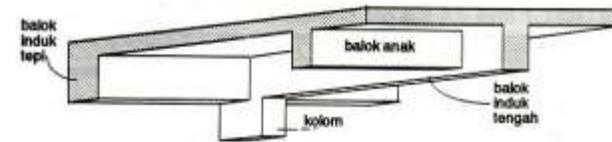


PENAMPANG BALOK T DAN BALOK BERTULANGAN RANGKAP

3.1 PENDAHULUAN

Komponen lantai atau atap bangunan gedung struktur beton bertulang dapat dengan seluruh beban yang didukung langsung dilimpahkan ke kolom dan ke fondasi bangunan. Seperti yang telah dikemukakan di depan, bentang demikian tidak dapat panjang karena pada ketebalan tertentu (berarti juga menghasilkan struktur yang tidak hemat dan praktis. Oleh karena itu telah dibedakan jenis sistem struktur plat yang bertujuan untuk memperoleh bentang mungkin dengan masalah beban mati sekecil mungkin. Salah satu di antaranya adalah sistem balok anak dan induk, terdiri dari plat yang bertumpu pada balok membentuk rangka dengan balok induk serta kolom sebagai penopang strukturnya. Pada sistem seperti ini umumnya balok anak dan induk dicetak menjadi satu monolit dengan plat. Sistem berbeda dapat juga dilaksanakan, di mana plat dan balok bukan merupakan satu kesatuan monolit, baik dengan cara pengecoran di tempat. Gambar 3.1 menunjukkan sistem monolitik tipikal. Pada sistem ini balok anak membagi bentangan balok induk menjadi setengah, seperti tampak pada Gambar 3.2.

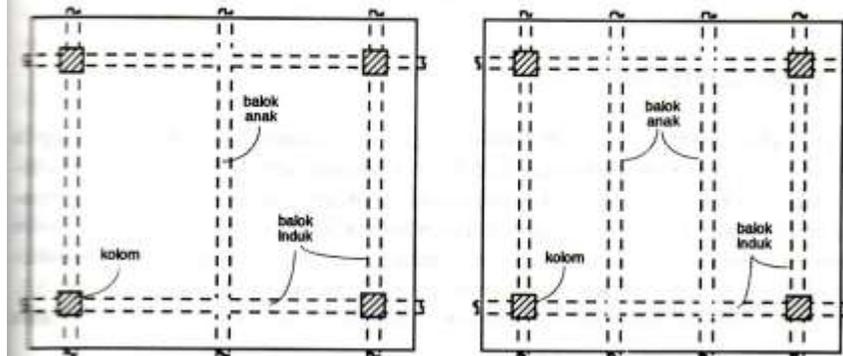
Analisis dan perencanaan balok yang dicetak menjadi satu kesatuan dengan plat lantai atau atap, didasarkan pada anggapan bahwa antara plat dan balok terjadi interaksi saat menahan momen lentur positif yang bekerja pada balok. Antara plat dan balok-balok yang menjadi satu kesatuan pada penampang huruf T tipikal, dan oleh karena itulah balok-balok dinamakan sebagai balok T seperti tampak dalam Gambar 3.3, plat akan berlaku sebagai lapis sayap (*flens*) tekan dan



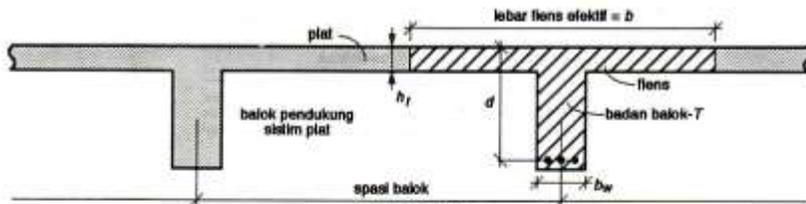
Gambar 3.1. Sistem balok dan balok induk lantai

sebagai badan. Dalam hal ini, plat yang berfungsi sebagai *flens* dari balok T juga harus direncanakan dan diperhitungkan tersendiri terhadap lenturan pada arah melintang terhadap balok-balok pendukungnya. Dengan demikian plat yang berfungsi sebagai *flens* tersebut akan berperilaku sebagai komponen struktur yang bekerja pada dua arah lenturan yang saling tegak lurus. Pada perpotongan antar-balok T, struktur akan mendukung momen lentur negatif di mana tepi atas plat berada dalam keadaan tertarik sedangkan badan balok di bagian bawah dalam keadaan terdesak. Hal demikian akan tampak lebih jelas pada tumpuan bentangan sebelah dalam (*interior*) struktur balok bentangan menerus yang akan dibahas lebih lanjut kelak.

