

4 PERANCANGAN LENTUR PADA BALOK

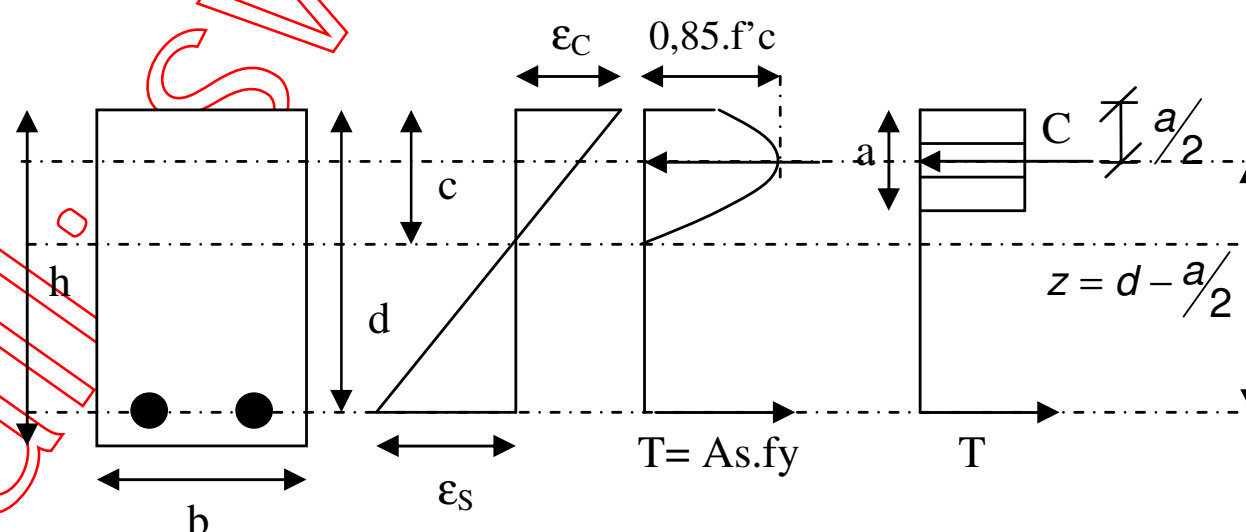
Balok merupakan elemen struktur yang menanggung beban layan dalam arah transversal yang menyebabkan terjadinya momen lentur dan gaya geser di sepanjang bentangnya. Pada bagian ini akan dibahas lebih lanjut tentang tata cara analisis kapasitas lentur dan perencanaan tulangan lentur pada elemen balok.

A. Asumsi-Asumsi dalam Perhitungan

Perhitungan kekuatan lentur penampang beton bertulang menggunakan asumsi-asumsi dasar sebagai berikut:

- 1) Bentuk penampang melintang tetap berupa bidang datar, baik sebelum maupun sesudah terjadi lenturan. Hal ini berarti berlakunya hukum Bernoulli dimana besarnya tegangan yang terjadi di setiap titik pada penampang balok sebanding dengan jarak titik tinjau terhadap garis netral, dengan anggapan adanya kesatuan antara beton dengan baja tulangan secara monolit dan tidak terjadi *slip*.
- 2) Diagram hubungan tegangan-regangan baja tulangan telah diketahui secara pasti melalui hasil uji tarik baja yang valid. Pada umumnya perilaku baja tulangan yang diperhitungkan hanya sampai saat dicapainya tegangan leleh, hal ini dikarenakan setelah fase leleh baja akan mengalami *strain hardening*, dimana peningkatan tegangan disertai dengan terjadinya deformasi yang sangat besar.
- 3) Perilaku material beton yang sesungguhnya saat menerima tegangan tekan dapat diketahui secara nyata baik dalam hal besaran maupun distribusinya, yang dapat digambarkan dalam bentuk diagram tegangan-regangan beton dengan mengacu hasil-hasil penelitian yang telah diakui secara luas.
- 4) Beton hanya efektif menahan tegangan tekan, sehingga kekuatan beton tidak diperhitungkan pada bagian penampang yang menerima tegangan tarik.
- 5) Regangan maksimum yang dapat dimanfaatkan pada serat tekan beton terjauh harus diambil sama dengan 0,003.

- 6) Tegangan pada tulangan yang nilainya lebih kecil daripada kuat leleh f_y harus diambil sebesar E_s dikalikan regangan baja. Untuk regangan yang nilainya lebih besar dari regangan leleh yang berhubungan dengan f_y , tegangan pada tulangan harus diambil sama dengan f_y .
- 7) Hubungan antara distribusi tegangan tekan beton dan regangan beton boleh diasumsikan berbentuk persegi, dan dapat dipenuhi oleh suatu distribusi tegangan beton persegi ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 4-1 dan didefinisikan sebagai berikut:
- Tegangan beton sebesar $0,85f'_c$ diasumsikan terdistribusi secara merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan suatu garis lurus yang sejajar dengan sumbu netral sejarak $a = \beta_1 c$ dari serat dengan regangan tekan maksimum.
 - Jarak c dari serat dengan regangan maksimum ke sumbu netral harus diukur dalam arah tegak lurus terhadap sumbu tersebut.
 - Faktor β_1 harus diambil sebesar 0,85 untuk beton dengan nilai kuat tekan karakteristik f'_c lebih kecil daripada atau sama dengan 30 MPa. Untuk beton dengan nilai kuat tekan di atas 30 MPa, β_1 harus direduksi sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan 7 MPa di atas 30 MPa, tetapi β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65.



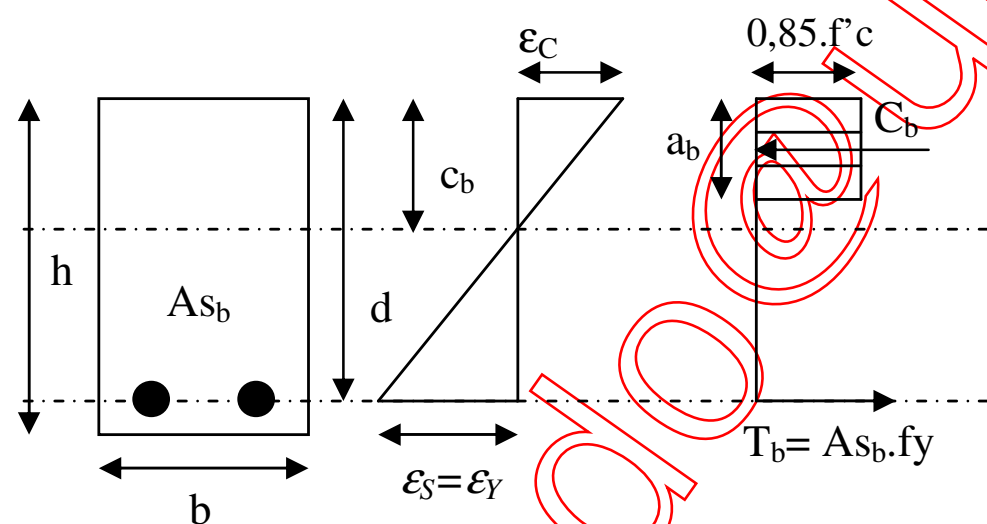
Gambar 4-1 Distribusi Tegangan dan Regangan Balok Persegi Bertulangan Tunggal

B. Balok Tulangan Tunggal

Suatu balok dinyatakan bertulangan tunggal jika pada penampang beton bertulang tersebut hanya diperhitungkan terpasang baja tulangan pada satu sisi saja, yaitu pada bagian serat yang menerima gaya tarik.

1. Keadaan regangan seimbang

Suatu keadaan yang sangat menentukan dalam analisis dan perencanaan beton bertulang dengan metode kekuatan dan kemampuan layan adalah keadaan regangan berimbang (balance).



Gambar 4-2 Tegangan dan Regangan Kondisi Berimbang

Dalam kondisi berimbang serat tekan ekstrim pada beton dan serat tarik pada baja tulangan secara bersamaan mencapai regangan maksimum (ϵ_{cu} pada beton dan ϵ_y pada baja tulangan) sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4-2. Untuk keadaan berimbang, secara geometris dapat diperoleh:

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} = \frac{0,003}{0,003 + \frac{fy}{Es}} = \frac{600}{600 + fy} \quad (4-1)$$

dimana $Es = 200.000MPa$ dan $\epsilon_{cu} = 0,003$

Gaya-gaya dalam penampang yang bekerja ke arah horisontal dapat dihitung menurut Persamaan (4-2) dan (4-3):

$$C_b = 0,85.f'c.a_b.b = 0,85.f'c.\beta_1.c_b.b \quad (4-2)$$

$$T_b = As_b.fy = \rho_b.b.d.fy \quad (4-3)$$

dimana

$$\rho_b = \frac{As_b}{b.d} \quad (4-4)$$

Dengan mempertimbangkan prinsip keseimbangan $C_b = T_b$ dan mensubstitusikan Persamaan (4-1) ke dalamnya, diperoleh:

$$\rho_b = \left(\frac{0,85.f'c}{fy} \right) \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + fy} \right) \quad (4-5)$$

Rasio penulangan yang dihitung menggunakan Persamaan (4-5) akan menghasilkan beton bertulang dalam keadaan seimbang (*balance*).

2. Balok bertulangan lemah (*Under-reinforced*)

Dalam kondisi penampang terpasang baja tulangan kurang dari rasio tulangan maksimum (0,75 kali rasio tulangan dalam keadaan seimbang), baja tulangan akan lebih dulu mencapai tegangan leleh fy sebelum beton mencapai kekuatan maksimumnya. Gaya tarik baja tulangan tetap sebesar $As.fy$ meskipun besaran beban terus bertambah. Bertambahnya beban yang bekerja menyebabkan terjadinya perpanjangan (deformasi) elastis yang semakin besar hingga mengakibatkan retak akibat lentur pada serat beton yang terkena tarik dan bertambahnya regangan secara non-linear pada beton yang menerima gaya tekan hingga berakibat terjadinya keruntuhan tarik.

