s = 0,0075 > 0,00205 \rightarrow \text{leleh}$$

$$\text{Tulangan lentur} = 1885,71 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{\text{max tulangan longitudinal atas}} = 1885,71 / (300 \cdot 307,5) = 0,021 < 0,025 \text{ (Pasal 18.6.3.1)}$$

4.3. Panjang penyaluran tarik

Dengan kait

Pasal 25.4.3.1:

$$a. \left[\frac{0,24f_y\psi_e\psi_c\psi_r}{\lambda\sqrt{f'_c}} \right] d_b = \left[\frac{0,24 \cdot 410 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{1\sqrt{50}} \right] 20 = 278,3 \text{ mm}$$

Tulangan tanpa epoksi $\psi_e = 1$

Pasal 25.4.3.2 mengizinkan:

Selimit: $\psi_c = 1$, tulangan pengekang $\psi_r = 1$

$$b. 8d_b = 8 \cdot 20 = 160 \text{ mm}$$

$$c. 150 \text{ mm}$$

Pasal 18.8.5.1: ada tambahan

$$l_d = \frac{f_y d_b}{5,4 \lambda \sqrt{f'_c}} = 214,75 \text{ mm}$$

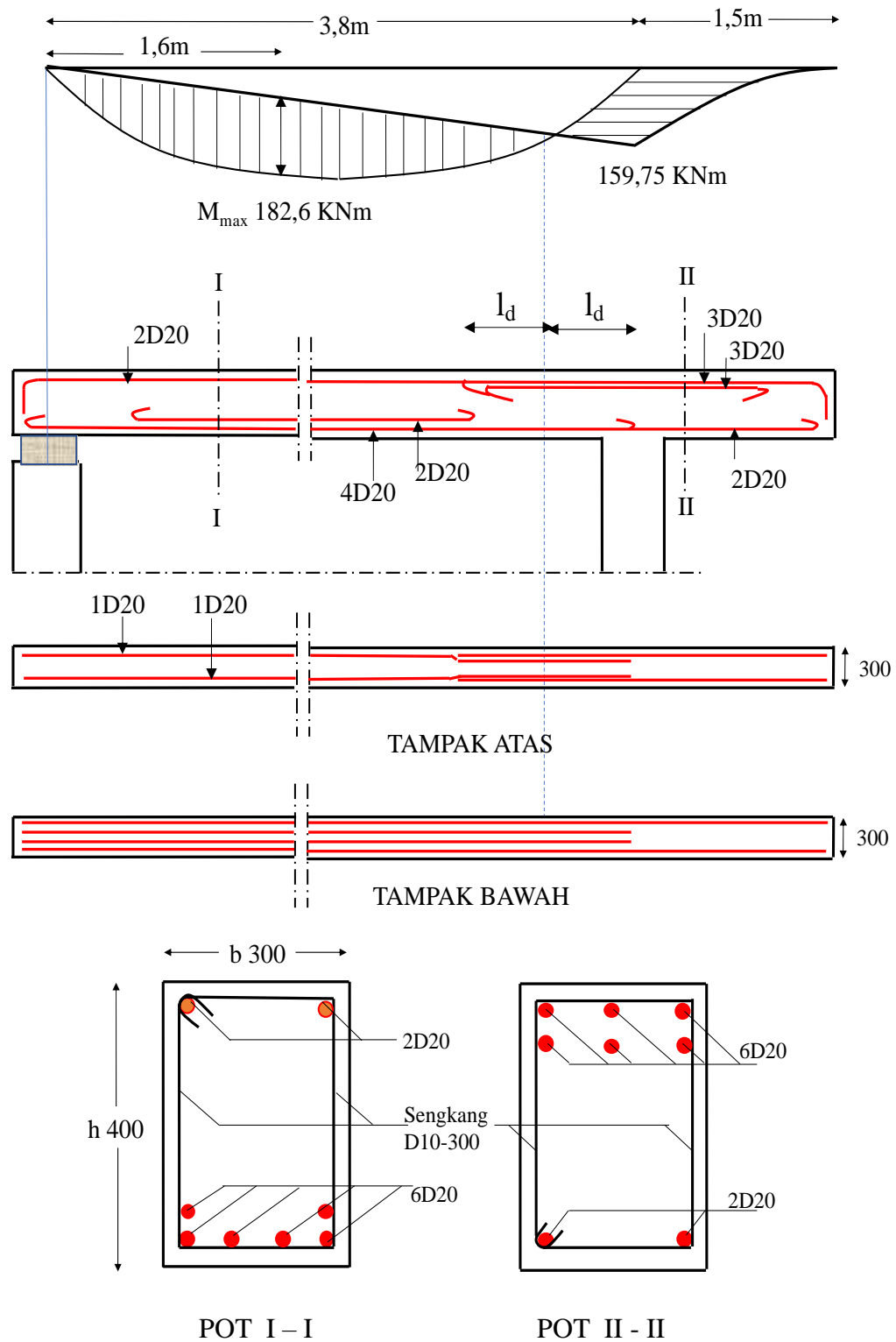
Jadi panjang penyaluran $> 278,3 \text{ mm}$ dibuat 400 mm

Bila memakai kait 180° (Tabel 25.3.1. atau Tabel 2.10):

$$l_{ext} = 4 d_b = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$$

dan 65 mm

Jadi dipilih 80 mm



Gambar 3.20. Penulangan balok

Tulangan Integritas

Untuk ujung yang tidak menerus:

- Memakai kait

Untuk momen negatif

- $> 1/6 M_{\text{negatif}}$ tumpuan. Tulangan $M_{\text{negatif}} 6D20$, jadi $1/6 M_{\text{negatif}}$ adalah $1D20$
- Terdapat 2 buah tulangan D20 di atas dan 2 buah D20 di bawah

Dengan demikian memenuhi persyaratan tulangan integritas.