Untuk keperluan perencanaan dan analisis, serta penyederhanaan perilaku plat terlentur pada dua arah yang rumit, standar SK SNI T-15-1991-03 menetapkan kriteria lebar efektif tertentu untuk plat (*flens*) yang diperhitungkan bekerja sama dengan balok-balok dalam rangka menahan momen lentur yang bekerja pada balok. Lebar *flens efektif* untuk bentuk simetris tidak boleh diperhitungkan lebih besar dari jarak spasi antar-balok pendukung (lihat Gambar 3.3).



Gambar 3.2. Tata letak balok anak dan balok induk



Gambar 3.3.
Balok T sebagai bagian sistem lantai

Standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.1.10 memberikan pembatasan lebar *flens efektif* balok T sebagai berikut:

- 1) Lebar *flens efektif* yang diperhitungkan tidak lebih dari seperempat panjang bentang balok, sedangkan lebar efektif bagian plat yang menonjol di kedua sisi dari balok tidak lebih dari delapan kali tebal plat, dan juga tidak lebih besar dari separoh jarak bersih dengan balok di sebelahnya. Atau dengan kata lain, lebar *flens efektif* yang diperhitungkan tidak lebih besar dan diambil nilai terkecil dari nilai-nilai berikut:
 - a. seperempat panjang bentang balok,
 - b. $b_w + 16h_f$,
 - c. jarak dari pusat ke pusat antar-balok.
- 2) Untuk balok yang hanya mempunyai *flens* pada satu sisi, lebar efektif bagian plat yang menonjol yang diperhitungkan tidak lebih besar dari seperduabelas panjang bentangan balok, atau enam kali tebal plat, atau $1/2$ jarak bersih dengan balok di sebelahnya.
- 3) Untuk balok yang khusus dibentuk sebagai balok T dengan maksud untuk mendapatkan tambahan luas daerah tekan, ketebalan *flens* tidak boleh lebih besar dari separoh lebar balok, dan lebar *flens* total tidak boleh lebih besar dari empat kali lebar balok.

3.2 ANALISIS BALOK T TERLENTUR

Persyaratan daktilitas (*liat*) balok T sama dengan yang disyaratkan bagi balok persegi di mana rasio penulangan maksimum tidak boleh lebih besar dari $0,75 \rho_b$. Tetapi nilai tersebut tidaklah sama dengan nilai-nilai yang tercantum dalam tabel untuk balok persegi, karena bentuk balok T memberikan daerah tekan khusus yang cenderung lebih luas. Untuk digunakan sebagai alat bantu dalam perencanaan dan analisis diberikan variasi pendekatan nilai $0,75 \rho_b$ sebagaimana balok persegi yang dapat diikuti lebih lanjut pada Bab 3.3. Sedangkan nilai rasio penulangan minimum ditetapkan seperti yang sudah dikenal dalam pembahasan terdahulu:

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

Sesuai dengan ketentuan SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.5 ayat 1, rasio penulangan aktual ditentukan dengan menggunakan lebar badan balok (b_w) dan bukannya lebar *flens efektif* (b). Ketentuan tersebut berlaku apabila badan balok dalam keadaan tertarik. Karena *flens* balok T menyediakan daerah tekan yang relatif luas, pada umumnya kapasitas momen tahanan ditentukan oleh luluhnya baja tulangan tarik. Maka dari itu, cukup aman bila dilakukan anggapan bahwa baja tulangan tarik akan meluluh sebelum beton mencapai regangan tekan batas dan kemudian hancur. Gaya tarik total N_T pada keadaan batas (*ulimit*) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$N_T = A_s f_y$$