Berdasarkan asumsi-asumsi yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, maka dapat dihitung:

$$C = 0,85.f'c.a.b \quad (4-6)$$

$$T = As.fy \quad (4-7)$$

dimana:

C = gaya tekan pada beton, dihitung sebagai volume blok

tekan ekuivalen pada atau dekat keadaan batas; yaitu baja tulangan tarik telah mengalami leleh

T = gaya tarik pada baja tulangan

Dengan memperhitungkan prinsip keseimbangan gaya dalam arah horisontal,

$C=T$, maka:

$$0,85.f'c.a.b = As.fy \quad (4-8)$$

sehingga:

$$a = \frac{As \cdot fy}{0,85 \cdot f'c \cdot b} \quad (4-9)$$

Tahanan momen penampang atau kekuatan nominal (Mn) dapat dihitung dengan:

$$Mn = As \cdot fy \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (4-10)$$

Untuk menjamin daktilitas beton bertulang yang menerima momen lentur sekaligus memperhitungkan terjadinya tegangan-tegangan yang diakibatkan susut, rangkai dan pengaruh suhu, maka SNI 03-2847-2002 mensyaratkan penggunaan tulangan tarik dengan rasio penulangan minimal;

$$\rho_{\min} = \frac{\sqrt{f'c}}{4 \cdot fy} \quad (4-11)$$

dan tidak boleh lebih kecil dari:

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{fy} \quad (4-12)$$

3. Balok bertulangan kuat (*Over-reinforced*)

Dalam kondisi penampang terpasang luasan baja tulangan melebihi batas luasan tulangan maksimum (0,75 kali luas tulangan dalam kondisi seimbang), akan berakibat beton mencapai regangan maksimum (0,003) lebih dahulu sementara baja tulangan belum mencapai tegangan leleh ($fs < fy$), sehingga dengan analisis geometri pada diagram regangan dapat diperoleh:

$$\frac{\epsilon_s}{0,003} = \frac{d-c}{c} \quad \therefore \epsilon_s = 0,003 \frac{d-c}{c} \quad (4-13)$$

sehingga tegangan pada baja tulangan tarik dapat dihitung:

$$fs = \epsilon_s \cdot E_s = 0,003 \frac{d-c}{c} E_s \quad (4-14)$$

dengan mensubstitusikan nilai $a = \beta_1 \cdot c$, maka:

$$fs = \epsilon_s \cdot E_s = 0,003 \frac{\beta_1 \cdot d - a}{a} E_s \quad (4-15)$$

Dengan menerapkan prinsip keseimbangan horisontal maka $C=T$;

$$0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b = As \cdot fs = 0,003 \frac{\beta_1 \cdot d - a}{a} E_s \cdot A_s \quad (4-16)$$

dimana $A_s = \rho \cdot b \cdot d$, sehingga:

$$\left(\frac{0,85 \cdot f'c}{0,003 \cdot E_s \cdot \rho} \right) \cdot a^2 + a \cdot d - \beta_1 \cdot d^2 = 0 \quad (4-17)$$

yang dapat diselesaikan dengan formula akar kuadrat abc , dan selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung kapasitas tampang:

$$Mn = 0,85.f'c.a.b.\left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (4-18)$$

Harus diingat bahwa dalam kondisi tulangan kuat (*over-reinforced*) keruntuhan diawali dengan rusaknya beton sehingga kegagalan struktur terjadi secara tiba-tiba. Dalam hal perencanaan beton bertulang maka kondisi *over-reinforced* harus dihindari dengan alasan keamanan, untuk balok bertulangan tunggal disyaratkan:

$$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} = 0,75.\rho_b \quad (4-19)$$

atau

$$As_{\min} \leq As \leq As_{\max} = 0,75.As_b \quad (4-20)$$

Untuk perencanaan ataupun pemeriksaan penampang, tentunya lebih disukai penggunaan formulasi yang sistematis dan sederhana dalam penyelesaiannya, yang dapat diperoleh berdasarkan:

Persamaan (4-9) yang dibentuk berdasarkan Persamaan (4-6) dan (4-7) juga dapat dinyatakan dalam:

$$a = \rho \left(\frac{fy}{0,85.f'c} \right) \cdot d \quad (4-21)$$

dimana; $\rho = \frac{As}{b.d}$, dengan memasukkan Persamaan (4-21) ke dalam Persamaan (4-10) dapat diperoleh:

$$Mn = \rho.b.d^2.fy.\left(1 - \frac{\rho.m}{2}\right) \quad (4-22)$$

dimana:

$$m = \frac{fy}{0,85.f'c} \quad (4-23)$$

selanjutnya didefinisikan koefisien lawan R_n yang dinyatakan dalam:

$$R_n = \frac{Mn}{b.d^2} = \rho.fy.\left(1 - \frac{\rho.m}{2}\right) = \rho.fy - \rho^2.\frac{m}{2}.fy \quad (4-24)$$

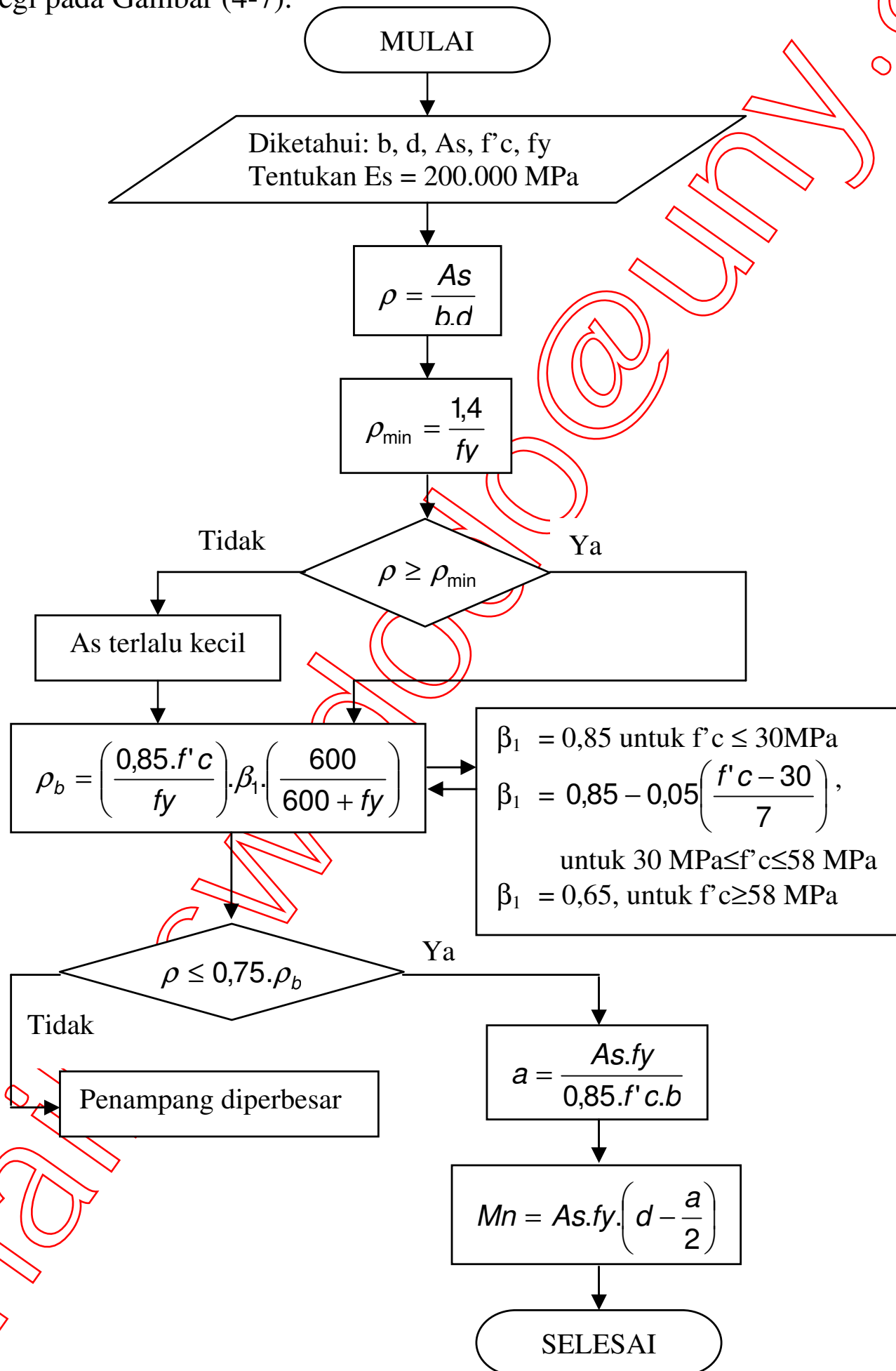
Dengan mencermati persamaan (4-24) diatas dapat disimpulkan bahwa besaran R_n hanya tergantung dari ρ , fy dan $f'c$. Jika besaran b dan d yang telah diketahui, maka

$$\rho \text{ dapat dihitung dengan rumus: } \rho^2.\frac{m}{2}.fy - \rho.fy + R_n = 0 \quad (4-26)$$

selanjutnya dengan formulasi akar kuadrat abc dapat diperoleh:

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) \quad (4.26)$$

Rangkaian formulasi diatas selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam analisis balok tulangan tunggal yang ditunjukkan pada Gambar (4-3) dan perencanaan balok persegi pada Gambar (4-7).



Gambar 4-3 Bagan Alir Analisis Balok Persegi Bertulangan Tunggal

C. Balok Tulangan Rangkap

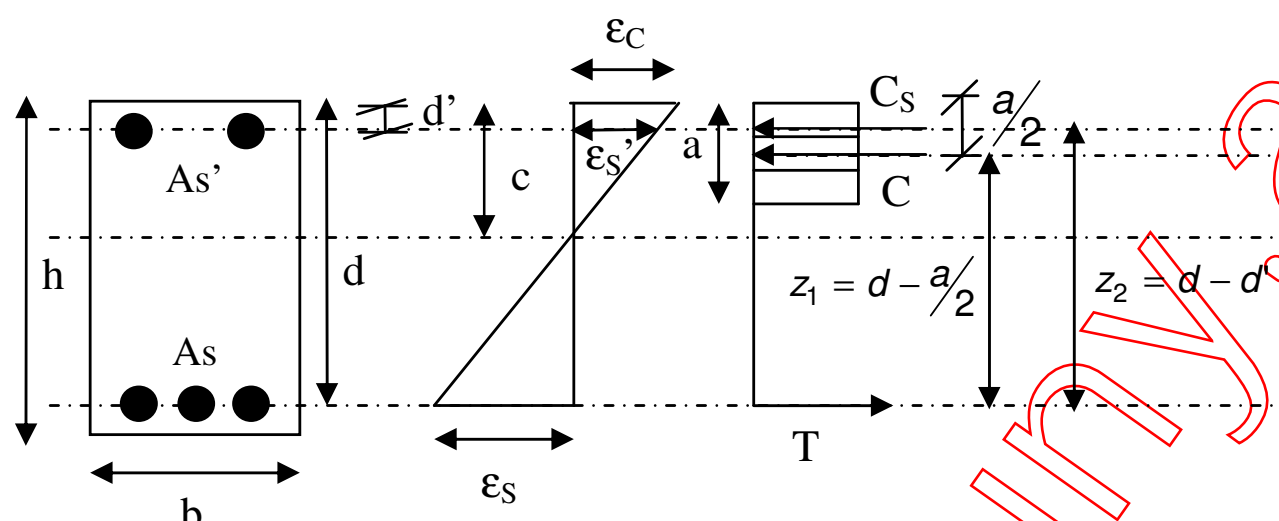
Balok bertulangan rangkap adalah balok beton bertulang yang menggunakan baja tulangan pada bagian penampang yang menerima gaya tarik maupun tekan. Ada beberapa alasan yang mendorong penggunaan tulangan rangkap. Alasan yang paling utama adalah aspek deformasi jangka panjang yang terjadi mengikuti fungsi waktu, seperti halnya rangkai (*creep*) maupun susut (*shrinkage*). Keberadaan tulangan tekan dalam kasus ini difungsikan untuk “membebaskan” beton dari tekanan yang berlangsung secara terus menerus. Kemungkinan bekerjanya gaya luar yang mengakibatkan timbulnya momen bolak-balik, misalnya saat bekerjanya gaya gempa juga merupakan alasan penting diterapkannya tulangan rangkap pada struktur beton bertulang.

