Apabila dihitung sebagai *balok T persegi* langkah selanjutnya adalah sebagai berikut:

6) Merencanakan sebagai *balok T persegi* dengan nilai b dan d yang sudah diketahui, selanjutnya menghitung k perlu,

$$k \text{ perlu} = \frac{M_u}{\phi\, b d^2}$$

7) Dari Tabel Apendiks A menentukan nilai ρ berdasarkan nilai *k perlu* yang didapat.
8) Menghitung, A_s perlu $= \rho b d$.
9) Pilih batang tulangan baja tarik dan periksa lebar balok. Periksalah *d aktual* dibandingkan dengan d yang ditetapkan, bila *d aktual* melebihi d yang dihitung (teoretis) berarti rancangan agak konservatif (pada posisi aman). Apabila *d aktual* kurang dari *d teoretis*, berarti rancangan tidak aman dan kemungkinan perencanaan harus diulang.
10) Memeriksa ρ_{min}.

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

ρ_{aktual} harus lebih besar dari ρ_{min}. Apabila tidak, dirancang ulang.

11) Pemeriksaan persyaratan daktilitas menggunakan ungkapan $A_{s(maks)}$ dari Tabel 3-1. $A_{s(maks)}$ harus lebih besar dari A_s aktual.
12) Berikan sketsa rancangan.

Apabila dihitung sebagai *balok T murni*, langkah penyelesaiannya sebagai berikut:

6) Menentukan $z = d - \frac{1}{2} h_f$
7) Menghitung A_s yang diperlukan berdasarkan hasil dari langkah 6,

$$A_s = \frac{M_u}{\phi\, f_y\, z}$$

8) Memilih batang tulangan tarik, dan periksa lebar balok.
9) Menentukan tinggi efektif aktual (*d aktual*), dan lakukan analisis balok.
10) Berikan sketsa rancangan.

3.6 BALOK PERSEGI BERTULANGAN RANGKAP

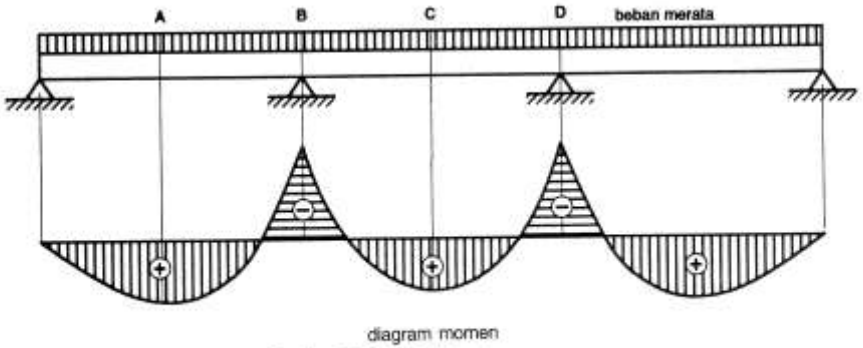
Untuk suatu penampang komponen dengan kuat bahan tertentu, kuat momen atau momen tahanan maksimum dihitung dengan menggunakan nilai k yang sesuai dengan nilai ρ_{maks} yang bersangkutan. Seperti telah diketahui, nilai k merupakan fungsi dari rasio penulangan ρ, sedangkan batas ρ *maksimum* untuk penampang balok beton bertulang *bertulangan tarik saja* telah ditetapkan, yaitu:

$$\rho_{maks} = 0{,}75\rho_b$$

Apabila penampang tersebut dikehendaki untuk menopang beban yang lebih besar dari kapasitasnya, sedangkan di lain pihak seringkali pertimbangan teknis pelaksanaan dan arsitektural membatasi dimensi balok, maka diperlukan usaha-usaha lain untuk memperbesar kuat momen penampang balok yang sudah tertentu dimensinya tersebut. Apabila hal demikian yang dihadapi, SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.3 ayat 4 memperbolehkan penambahan tulangan baja tarik lebih dari batas nilai ρ *maksimum* bersamaan dengan penambahan tulangan baja di daerah tekan penampang balok. Hasilnya adalah balok dengan penulangan rangkap di mana tulangan baja tarik dipasang di daerah tarik dan tulangan tekan di daerah tekan. Pada keadaan demikian berarti tulangan baja tekan bermanfaat untuk memperbesar kekuatan balok.

Akan tetapi, dari berbagai penggunaan tulangan tekan dengan tujuan untuk peningkatan kuat lentur suatu penampang terbukti merupakan cara yang kurang efisien terutama dari segi ekonomi baja tulangan dan pelaksanaannya dibandingkan dengan manfaat yang dapat dicapai. Dengan usaha mempertahankan dimensi balok tetap kecil pada umumnya akan mengundang masalah lendutan dan perlunya menambah jumlah tulangan geser pada daerah dekat tumpuan, sehingga akan memperumit pelaksanaan pemasangannya. Penambahan penulangan tekan dengan tujuan utama untuk memperbesar kuat lentur penampang umumnya jarang dilakukan, kecuali apabila sangat terpaksa.