Untuk proses analisis harus diketahui terlebih dahulu bentuk blok tegangan tekan. Seperti halnya pada analisis balok persegi yang telah dibahas, gaya tekan total N_D harus seimbang dan sama dengan gaya tarik total N_T . Bentuk blok tegangan tekan harus sesuai dengan luasan daerah beton tekan. Dengan demikian terdapat dua kemungkinan keadaan yang akan terjadi, blok tegangan tekan seluruhnya masuk di dalam daerah *flens*, atau meliputi seluruh daerah *flens* ditambah sebagian lagi masuk di badan balok. Berdasarkan dua kemungkinan tersebut ditetapkan dua terminologi analisis, ialah *balok T persegi* dan *balok T mumi*. Perbedaan antara keduanya di samping perbedaan bentuk blok tegangannya adalah bahwa pada *balok T persegi* dengan lebar *flens efektif* b dilakukan analisis dengan cara sama seperti balok persegi dengan lebar b (lebar *flens*), dengan mengabaikan daerah beton tertarik, sementara untuk *balok T mumi* dilaksanakan dengan memperhitungkan blok tegangan tekan mencakup daerah kerja berbentuk huruf T.

Contoh 3.1

Balok T yang merupakan bagian dari suatu sistem lantai dengan jarak spasi antar-balok 800 mm, $b = 800$ mm, $b_w = 250$ mm, $h_f = 50$ mm, $d = 300$ mm, $A_s = 3D29$. Hitunglah kuat momen tahanan M_R apabila $f_y = 400$ MPa (mutu 40) dan $f_c' = 20$ MPa.

Penyelesaian

Karena panjang bentangan tidak diketahui, lebar *flens efektif* ditentukan berdasarkan tebal *flens* dan jarak antara balok satu dengan lainnya.

$$b_w + 16h_f = 250 + 16(50) = 1050 \text{ mm}$$

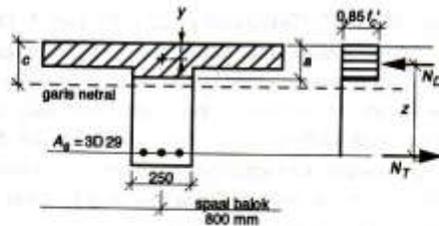
Jarak antara balok ke balok = 800 mm

Dengan demikian b yang digunakan = 800 mm

Dianggap bahwa tulangan baja tarik mencapai tegangan luluhnya, untuk kemudian menghitung N_T .

$$N_T = A_s f_y = 1982(400)10^{-3} = 792,8 \text{ kN}$$

Seandainya *flens* ditegangkan penuh seluruhnya hingga mencapai $0,85 f_c'$, akan memberikan gaya tekan total: $N_D = (0,85f_c')h_f b = 0,85(20)(50)(800)10^{-3} = 680 \text{ kN}$



Gambar 3.4.
Sketsa Contoh 2.1

Karena $792,8 > 680$, daerah blok tegangan tekan akan meliputi flens seluruhnya ditambah sebagian masuk ke daerah balok di bawah flens, dengan sisa gaya tekan yang bekerja adalah: $N_D = 792,8 - 680 = 112,8$ kN.

Tampak bahwa daerah blok tegangan tekan masuk ke daerah balok di bawah flens, oleh karenanya dilakukan analisis balok T murni.

Sisa gaya tekan tersebut di atas ($N_T - N_D$) bekerja di daerah badan balok di bawah flens.

$$N_T - N_D = (0,85 f'_c) b_w (a - h_f)$$

Penyelesaian untuk a akan didapat:

$$a = \frac{N_T - N_D}{(0,85 f'_c) b_w + h_f} = \frac{112,8}{0,85(20)(250) + 50} = 76,50 \text{ mm}$$

Pemeriksaan ρ_{min}

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

$$\rho_{aktual} = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{1982}{(250)(300)} = 0,0264 > 0,0035$$

Untuk menghitung besarnya kopel momen dalam, perlu diketahui terlebih dahulu jarak lengan antara gaya N_D dan N_T . Kedudukan N_T adalah tepat pada titik pusat luas tulangan tarik sedangkan N_D pada titik pusat luasan daerah tekan (Gambar 3.5). Dengan mengacu pada garis tepi sisi atas penampang, letak titik pusat luasan terhadap tepi atas dapat ditetapkan sebagai berikut:

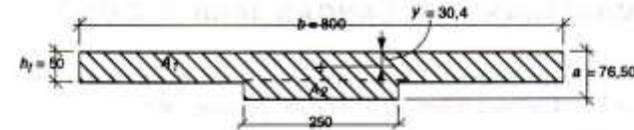
$$y = \frac{\sum (Ay)}{\sum A}$$

$$A_1 = 800(50) = 40000 \text{ mm}^2 \quad A_2 = 250(26,5) = 6625 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{40000(25) + 6625(50 + 13,25)}{40000 + 6625} = 30,4 \text{ mm}$$