Alasan yang lain lebih berkaitan dengan aspek arsitektural, dimana dituntut batasan ketinggian tertentu dalam penentuan dimensi balok, hal ini membawa konsekuensi dibutuhkannya tulangan pada bagian tekan untuk menambah kapasitas momen. Alasan ini meskipun seringkali diterapkan di lapangan, sebenarnya dapat mengakibatkan beberapa konsekuensi yang tidak menguntungkan berkaitan dengan kinerja struktural.

Pertama, besarnya penambahan kapasitas penampang dengan penambahan tulangan rangkap tidak sebanding dengan harga yang harus dibayar sesuai dengan jumlah tulangan tekan yang harus dipasang. Kedua, aspek kelayakan yang berkaitan dengan lendutan sangat berpotensi munculnya lendutan yang cukup besar, karena balok dengan ketinggian yang kecil cenderung mengalami lendutan yang besar. Ketiga, balok dengan ketinggian yang relatif lebih kecil cenderung akan membutuhkan tulangan geser yang lebih besar sehingga dimungkinkan adanya kesulitan dalam pemasangan tulangan geser.

Dalam analisis dan perencanaan balok tulangan rangkap diperlukan prosedur hitungan yang berbeda dengan balok bertulangan tunggal. Pada balok bertulangan rangkap, kekuatan nominal penampang beton bertulang dianggap sebagai akumulasi dua momen kopel internal yang bekerja akibat adanya komponen gaya horisontal pada baja tulangan tarik (T), gaya tekan pada blok tegangan tekan ekuivalen beton

(C), dan gaya tekan pada baja tulangan tekan (C_s) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-4.



Gambar 4-4 Distribusi Tegangan dan Regangan Balok Persegi Bertulangan Rangkap

Komponen pertama adalah momen kopel internal yang dibentuk oleh gaya tarik (T) pada bagian tulangan tarik seluas $A_{s_1} = (A_s - A_{s'})$ dan gaya tekan pada blok diagram tegangan tekan beton ekuivalen (C) dengan panjang lengan momen $z_1 = d - a/2$.

Komponen kedua adalah momen kopel internal yang dibentuk oleh gaya tekan pada bagian tulangan tekan seluas $A_{s'}$ dan gaya tarik pada baja tulangan tarik (T) seluas $A_{s_2} = A_{s'} = (A_s - A_{s_1})$, dengan panjang lengan momen $z_2 = d - d'$.

Kapasitas nominal penampang dapat dihitung sebagai jumlah antara komponen momen kopel pertama dan kedua, sebagaimana dinyatakan dalam formulasi berikut:

$$M_n = M_{n_1} + M_{n_2} \quad (4-27)$$

$$M_{n_1} = (A_s - A_{s'}) \cdot f_y \cdot (d - a/2) \quad (4-28)$$

dimana:

$$a = \frac{(A_s - A_{s'}) \cdot f_y}{(0,85 \cdot f'_c \cdot b)} \quad (4-29)$$

$$M_{n_2} = A_{s'} \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (4-30)$$

sehingga kapasitas nominal penampang juga dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$M_n = (A_s - A_{s'}) \cdot f_y \cdot (d - a/2) + A_{s'} \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (4-31)$$

atau

$$Mn = As_1 \cdot fy \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + As_2 \cdot fy \cdot (d - d') \quad (4-32)$$

Untuk menjamin keamanan struktur ditinjau dari aspek kekuatan maka dipersyaratkan kapasitas momen rencana ($M_R = \phi \cdot Mn$) harus lebih besar dari kombinasi terbesar momen luar yang bekerja (Mu), jadi:

$$Mu \leq \phi \cdot Mn \quad (4-33)$$

Persamaan (4-31) hanya dapat diberlakukan apabila tulangan tekan (As') telah meleleh, jika tegangan leleh belum dicapai maka balok harus dianggap sebagai balok bertulangan tunggal, dan akan lebih tepat jika tegangan aktual (fs') pada tulangan tekan dan menggunakan gaya aktual untuk keseimbangan momennya.

Syarat agar tulangan tekan (As') meleleh dapat diturunkan dengan bantuan segitiga sebangun pada Gambar 4-4;

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{d} \cdot 0,003 = \left(1 - \frac{d'}{c}\right) \cdot 0,003 \quad (4-34)$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{(As - As') \cdot fy}{\beta_1 \cdot (0,85 \cdot f' \cdot c \cdot b)} = \frac{(\rho - \rho') \cdot fy \cdot d}{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f' \cdot c} \quad (4-35)$$

hingga dapat diperoleh:

$$\varepsilon_s' = \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f' \cdot c \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot fy \cdot d}\right) \cdot 0,003 \quad (4-36)$$

Apabila baja tulangan tekan leleh maka dicapai suatu kondisi dimana

$$\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y = \frac{fy}{Es} = \frac{fy}{200.000}, \text{ sehingga:}$$

$$\left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f' \cdot c \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot fy \cdot d}\right) \cdot 0,003 \geq \frac{fy}{200.000} \quad (4-37)$$

atau

$$-\frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f' \cdot c \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot fy \cdot d} \geq \frac{fy - 600}{600} \quad (4-38)$$

atau

$$(\rho - \rho') \geq \left(\frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f' \cdot c \cdot d'}{fy \cdot d}\right) \cdot \left(\frac{600}{600 - fy}\right) \quad (4-39)$$

Jika tulangan tekan (A_s') belum leleh maka tegangan aktualnya dapat dihitung sebesar $f_s' = \varepsilon_s' \cdot E_s$, atau:

$$f_s' = \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f' c \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d} \right) \cdot 0,003 \times 200.000 \quad (4-40)$$

atau

$$f_s' = 600 \cdot \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f' c \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d} \right) \text{MPa} < f_y \quad (4-41)$$

Nilai f_s' ini dapat digunakan untuk pendekatan awal terhadap kontrol regangan untuk keadaan tulangan tekan belum leleh. Rasio penulangan dalam kondisi regangan berimbang dapat ditulis:

$$\rho_b = \bar{\rho}_b + \rho' \frac{f_s'}{f_y} \quad (4-42)$$

dimana $\rho_b = \left(\frac{0,85 \cdot f' c}{f_y} \right) \beta_1 \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)$ merupakan rasio penulangan berimbang pada balok tulangan tunggal.

Untuk menjamin perilaku duktail pada balok beton bertulang, rasio penulangan maksimum yang diijinkan untuk balok bertulangan rangkap ditetapkan sebesar:

$$\rho \leq 0,75 \cdot \bar{\rho}_b + \rho' \frac{f_s'}{f_y} \quad (4-43)$$

Dalam pembahasan yang diuraikan diatas, hilangnya sebagian luasan beton karena ditempati tulangan diabaikan karena tidak memberikan pengaruh yang signifikan dalam perencanaan praktis beton bertulang.

Perlu dicatat apabila tulangan tekan (A_s') belum leleh maka tinggi blok tegangan tekan ekuivalen harus dihitung menggunakan tegangan aktual pada tulangan tekan yang diperoleh dari regangan tulangan tekan (ε_s), sehingga;

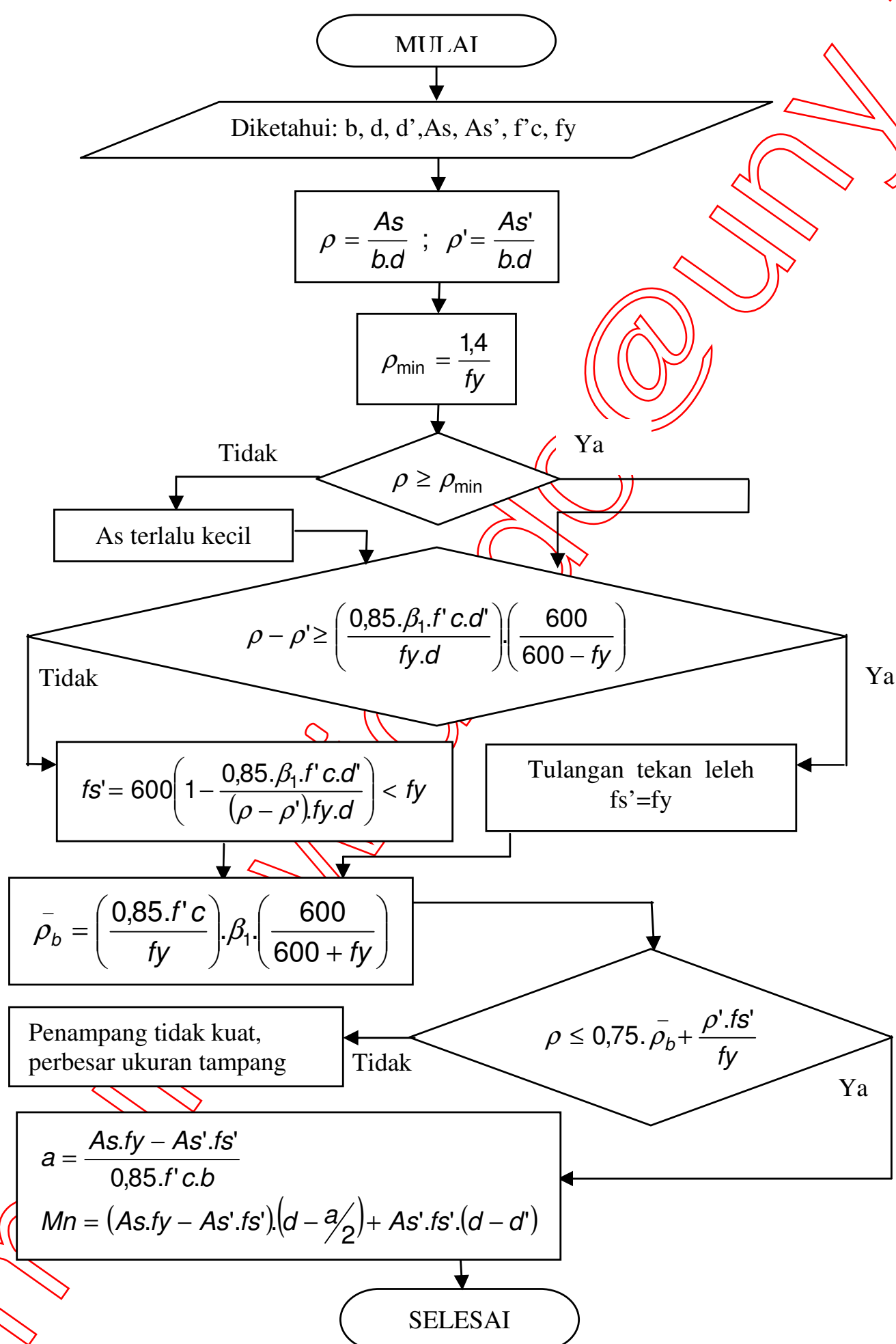
$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f' c \cdot b} \quad (4-44)$$

dengan demikian kapasitas momen nominal pada Persamaan (4-31) berubah menjadi:

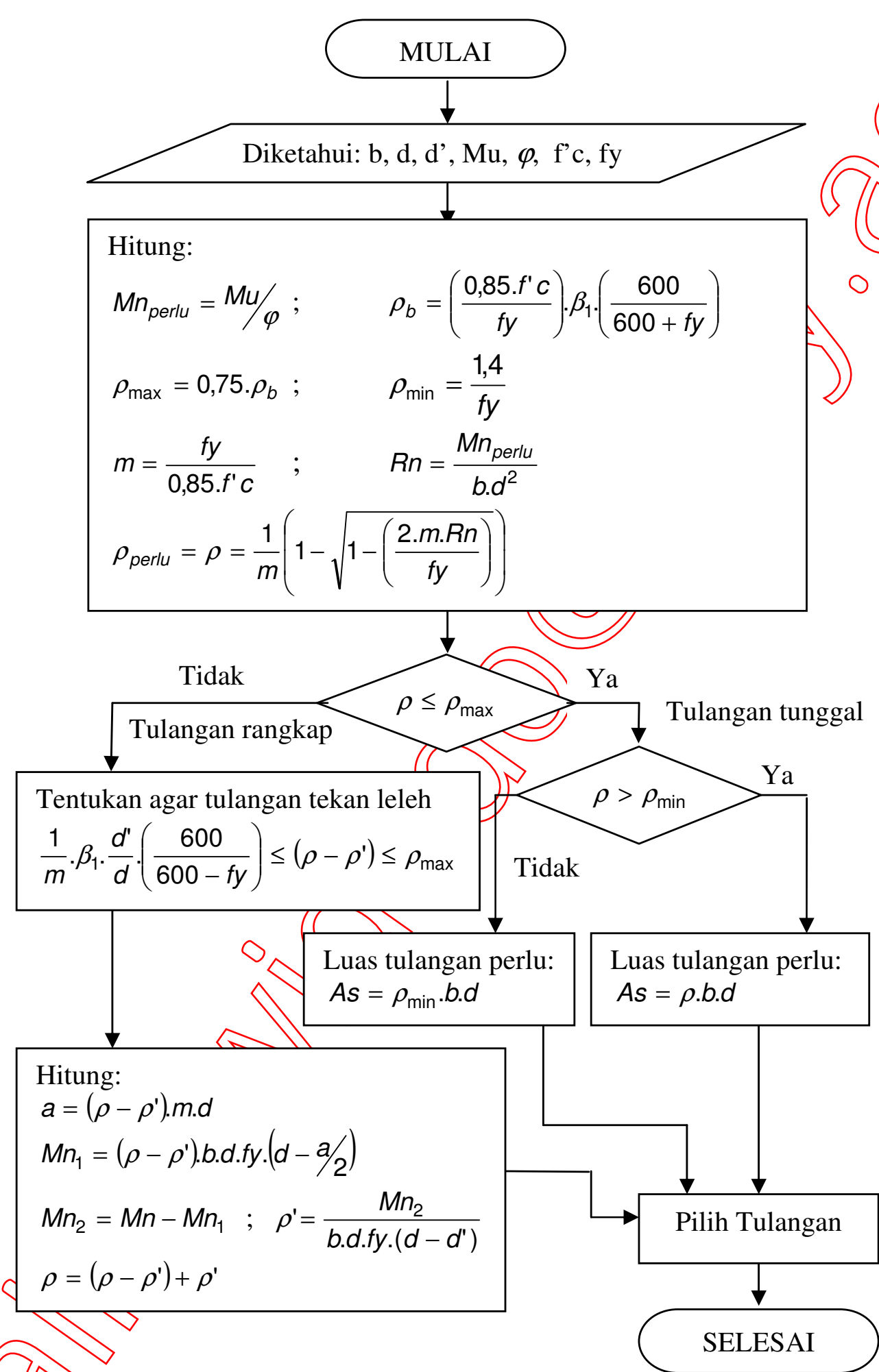
$$M_n = (A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_s') \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d') \quad (4-45)$$

Untuk mempermudah pemahaman tentang langkah-langkah dalam melakukan analisis kekuatan lentur balok beton bertulangan rangkap sesuai dengan

uraian diatas, disajikan bagan alir analisis balok bertulangan rangkap pada Gambar (4-5). Sedangkan langkah-langkah yang harus dilakukan dalam perencanaan balok persegi baik dengan tulangan tunggal maupun tulangan rangkap disajikan pada Gambar (4-6).



Gambar 4-5 Bagan Alir Analisis Balok Persegi Bertulangan Rangkap

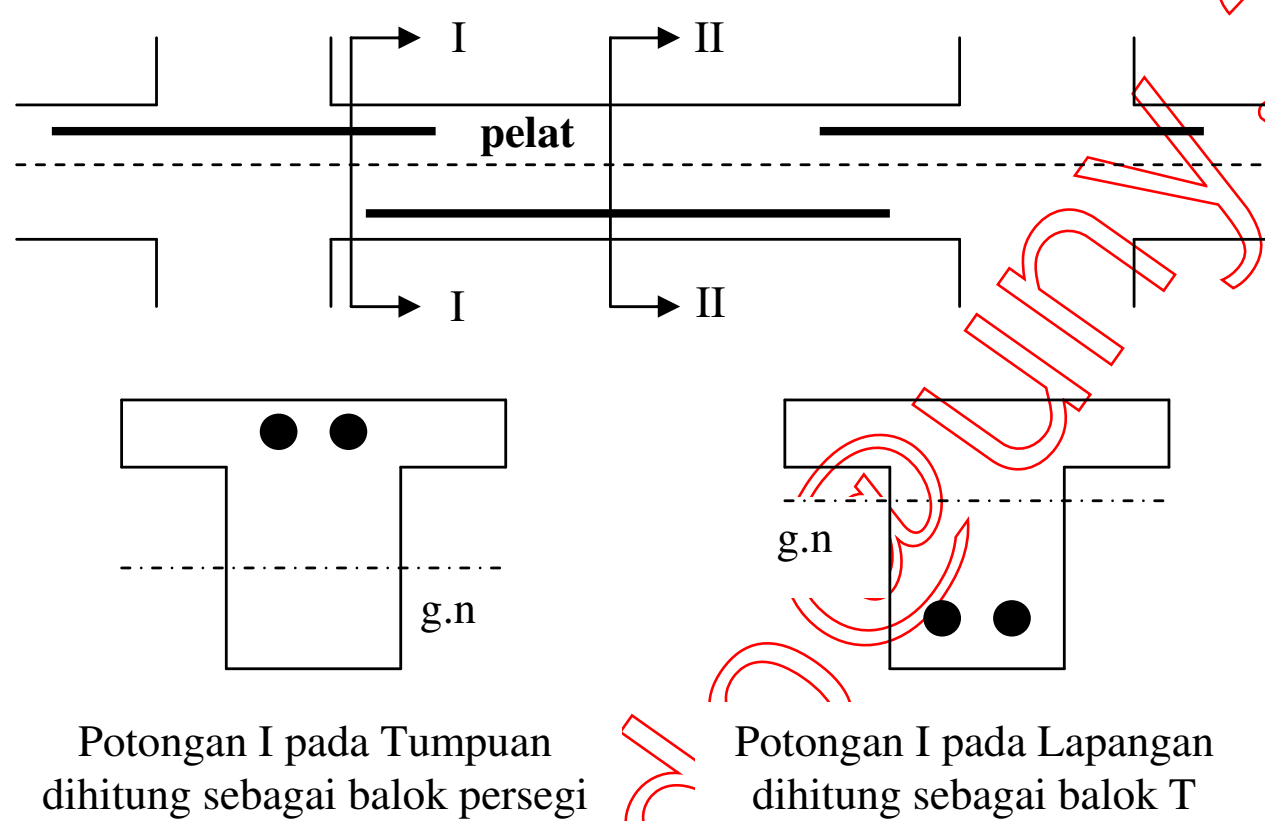


Gambar 4-6 Bagan Alir Perencanaan Balok Persegi

D. Analisis Penampang Balok dengan Flens (T dan L)

Penampang balok T dan L terutama digunakan pada daerah lapangan seperti diperlihatkan pada gambar 4-7. Hal ini dikarenakan pada penampang yang terletak di

daerah lapangan flens mengalami tekan, artinya flens mempunyai pengaruh terhadap kapasitas momen internal di daerah lapangan. Sebaliknya di daerah tumpuan, flens mengalami tarik, dengan demikian diabaikan dalam perhitungan kekuatan penampang.