Dengan demikian kedudukan N_D telah ditentukan, maka lengan kopel momen:

$$z = d - y = 300 - 30,4 = 269,6 \text{ mm}$$



Gambar 3.5.
Daerah tekan balok T

Momen tahanan dalam nominal (ideal) dapat ditentukan:

$$M_n = N_T(z) = 793,2(0,2696) = 213,8 \text{ kNm}$$

Dengan demikian momen tahanan M_n adalah:

$$M_R = \phi M_n = 0,8(213,8) = 171 \text{ kNm}$$

Selanjutnya dilakukan pemeriksaan anggapan bahwa penampang akan hancur liat (daktil), di mana tulangan baja akan meluluh terlebih dahulu.

Untuk balok T penyelesaiannya akan lebih mudah dengan cara membandingkan jumlah luas tulangan tarik aktual terhadap 75% tulangan tarik perlu untuk mencapai keadaan seimbang ($0,75 A_{sb}$).

Kedudukan garis netral pada keadaan seimbang didapat sebagai berikut:

$$c_b = \frac{600}{f_y + 600} (d) = \frac{600(300)}{400 + 600} = 180 \text{ mm}$$

Dengan menggunakan hubungan yang sudah dikenal pada balok persegi $a = 0,85 c$, yang kurang lebih dapat juga diterapkan untuk balok T,

$$a_b = 0,85(180) = 153 \text{ mm}$$

Maka, gaya tekan total dalam keadaan seimbang N_{Db} adalah:

$$N_{Db} = 0,85 f'_c \{ b(h_f) + b_w (a_b - h_f) \}$$

$$= 0,85(20) \{ 800(50) + 250(153 - 50) \} (10)^{-3}$$

$$= 1117,75 \text{ kN} = N_{Tb}$$

Juga dikarenakan $N_{Tb} = A_{sb} f_y$, maka:

$$A_{sb} = \frac{1117,75}{400} = 2794 \text{ mm}^2$$

yang mana adalah jumlah luas tulangan baja tarik yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan seimbang.

Sedangkan, $A_{s(maks)} = 0,75 A_{sb} = 0,75(2794) = 2096 \text{ mm}^2 > 1983 \text{ mm}^2$

3.3 PEMBATASAN PENULANGAN TARIK BALOK-T

Apabila diamati langkah-langkah analisis pada pemeriksaan hancur daktail (liat) Contoh 3.1 sebenarnya didasarkan atas hubungan-hubungan sebagai berikut:

- 1) $c_b = \frac{600}{f_y + 600}(d)$
- 2) $a_b = 0,85 c_b$ (di mana $\beta_1 = 0,85$)
- 3) $N_{Db} = 0,85 f_c' (bh_f + b_w(a_b - h_f))$
- 4) $N_{Db} = N_{Tb} = A_{sb} f_y$
- 5) $A_{s(maks)} = 0,75 A_{sb}$

Untuk mencari $A_{s(maks)}$ dengan kombinasi persamaan-persamaan di atas, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{s(maks)} &= \frac{0,75 N_{Db}}{f_y} \\ &= \frac{0,75}{f_y} (0,85 f_c') \left[bh_f + \left[\frac{\beta_1 600 (d)}{600 + f_y} - h_f \right] b_w \right] \\ &= \frac{0,638 f_c' h_f}{f_y} \left[b + b_w \left(\left[\frac{\beta_1}{h_f} \frac{600 d}{600 + f_y} - 1 \right] \right) \right] \end{aligned}$$

Dengan memasukkan berbagai pasangan nilai kombinasi nilai f_c' dan f_y , didapat nilai $A_{s(maks)}$ dalam bentuk daftar seperti yang tersusun pada Daftar 3-1.