Gambar 4-7 Penampang Balok Monolit pada Pelat

Lebar bagian pelat yang diperhitungkan dapat bekerjasama dengan balok (lebar flens) harus ditentukan berdasarkan ketentuan SNI 03-2847-2002. Lebar efektif flens diambil dari nilai terkecil formulasi berikut:

$$b = b_w + b_1 + b_2 \leq \frac{L}{4}$$

dengan

$$b_1 = 8.h_1 \leq \frac{L_n}{2} \quad \text{untuk balok T}$$

$$b_2 = 8.h_2 \leq \frac{L_n}{2}$$

(4-46)

$$b = b_w + b_1$$

$$b_1 = 6.h_f$$

$$b_1 = \frac{L}{12}$$

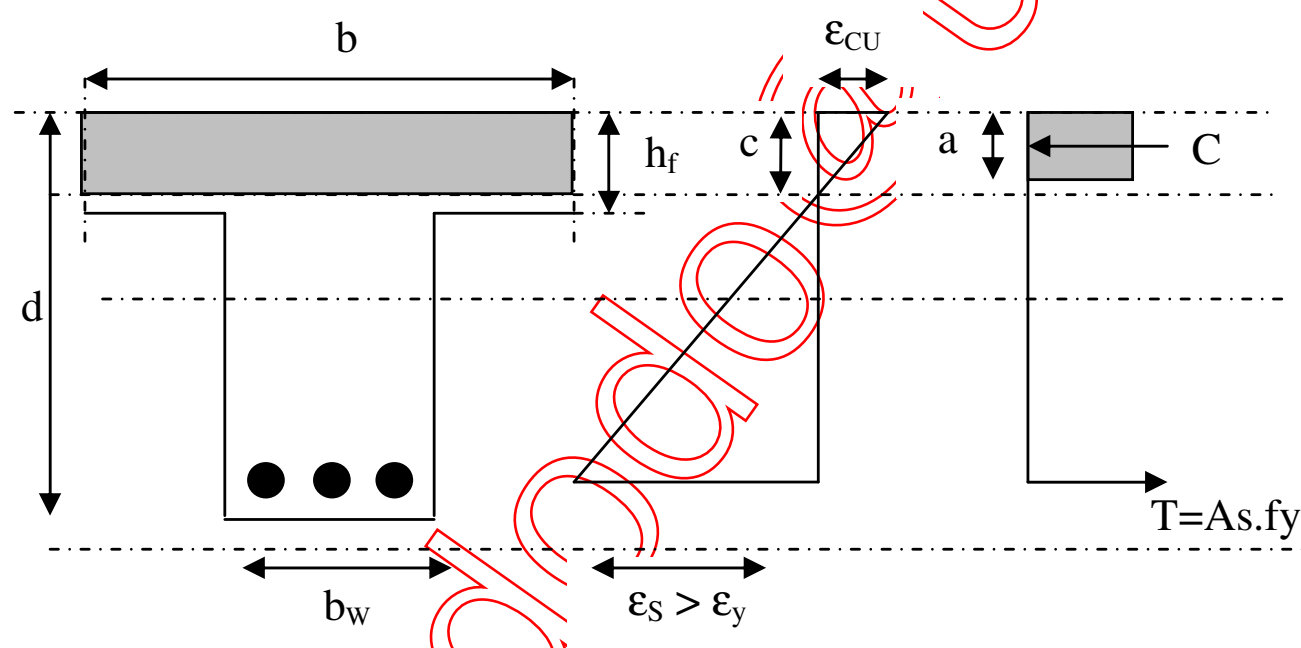
$$b_1 = \frac{L_n}{2}$$

untuk balok L

Balok T adalah balok pada bagian interior sedangkan balok L terletak pada bagian eksterior. Prinsip-prinsip dasar yang digunakan dalam perhitungan balok persegi juga berlaku untuk balok T maupun balok L. Perbedaan pokok terletak pada perhitungan gaya tekan blok beton (C) yang tergantung dari tinggi garis netral (c), sebagai berikut:

1. Balok T “Palsu”

Kasus ini dijumpai pada balok T atau L dimana garis netral berada di dalam flens ($c < h_f$), seperti ditunjukkan pada Gambar 4-8. Kasus ini juga berlaku jika $c > h_f$ dan $a < h_f$ sehingga parameter desain yang diuraikan juga masih dapat digunakan.



Gambar 4-8 Balok T dengan $c < h_f$

Agar kondisi $c < h_f$ dapat terjadi, maka luas tulangan tarik A_s harus memenuhi:

$$A_s \leq \frac{0,85 \cdot f' \cdot c \cdot b \cdot h_f}{f_y} \quad (4-47)$$

Dalam kondisi ini dijumpai keseimbangan gaya-gaya dalam:

$$C = T \quad (4-48)$$

$$C = 0,85 \cdot f' \cdot c \cdot a \cdot b \quad (4-49)$$

$$T = A_s \cdot f_y \quad (4-50)$$

sehingga diperoleh

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f' \cdot c \cdot b} \quad (4-51)$$

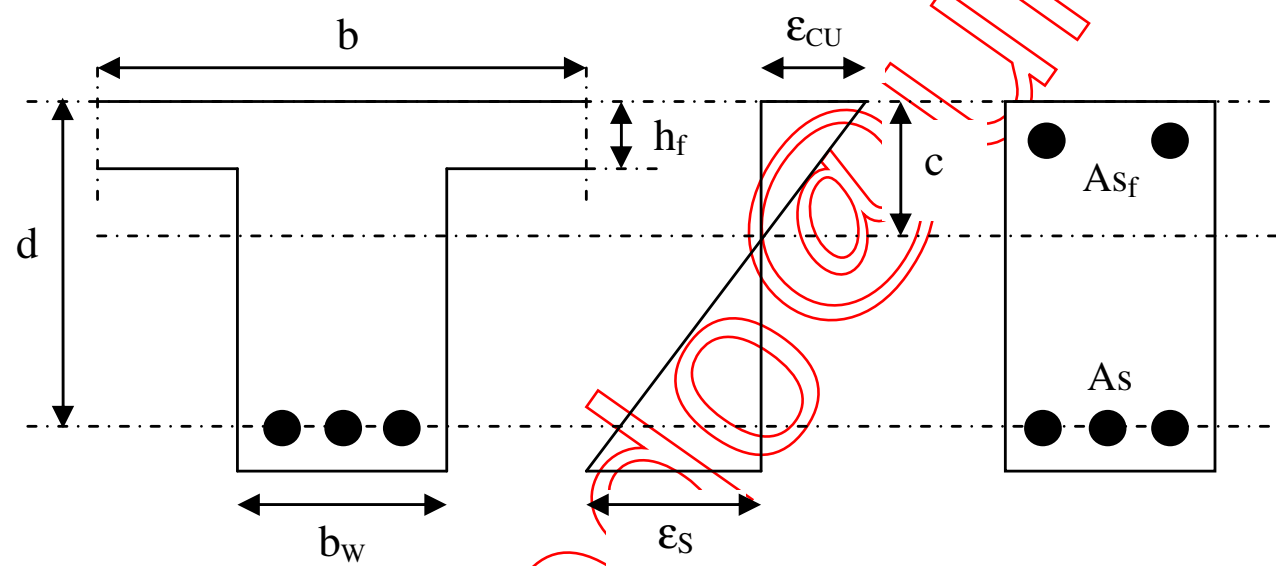
sedangkan kekuatan lentur nominal dapat dihitung dengan:

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (4-52)$$

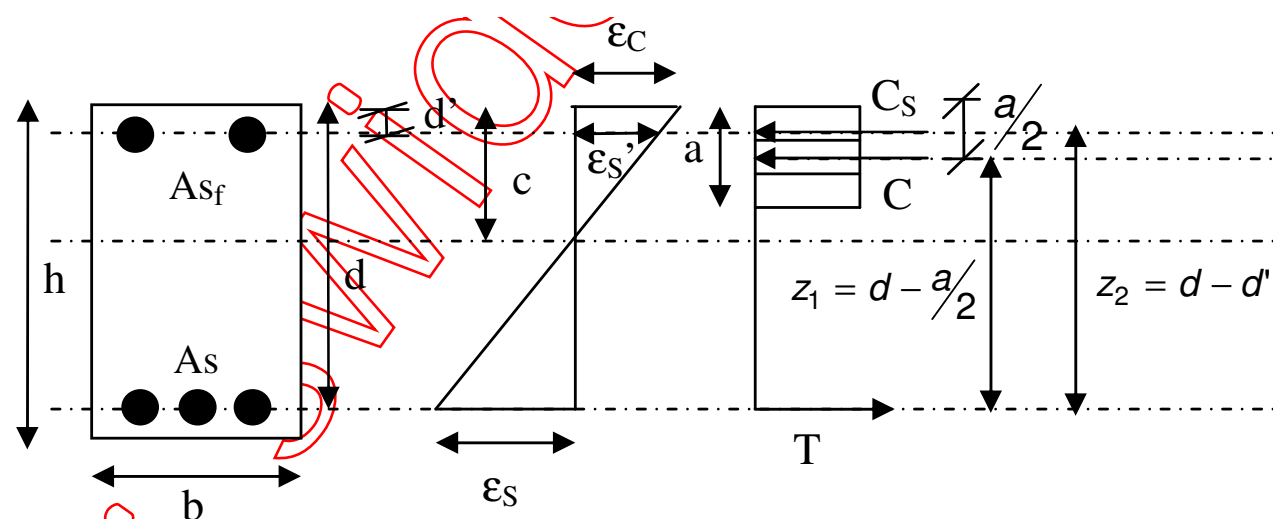
Jika dicermati persamaan diatas sama dengan persamaan-persamaan yang digunakan untuk analisis balok persegi, dengan lebar balok selebar flens (b) yang dihitung menurut Persamaan (4-46).

2. Balok T “Murni”

Kasus ini dijumpai pada balok T atau L dimana garis netral berada di dalam flens ($c > h_f$) dan tinggi blok tegangan segi-empat ekuivalen juga lebih besar dari tinggi flens ($a > h_f$), seperti ditunjukkan pada Gambar 4-9.



Gambar 4-9.a Analogi Balok T



Gambar 4-9.b Distribusi Tegangan dan Regangan Balok T

Untuk kasus ini dapat diberlakukan serupa dengan balok persegi bertulangan rangkap, dengan menggantikan bagian pelat dari “flens” menjadi suatu penulangan imajiner yang luasnya:

$$A_{s_f} = \frac{0,85 \cdot f'c \cdot (b - b_w) \cdot h_f}{f_y} \quad (4-53)$$

Untuk balok yang dipandang sebagai balok T “murni”, gaya tarik sebesar $A_s \cdot f_y$ dari tulangan harus lebih besar daripada kapasitas gaya luas flens total sebesar $0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot h_f$ sehingga:

$$a = \frac{A_s}{0,85 \cdot f'c \cdot b} > h_f \quad (4-54)$$

atau

$$h_f < 1,18 \cdot \omega \cdot d = a \quad (4-55)$$

dimana $\omega = \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot \frac{f_y}{f'c}$, dan jika digunakan blok tegangan parabola maka Persamaan

(4-55) dapat ditulis:

$$h_f < \frac{1,18 \cdot \omega \cdot d}{\beta_1} \quad (4-56)$$

Untuk menjamin perilaku duktail maka diberikan batasan penulangan:

$$\rho < 0,75 \cdot \rho_b \quad (4-57)$$

dimana:

$$\rho_b = \frac{b_w}{b} \left(\bar{\rho}_b - \rho_f \right) \quad (4-58)$$

$$\bar{\rho}_b = \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \frac{600}{600 + f_y} \quad (4-59)$$

$$\rho_f = 0,85 \cdot f'c \cdot (b - b_w) \cdot \frac{h_f}{f_y \cdot b_w \cdot d} \quad (4-60)$$

Sedangkan untuk persyaratan tulangan minimum:

$$\rho_w = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \geq \frac{1,4}{f_y} \quad (4-61)$$

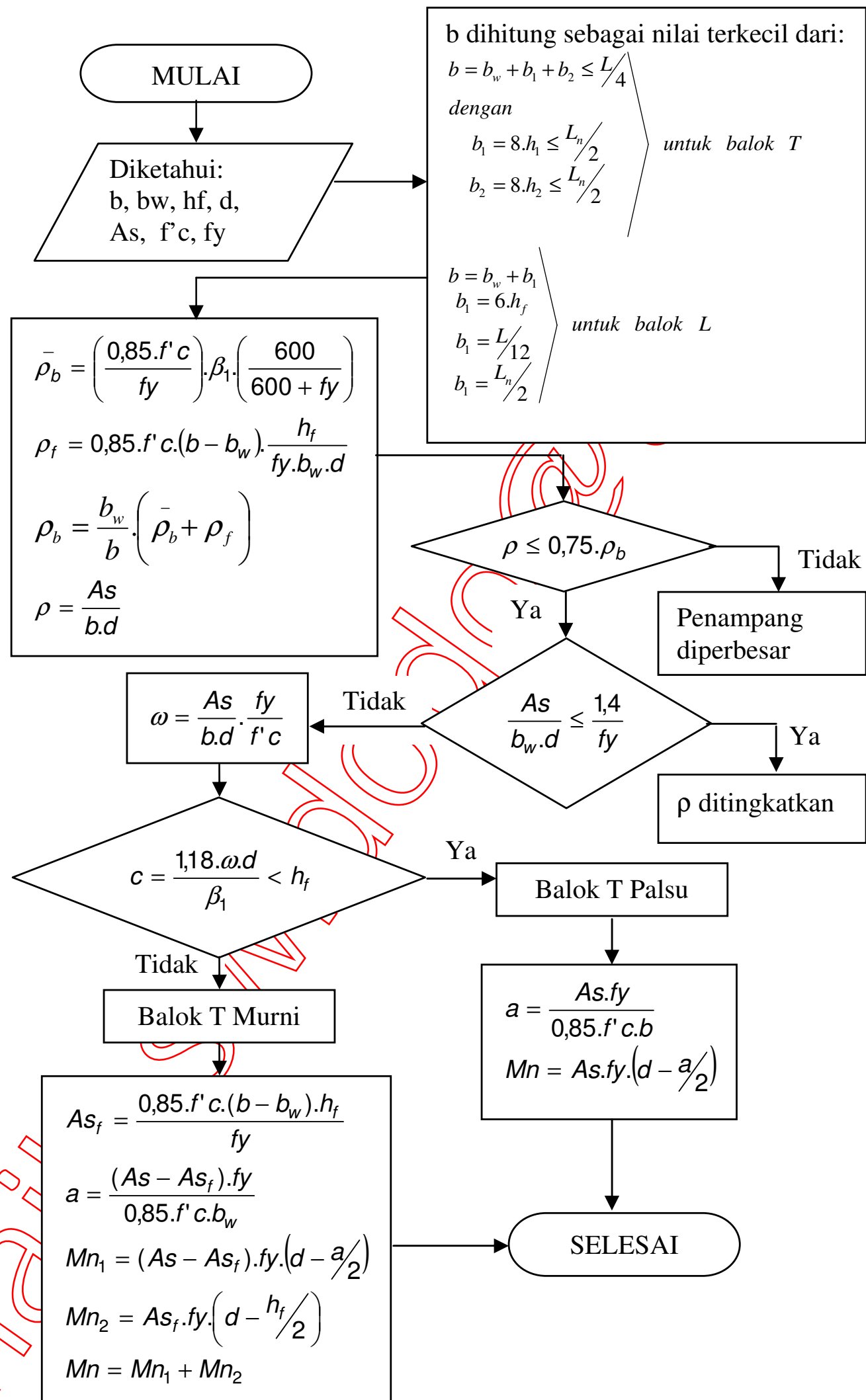
Seperti halnya balok bertulangan rangkap, tulangan tarik dipandang menjadi dua bagian yaitu A_{s1} yang harus mengimbangi gaya tekan segi-empat seluas $b_w \cdot a$ dan A_{s2} untuk mengimbangi luas tulangan imajiner A_{sf} , sehingga momen nominal dapat dihitung:

$$Mn = Mn_1 + Mn_2 \quad (4-62)$$

$$Mn_1 = A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = (A_s - A_{sf}) \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (4-63)$$

$$Mn_2 = A_{s2} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{h_f}{2} \right) = A_{sf} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{h_f}{2} \right) \quad (4-64)$$

Prosedur analisis balok T dan L selengkapnya disajikan pada gambar 4-10.

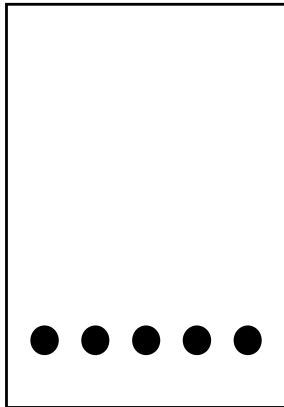


Gambar 4-10 Bagan Alir Analisis Balok T dan L

E. Contoh-Contoh Aplikasi

Contoh 4-1

Hitung kapasitas momen rencana (M_R) yang diijinkan bekerja pada balok beton bertulangan tunggal di bawah ini:



b	$= 400 \text{ mm}$
h	$= 800 \text{ mm}$
$f'c$	$= 25 \text{ MPa}$
f_y	$= 400 \text{ MPa}$
A_s	$= 5D25$
selimut beton	$= 40 \text{ mm}$
Diameter sengkang	$= 10 \text{ mm}$

Penyelesaian: (Analisis dilakukan sesuai bagan alir pada Gambar 4-3)

Hitung tinggi efektif balok (d)

$$d = 800 - 40 - 10 - \frac{25}{2} = 737,5 \text{ mm}$$

Kontrol rasio penulangan

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{5 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 25^2)}{400 \times 737,5} = \frac{2454,369}{295000} = 0,0083$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

$$\rho > \rho_{\min} \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)$$

$$\beta_1 = 0,85; \quad \text{karena } f'c = 25 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot 25}{400} \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0271$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0271 = 0,0203$$

$$\rho < \rho_{\max} \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

Hitung kapasitas momen nominal

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b} = \frac{2454,369 \cdot 400}{0,85 \cdot 25 \cdot 400} = 115,4997 \text{ mm}$$

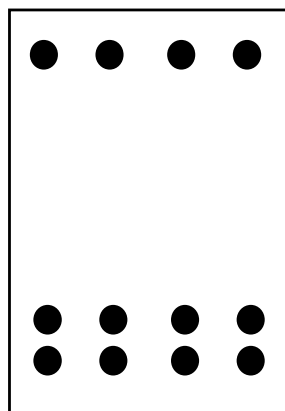
$$\begin{aligned}
 Mn &= As \cdot fy \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 2454,369 \cdot 400 \cdot \left(737,5 - \frac{115,4997}{2} \right) \text{ N.mm} \\
 &= 667343078,4 \text{ N.mm} \\
 &= 667,343 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

Momen rencana (M_R) yang boleh dikerjakan di atas balok sebesar:

$$\begin{aligned}
 M_R &= \phi \cdot Mn \\
 &= 0,80 \cdot 667,3431 \text{ kN.m} \\
 &= 533,8745 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

Contoh 4-2

Hitung kapasitas momen rencana (M_R) yang diijinkan bekerja pada balok beton bertulangan rangkap di bawah ini:



$$\begin{aligned}
 b &= 400 \text{ mm}; & h &= 800 \text{ mm} \\
 f'_c &= 25 \text{ MPa}; & f_y &= 400 \text{ MPa} \\
 A_s &= 8D29 \\
 A_s' &= 4D29 \\
 \text{selimut beton} & & &= 40 \text{ mm} \\
 \text{Diameter sengkang} & & &= 10 \text{ mm} \\
 \text{Jarak antar lapis tulangan tarik} & & &= 30 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Penyelesaian: (Analisis dilakukan sesuai bagan alir pada Gambar 4-4)

Hitung tinggi efektif balok (d)

$$d = 800 - 40 - 10 - 29 - 15 = 706 \text{ mm}$$

Hitung posisi pusat berat tulangan tekan

$$d' = 40 + 10 + \frac{29}{2} = 64,5 \text{ mm}$$

Periksa rasio penulangan minimum

$$\rho = \frac{A_s}{b.d} = \frac{8 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 29^2)}{400 \times 706} = \frac{5284,1588}{282400} = 0,0187$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b.d} = \frac{4 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 29^2)}{400 \times 706} = \frac{2642,0794}{282400} = 0,0094$$

$$A_{s_1} = A_s - A_s' = 5284,1588 - 2642,0794 = 2642,0794 \text{ mm}^2$$

$$\rho - \rho' = \frac{A_{s_1}}{b.d} = \frac{2642,0794}{400 \times 706} = 0,0094$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

$$\rho > \rho_{\min} \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

Periksa kondisi tulangan tekan:

$$\frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'c \cdot d'}{f_y \cdot d} \cdot \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) = \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 25 \cdot 64,5}{400 \times 706} \cdot \left(\frac{600}{600 - 400} \right) = 0,0124$$

$$\rho - \rho' = 0,0094 < 0,0124 \quad (\text{Tulangan tekan belum leleh})$$

Hitung f_s' aktual

$$f_s' = 600 \cdot \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'c \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d} \right) = 600 \cdot \left(1 - \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 25 \cdot 64,5}{0,0094 \cdot 400 \cdot 706} \right)$$

$$f_s' = 336,6725 \text{ MPa}$$

Periksa rasio penulangan maksimum

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)$$

$$\beta_1 = 0,85; \quad \text{karena } f'c = 25 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot 25}{400} \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0271$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b + \frac{\rho' \cdot f_s'}{f_y} = 0,75 \times 0,0271 + \frac{0,0094 \times 336,6725}{400} = 0,0282$$

$$\rho < \rho_{\max} \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

Hitung kapasitas momen nominal

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f'c \cdot b} = \frac{5284,1588 \times 400 - 2642,0794 \times 336,6725}{0,85 \cdot 25 \cdot 400} \quad a = 144,0174 \text{ mm}$$