Kembali pada Contoh 3.1, dengan menggunakan persamaan tersebut di atas dihitung $A_{s(maks)}$ yang diijinkan oleh peraturan:

$$\begin{aligned} A_{s(maks)} &= 0,0319 h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,51(d)}{h_f} \right) - b_w \right] \\ &= 0,0319 (50) \left[800 + 250 \left(\frac{0,51(300)}{50} \right) - 250 \right] \\ &= 1,595(800 + 515) \\ &= 2097 \text{ mm}^2 \approx 2096 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Nilai tersebut adalah luas penampang tulangan tarik yang diijinkan dipasang sehubungan dengan persyaratan daktilitas struktur. Karena nilainya masih lebih besar dari luas penampang tulangan aktual A_s terpasang (2097 > 1983), dijamin akan tercapai persyaratan hancur liat (daktail) sesuai dengan peraturan. Tampak bahwa nilai $A_{s(maks)}$ yang didapat sebenarnya tidak berbeda jauh dengan nilai $0,75 A_{sb}$.

Daftar 3-1
Nilai-nilai $A_{s(maks)}$ untuk Balok T

f_c' (MPa)	f_y (MPa)	$A_{s(maks)}$ (mm ²)
17	240	0,0452K ₁
	300	0,0362K ₂
	350	0,0310K ₃
	400	0,0271K ₄
20	240	0,0532K ₁
	300	0,0425K ₂
	350	0,0365K ₃
	400	0,0319K ₄
25	240	0,0665K ₁
	300	0,0532K ₂
	350	0,0456K ₃
	400	0,0399K ₄
30	240	0,0798K ₁
	300	0,0638K ₂
	350	0,0547K ₃
	400	0,0479K ₄
35	240	0,0930K ₅
	300	0,0744K ₆
	350	0,0638K ₇
	400	0,0558K ₈

di mana :

$$\begin{aligned} K_1 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,607 d}{h_f} \right) - b_w \right] \\ K_2 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,567 d}{h_f} \right) - b_w \right] \\ K_3 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,537 d}{h_f} \right) - b_w \right] \\ K_4 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,510 d}{h_f} \right) - b_w \right] \\ K_5 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,579 d}{h_f} \right) - b_w \right] \\ K_6 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,540 d}{h_f} \right) - b_w \right] \\ K_7 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,512 d}{h_f} \right) - b_w \right] \\ K_8 &= h_f \left[b + b_w \left(\frac{0,486 d}{h_f} \right) - b_w \right] \end{aligned}$$

Contoh 3.2

Untuk balok T dengan spasi jarak 1500 mm, $b = 250$ mm, $d = 610$ mm, $h_f = 100$ mm, hitunglah kuat momen tahanan M_R apabila $f_c' = 20$ MPa, $f_y = 300$ MPa, $A_s = 6D29$ (dua lapis). Panjang bentangan balok 8 m.

Penyelesaian

Hitung lebar flens efektif :

$$\begin{aligned} \text{seperempat panjang bentang} &= \frac{1}{4}(8) = 2 \text{ m} = 2000 \text{ mm} \\ b_w + 16h_f &= 250 + 16(100) = 1850 \text{ mm} \\ \text{jarak antara balok ke balok} &= 1500 \text{ mm} \\ \text{maka digunakan } b &= 1500 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$N_T = A_s f_y = 3963(300)10^{-3} = 1189,8 \text{ kN}$$

Berdasarkan luasnya, *flens* mampu menyediakan gaya tekan sebesar:

$$N_D = (0,85 f_c') b h_f = 0,85(20)(1500)(100)(10)^{-3} = 2550 \text{ kN}$$

Karena $2550 > 1189,8$ *flens* menyediakan daerah tekan cukup luas sedemikian sehingga blok tegangan tekan seluruhnya masih berada di dalamnya. Maka balok berlaku sebagai *balok T persegi* dengan lebar $b = 1500$ mm.

Untuk balok demikian, meskipun untuk menentukan M_R dianggap sebagai *balok T persegi*, ada kemungkinan pada waktu dilakukan pemeriksaan A_s maksimum, balok tersebut berperilaku sebagai *balok T murni* pada keadaan seimbang.

Pemeriksaan ρ_{min}

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{300} = 0,0047$$

$$\rho_{aktual} = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{3963}{250(610)} = 0,0260 > 0,0047$$

Rasio penulangan ρ_{aktual} yang akan digunakan untuk menghitung k ,

$$\rho = \frac{A_s}{b d} = \frac{3963}{1500(610)} = 0,0043$$

Harap menjadikan perhatian, dalam kasus ini diperlukan sikap hati-hati untuk tidak mencampur-adukkan dua pengertian yang berbeda antara rasio penulangan aktual yang digunakan untuk menghitung kuat momen dan yang digunakan untuk membandingkannya dengan ρ_{min} . Kedua rasio penulangan dihitung dengan cara dan penggunaan yang berbeda.