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

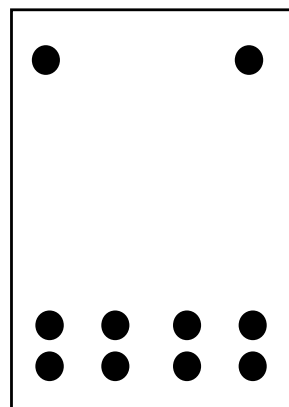
$$\begin{aligned}
 &= (5284,1588.400 - 2642,0794.336,6725) \left(706 - \frac{144,0174}{2} \right) + \\
 &2642,0794.336,6725(706 - 64,5) \\
 &= 1346723388 \text{ N.mm} \\
 &= 1346,7234 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

Momen rencana (M_R) yang boleh dikerjakan di atas balok sebesar:

$$\begin{aligned}
 M_R &= \phi.Mn \\
 &= 0,80.1346,7234 \text{ kN.m} \\
 &= 1077,3787 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

Contoh 4-3

Hitung kapasitas momen rencana (M_R) yang diijinkan bekerja pada balok beton bertulangan rangkap di bawah ini:



$$\begin{aligned}
 b &= 400 \text{ mm}; & h &= 800 \text{ mm} \\
 f'_c &= 25 \text{ MPa}; & f_y &= 400 \text{ MPa} \\
 A_s &= 8D29 \\
 A_s' &= 2D29 \\
 \text{selimut beton} & & &= 40 \text{ mm} \\
 \text{Diameter sengkang} & & &= 10 \text{ mm} \\
 \text{Jarak antar lapis tulangan tarik} & & &= 30 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Penyelesaian: (Analisis dilakukan sesuai bagan alir pada Gambar 4-4)

Hitung tinggi efektif balok (d)

$$d = 800 - 40 - 10 - 29 - 15 = 706 \text{ mm}$$

Hitung posisi pusat berat tulangan tekan

$$d' = 40 + 10 + \frac{29}{2} = 64,5 \text{ mm}$$

Periksa rasio penulangan minimum

$$\rho = \frac{A_s}{b.d} = \frac{8 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 29^2)}{400 \times 706} = \frac{5284,1588}{282400} = 0,0187$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b.d} = \frac{2 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 29^2)}{400 \times 706} = \frac{1321,0397}{282400} = 0,0047$$

$$As_1 = As - As' = 5284,1588 - 1321,0397 = 3963,1191 \text{ mm}^2$$

$$\rho - \rho' = \frac{As_1}{b.d} = \frac{3963,1191}{400 \times 706} = 0,014$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{fy} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

$$\rho > \rho_{\min} \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

Periksa kondisi tulangan tekan:

$$\frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'c \cdot d'}{fy \cdot d} \cdot \left(\frac{600}{600 - fy} \right) = \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 25 \cdot 64,5}{400 \times 706} \cdot \left(\frac{600}{600 - 400} \right) = 0,0124$$

$$\rho - \rho' = 0,014 > 0,0124 \quad (\text{Tulangan tekan leleh})$$

Karena tulangan tekan telah meleleh maka $fs' = fy$

Periksa rasio penulangan maksimum

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'c}{fy} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + fy} \right)$$

$$\beta_1 = 0,85; \quad \text{karena } f'c = 25 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot 25}{400} \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0271$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b + \frac{\rho' \cdot fs'}{fy} = 0,75 \times 0,0271 + \frac{0,0047 \times 400}{400} = 0,025$$

$$\rho < \rho_{\max} \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

Hitung kapasitas momen nominal

$$a = \frac{As \cdot fy - As' \cdot fs'}{0,85 \cdot f'c \cdot b} = \frac{5284,1588 \times 400 - 1321,0397 \times 400}{0,85 \cdot 25 \cdot 400} \quad a = 186,4997 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} Mn &= (As \cdot fy - As' \cdot fs') \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + As' \cdot fs' \cdot (d - d') \\ &= (5284,1588 \cdot 400 - 1321,0397 \cdot 400) \cdot \left(706 - \frac{186,4997}{2} \right) + \\ &\quad 1321,0397 \cdot 400 \cdot (706 - 64,5) \\ &= 1310339516 \text{ N.mm} \\ &= 1310,3395 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Momen rencana (M_R) yang boleh dikerjakan di atas balok sebesar:

$$\begin{aligned} M_R &= \phi \cdot Mn \\ &= 0,80 \cdot 1310,3395 \text{ kN.m} \\ &= 1048,2716 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Contoh 4-4

Rencanakanlah penulangan balok beton bertulang dengan ketentuan berikut:



$$\begin{aligned} b &= 350 \text{ mm} \\ h &= 700 \text{ mm} \\ f'_c &= 34 \text{ MPa} \\ f_y &= 400 \text{ MPa} \\ \text{selimut beton} &= 40 \text{ mm} \\ \text{Diameter sengkang} &= 10 \text{ mm} \\ \text{Diameter tulangan pokok tersedia} &= 22 \text{ mm} \end{aligned}$$

Untuk menanggung kombinasi beban *ultimate*:

- $M_u = 10 \text{ t.m}$
- $M_u = 50 \text{ t.m}$

Penyelesaian: (Cara perencanaan sesuai bagan alir pada Gambar 4-6)

Kasus (a)

Hitung perkiraan tinggi efektif balok (d)

$$d = 700 - 40 - 10 - \frac{22}{2} = 639 \text{ mm}$$

$$M_u = 10 \text{ t.m} = 100 \text{ kN.m} = 100 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$M_R = Mn_{\text{perlu}} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{100 \times 10^6}{0,8} = 125 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right);$$

karena $f'_c = 34 \text{ MPa} > 30 \text{ MPa}$, maka:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f'_c - 30}{7} \right) = 0,82$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot 34}{400} \cdot 0,82 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0356$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0356 = 0,0267$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'c} = \frac{400}{0,85 \cdot 34} = 13,8408$$

$$Rn = \frac{Mn_{\text{perlu}}}{b \cdot d^2} = \frac{125 \times 10^6}{350 \cdot 639^2} = 0,8747$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot m \cdot Rn}{f_y} \right)} \right) = \frac{1}{13,8408} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot 13,8408 \cdot 0,8747}{400} \right)} \right)$$

$$\rho = 0,0022$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

Kontrol rasio penulangan perlu

$$\rho = 0,0022 < \rho_{\max} = 0,0267 ; \text{ maka digunakan tulangan tunggal}$$

$$\rho = 0,0022 < \rho_{\min} = 0,0035 ; \text{ maka diperlukan luas tulangan minimum}$$

Luas tulangan perlu

$$As = \rho_{\min} \cdot b \cdot d = 0,0035 \cdot 350 \cdot 639 = 782,775 \text{ mm}^2$$

dipasang tulangan tarik:

$$3D22 = 1140,2981 \text{ mm}^2 > 782,775 \text{ mm}^2$$

Kasus (b)

Hitung perkiraan tinggi efektif balok (d)

$$d = 700 - 40 - 10 - \frac{22}{2} = 639 \text{ mm}$$

$$Mu = 50 \text{ t.m} = 500 \text{ kN.m} = 500 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$M_R = Mn_{\text{perlu}} = \frac{Mu}{\phi} = \frac{500 \times 10^6}{0,8} = 625 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) ;$$

karena $f'c = 34 \text{ MPa} > 30 \text{ MPa}$, maka:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f'c - 30}{7} \right) = 0,82$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot 34}{400} \cdot 0,82 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0356$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0356 = 0,0267$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'c} = \frac{400}{0,85 \cdot 34} = 13,8408$$

$$Rn = \frac{Mn_{\text{perlu}}}{b \cdot d^2} = \frac{625 \times 10^6}{350 \cdot 639^2} = 4,3733$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot m \cdot Rn}{f_y} \right)} \right) = \frac{1}{13,8408} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot 13,8408 \cdot 4,3733}{400} \right)} \right)$$

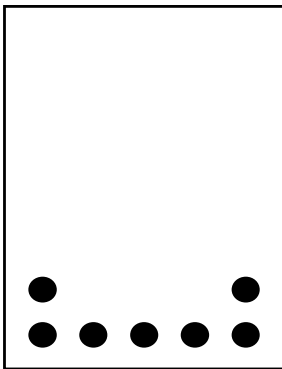
$$\rho = 0,0119$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

Kontrol rasio penulangan perlu

$$\rho = 0,0119 < \rho_{\max} = 0,0267 ; \text{ maka digunakan tulangan tunggal}$$

$$\rho = 0,0119 > \rho_{\min} = 0,0035 ; \text{ memenuhi kebutuhan tulangan minimum}$$



Luas tulangan perlu

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d = 0,0119 \cdot 350 \cdot 639 = 2661,435 \text{ mm}^2$$

dipasang tulangan tarik:

$$7D22 = 2660,929 \text{ mm}^2 \approx 2661,435 \text{ mm}^2$$

Contoh 4-5

Rencanakanlah penulangan balok beton bertulang dengan ketentuan berikut:



$$b = 350 \text{ mm}$$

$$h = 700 \text{ mm}$$

$$f'c = 34 \text{ MPa}$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$\text{selimut beton} = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter sengkang} = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan pokok tersedia} = 28 \text{ mm}$$

Untuk menanggung kombinasi beban *ultimate*: $M_u = 100 \text{ t.m}$

Penyelesaian: (Cara perencanaan sesuai bagan alir pada Gambar 4-6)

Hitung perkiraan tinggi efektif balok (d)

$$d = 700 - 40 - 10 - \frac{28}{2} = 636 \text{ mm}$$

Hitung perkiraan posisi pusat berat tulangan tekan

$$d' = 40 + 10 + \frac{28}{2} = 64 \text{ mm}$$

$$M_u = 100 \text{ t.m} = 1000 \text{ kN.m} = 1000 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$M_R = Mn_{\text{perlu}} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{1000 \times 10^6}{0,8} = 1250 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right);$$

karena $f'c = 34 \text{ MPa} > 30 \text{ MPa}$, maka:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f'c - 30}{7} \right) = 0,82$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot 34}{400} \cdot 0,82 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0356$$

$$\rho_{\text{max}} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0356 = 0,0267$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'c} = \frac{400}{0,85 \cdot 34} = 13,8408$$

$$R_n = \frac{Mn_{\text{perlu}}}{b \cdot d^2} = \frac{1250 \times 10^6}{350 \cdot 636^2} = 8,8293$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y} \right)} \right) = \frac{1}{13,8408} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot 13,8408 \cdot 8,8293}{400} \right)} \right)$$

$$\rho = 0,0272$$

$$\rho_{\text{min}} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

Kontrol rasio penulangan perlu

$$\rho = 0,0272 > \rho_{\text{min}} = 0,0035; \text{ memenuhi kebutuhan tulangan minimum}$$

$$\rho = 0,0272 > \rho_{\text{max}} = 0,0267; \text{ maka digunakan tulangan rangkap}$$

Tentukan agar tulangan tekan meleleh:

$$\frac{1}{m} \cdot \beta_1 \cdot \frac{d'}{d} \cdot \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) \leq (\rho - \rho') \leq \rho_{\max}$$

$$\frac{1}{13,8408} \cdot 0,82 \cdot \frac{64}{636} \cdot \left(\frac{600}{600 - 400} \right) \leq (\rho - \rho') \leq 0,0267$$

$$0,0179 \leq (\rho - \rho') \leq 0,0267$$

Ditentukan

$$0,0179 < (\rho - \rho') = 0,02 < 0,0267 ; \quad \text{agar tulangan tekan leleh}$$

$$a = (\rho - \rho') \cdot m \cdot d = 0,02 \cdot 13,8408 \cdot 636 = 176,055 \text{ mm}$$

$$Mn_1 = (\rho - \rho') \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 0,02 \cdot 350 \cdot 636 \cdot 400 \cdot \left(636 - \frac{176,055}{2} \right)$$

$$= 975829428 \text{ N.mm}$$

$$Mn_2 = Mn - Mn_1$$

$$= 1250 \times 10^6 - 975,5829 \times 10^6 = 274,4171 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$\rho' = \frac{Mn_2}{b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')}$$

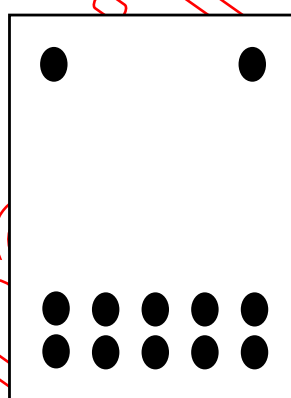
$$= \frac{274,4171 \times 10^6}{350 \cdot 636 \cdot 400 \cdot (636 - 64)}$$

$$= 0,0054$$

$$\rho = (\rho - \rho') + \rho'$$

$$= 0,02 + 0,0054$$

$$= 0,0254$$



$$As = \rho \cdot b \cdot d$$

$$= 0,0254 \cdot 350 \cdot 636$$

$$= 5654,04 \text{ mm}^2$$

$$As' = \rho' \cdot b \cdot d$$

$$= 0,0054 \cdot 350 \cdot 636$$

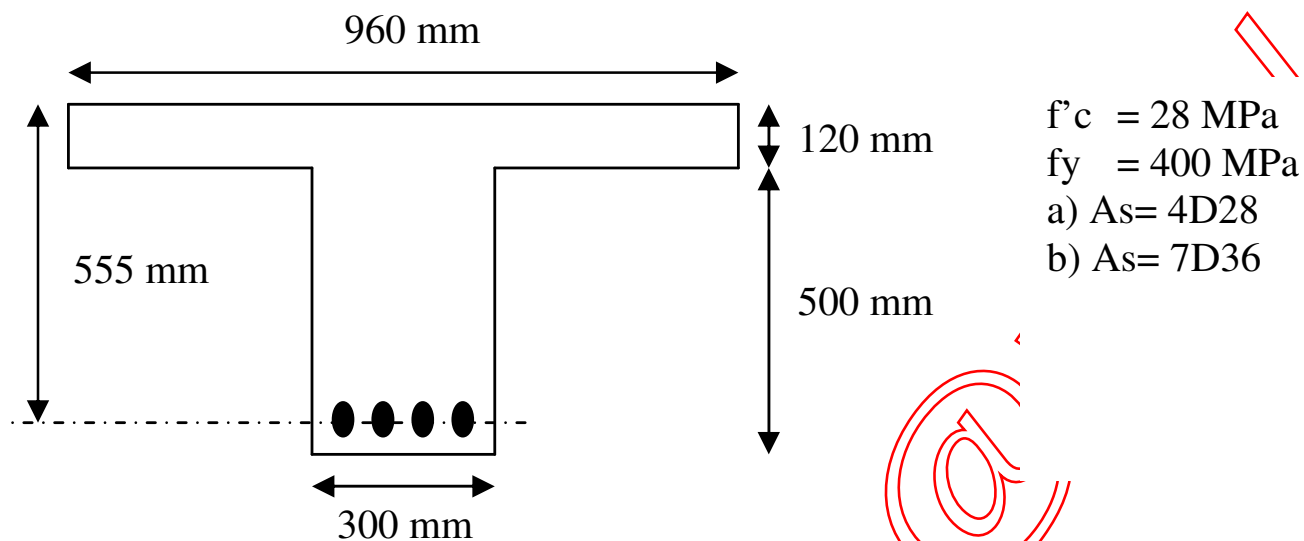
$$= 1202,04 \text{ mm}^2$$

Dipakai:

$$\text{Tulangan tarik} = 10 \text{ D } 28 = 6157,5216 \text{ mm}^2 > 5654,04 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan tekan} = 2 \text{ D } 28 = 1231,5043 \text{ mm}^2 > 1202,04 \text{ mm}^2$$

Contoh 4-6



Hitung kapasitas momen rencana (M_R) yang diijinkan bekerja pada balok beton bertulang yang tergambar di atas:

Penyelesaian: (Analisis sesuai bagan alir pada Gambar 4-10)

Kasus (a)

Kontrol rasio penulangan

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_b &= \left(\frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \right) \cdot \beta_1 \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \\ &= \left(\frac{0,85 \cdot 28}{400} \right) \cdot 0,85 \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0304 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_f &= 0,85 \cdot f'c \cdot (b - b_w) \cdot \frac{h_f}{f_y \cdot b_w \cdot d} \\ &= 0,85 \cdot 28 \cdot (960 - 300) \cdot \frac{120}{400 \cdot 300 \cdot 555} = 0,0283 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_b &= \frac{b_w}{b} \cdot (\bar{\rho}_b + \rho_f) \\ &= \frac{300}{960} \cdot (0,0304 + 0,0283) = 0,0183 \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d}$$

$$= \frac{4 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 28^2)}{960 \cdot 555} = 0,0046$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0183 = 0,0137$$

$$\rho = 0,0046 < \rho_{\max} = 0,0137 \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

$$\rho_w = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \geq \rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y}$$

$$\rho_w = \frac{4 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 28^2)}{300 \cdot 555} \geq \rho_{\min} = \frac{1,4}{400}$$

$$\rho_w = 0,0148 \geq \rho_{\min} = 0,0035 \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

Kontrol perilaku balok

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_y}{b \cdot d \cdot f'c}$$

$$= \frac{4 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 28^2) \cdot 400}{960 \cdot 555 \cdot 28} = 0,066$$

$$c = \frac{1,18 \cdot \omega \cdot d}{\beta_1}$$

$$= \frac{1,18 \cdot 0,066 \cdot 555}{0,85} = 50,851 \text{ mm}$$

$$c = 50,851 \text{ mm} < h_f = 120 \text{ mm} \quad (\text{Balok T Palsu})$$

Kapasitas lentur penampang

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

$$= \frac{4 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 28^2) \cdot 400}{0,85 \cdot 28 \cdot 300}$$

$$= 137,9837 \text{ mm}$$

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

$$= 4 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 28^2) \cdot 400 \cdot \left(555 - \frac{137,9837}{2} \right)$$

$$= 478816920,3 \text{ N.mm}$$

$$= 478,8169 \text{ kN.m}$$

$$M_R = \phi.Mn$$

$$= 0,80.478,8169 \text{ kN.m}$$

$$= 383,0535 \text{ kN.m}$$

Kasus (b)

Kontrol rasio penulangan

$$\bar{\rho}_b = \left(\frac{0,85.f'c}{f_y} \right) \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)$$

$$= \left(\frac{0,85.28}{400} \right) \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0,0304$$

$$\rho_f = 0,85.f'c.(b - b_w) \cdot \frac{h_f}{f_y.b_w.d}$$

$$= 0,85.28.(960 - 300) \cdot \frac{120}{400.300.555} = 0,0283$$

$$\rho_b = \frac{b_w}{b} \cdot (\bar{\rho}_b + \rho_f)$$

$$= \frac{300}{960} \cdot (0,0304 + 0,0283) = 0,0183$$

$$\rho = \frac{As}{b.d}$$

$$= \frac{7 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 36^2)}{960 \cdot 555} = 0,0134$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0183 = 0,0137$$

$$\rho = 0,0121 < \rho_{\max} = 0,0137 \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

$$\rho_w = \frac{As}{b_w.d} \geq \rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y}$$

$$\rho_w = \frac{7 \times (0,25 \cdot \pi \cdot 36^2)}{300 \cdot 555} \geq \rho_{\min} = \frac{1,4}{400}$$

$$\rho_w = 0,0428 \geq \rho_{\min} = 0,0035 \quad (\text{Memenuhi syarat})$$

Kontrol perilaku balok

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{A_s \cdot f_y}{b \cdot d \cdot f'c} \\ &= \frac{7125,1321 \cdot 400}{960 \cdot 555 \cdot 28} = 0,191 \\ c &= \frac{1,18 \cdot \omega \cdot d}{\beta_1} \\ &= \frac{1,18 \cdot 0,191 \cdot 555}{0,85} = 147,1929 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$c = 132,915 \text{ mm} < h_f = 120 \text{ mm} \quad (\text{Balok T Murni})$$

Kapasitas lentur penampang

$$\begin{aligned}A_{s_f} &= \frac{0,85 \cdot f'c \cdot (b - b_w) \cdot h_f}{f_y} \\ &= \frac{0,85 \cdot 28 \cdot (960 - 300) \cdot 120}{400} = 4712,4 \text{ mm}^2 \\ a &= \frac{(A_s - A_{s_f}) \cdot f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b_w} \\ &= \frac{(7125,1321 - 4712,4) \cdot 400}{0,85 \cdot 28 \cdot 300} = 135,1671 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mn_1 &= (A_s - A_{s_f}) \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= (7125,1321 - 4712,4) \cdot 400 \cdot \left(555 - \frac{135,1671}{2}\right)\end{aligned}$$

$$Mn_1 = 470402143,2 \text{ N.mm}$$

$$\begin{aligned}Mn_2 &= A_{s_f} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{h_f}{2}\right) \\ &= 4712,4 \cdot 400 \cdot \left(555 - \frac{120}{2}\right) \\ &= 933055200 \text{ N.mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mn &= Mn_1 + Mn_2 \\ &= 470402143,2 + 933055200 \\ &= 1403457343 \text{ N.mm} \\ &= 1403,4573 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_R &= \varphi.Mn \\ &= 0,80.1403,4573 \text{ kN.m} \\ &= 1122,7659 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

E-mail: Swidodo@unhy.ac.id