Dengan hasil $\rho = 0,0043$ gunakanlah Tabel A-15 untuk mendapatkan nilai k .

Dari tabel didapat k perlu = 1,2409 MPa.

$$M_R = \phi b d^2 k = 0,8(1500)(610)^2(1,2409)(10)^{-6} \\ = 554,1 \text{ kNm}$$

Periksalah daktilitas balok dengan membandingkan antara nilai A_s dengan A_s aktual,

$$A_{s(maks)} = 0,0425 h_f \left\{ b + b_w \left(\frac{0,567(d)}{h_f} - 1 \right) \right\} \\ = 0,0425 (100) \left\{ 1500 + 250 \left(\frac{0,567(610)}{100} - 1 \right) \right\} \\ = 8987 \text{ mm}^2$$

A_s aktual = 3963 mm², karena $8987 > 3963$ balok akan berperilaku daktil (liat) dan seperti anggapan pada awal perhitungan bahwa tulangan baja tarik sudah meluluh pada waktu terjadi momen ultimit.

Berikut diberikan ikhtisar analisis penampang balok T tertentu, sebagai berikut:

- 1) Tentukan lebar *flens efektif* menggunakan ketentuan SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.1.10.
- 2) Gunakan anggapan bahwa tulangan baja tarik telah meluluh, untuk kemudian menghitung gaya tarik total, $N_T = A_s f_y$
- 3) Hitung gaya tekan yang tersedia apabila hanya daerah *flens* saja yang menyediakan daerah tekan, $N_D = 0,85 f_c' b h_f$
- 4) Apabila $N_T > N_D$, balok berperilaku sebagai *balok T murni* dan selisih gaya tekan akan ditampung di sebagian daerah badan balok di bawah *flens*. Sedangkan bila $N_T < N_D$, berperilaku sebagai balok persegi dengan lebar b , atau disebut *balok T persegi*.

Apabila dihitung sebagai *balok T murni*, langkah selanjutnya adalah sebagai berikut:

- 5) Tentukan letak batas tepi bawah blok tegangan tekan di daerah badan balok di bawah *flens*.

$$a = \frac{N_T - N_D}{(0,85 f_c') b_w} + h_f$$

- 6) Periksa ρ_{min}

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \text{ dan } \rho_{aktual} = \frac{A_s}{b_w d}$$

ρ_{aktual} harus lebih besar dari ρ_{min} .

- 7) Tentukan letak titik pusat daerah tekan total dengan menggunakan hubungan atau persamaan sebagai berikut:

$$y = \frac{\sum (Ay)}{\sum A}$$

kemudian, $z = d - y$

- 8) Hitung momen tahanan, $M_R = \phi N_D(z)$ atau $\phi N_T(z)$

- 9) Pemeriksaan persyaratan daktilitas menggunakan ungkapan $A_{s(maks)}$ dari Daftar 3-1, $A_{s(maks)}$ harus lebih besar dari A_s aktual.

Sedangkan apabila dihitung sebagai *balok T persegi*, langkahnya adalah sebagai berikut:

- 5) Periksa ρ_{min}

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \text{ dan } \rho_{aktual} = \frac{A_s}{b_w d}$$

ρ_{aktual} harus lebih besar dari ρ_{min} .

- 6) Hitung rasio penulangan untuk kemudian menentukan k ,

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

- 7) Mengacu pada Tabel pada Apendiks A, didapatkan nilai k yang diperlukan untuk nilai ρ yang didapat dari langkah 6.
- 8) Hitung momen tahanan, $M_R = \phi b d^2 k$
- 9) Pemeriksaan persyaratan daktilitas dengan menggunakan ungkapan $A_{s(max)}$ dari Daftar 3-1, di mana $A_{s(max)}$ harus lebih besar dari A_s .

Apabila pemeriksaan batasan tulangan maksimum (langkah 9) menghasilkan A_s lebih besar dari $A_{s(max)}$, momen tahanan M_R dihitung dengan menggunakan $A_{s(max)}$ yang dalam hal ini disebut sebagai A_s efektif.