Untuk balok dari suatu struktur bentang menerus, penambahan dan pemasangan tulangan pokok di daerah tekan pada mulanya didasarkan pada pertimbangan teknis pelaksanaan sebagai alasan utamanya. Pada Gambar 3.12 tampak bahwa momen positif terjadi di A dan C sehingga tulangan tarik pokok ditempatkan di bagian bawah balok, sedangkan pada titik B dan D timbul momen negatif sehingga dasar balok menjadi daerah tekan dan penulangan baja tarik ditempatkan di bagian atas balok. Apabila untuk suatu penampang balok tertentu momen negatif perletakan sedemikian besar, pemasangan tulangan tarik daerah perletakan (posisinya di atas) harus memperhatikan selimut momen negatif

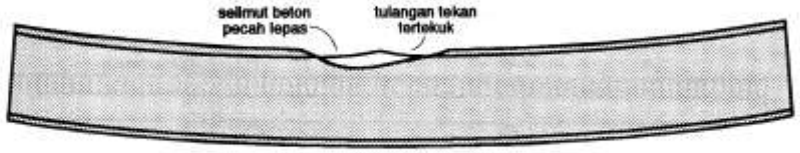


Gambar 3.12. Balok bentang menerus

dengan memberi panjang penyaluran secukupnya. Untuk itu, pemasangan umumnya diatur dengan meneruskan sebagian tulangan tarik tersebut ke sepanjang bentang balok menerobos melewati daerah tekan penampang bagian tengah bentang. Dengan teknik pemasangan seperti tersebut balok menjadi bertulangan rangkap.

Kecuali memperhatikan panjang penyaluran yang diperlukan, tulangan-tulangan pokok memanjang tersebut juga harus terikat baik dengan sengkang tertutup untuk mencegah terjadinya tekuk tulangan tekan. Seperti yang terjadi pada komponen struktur tekan, balok tertentu juga cenderung akan mengalami peristiwa tekuk seperti terlihat pada Gambar 3.13. Apabila terjadi tekuk, bersamaan dengan itu selimut beton akan mengalami pecah lepas. Sehingga peraturan mengharuskan untuk memasang dan mengikat erat tulangan pokok membentuk rangka kokoh seperti yang dikerjakan untuk tulangan pokok memanjang komponen struktur kolom (dibahas pada Bab 10). Sesuai dengan SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.16.11, pemasangan sengkang diharuskan pada seluruh daerah di mana penulangan tekan digunakan. Apabila sebagai tulangan pokok tekan menggunakan batang D32 atau lebih kecil, paling tidak sengkang yang dipakai adalah batang D10, sedangkan untuk tulangan pokok tekan D36 atau lebih besar menggunakan sengkang batang D12. Jarak antar-sengkang tidak boleh lebih besar dari nilai terkecil dari: 16 kali diameter batang tulangan memanjang, 48 kali diameter batang tulangan sengkang, atau panjang sisi terpendek penampang balok. Sebagai alternatif, dapat juga digunakan batang rangkai las pabrik dengan luas yang setara.

Penambahan tulangan tekan juga lebih sering dikaitkan dengan pengendalian lendutan (defleksi). Pada Bab 8 dapat diikuti bahwa penulangan tekan memberikan bantuan yang cukup berarti dalam usaha mengurangi lendutan jangka waktu panjang akibat perilaku rangkak dan susut.

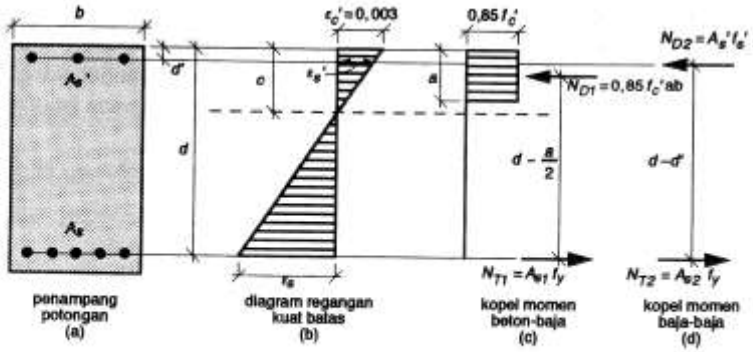


Gambar 3.13. Model kerusakan pada daerah tekan

3.7 ANALISIS BALOK TERLENTUR BERTULANGAN RANGKAP (KONDISI I)

Analisis lentur balok persegi bertulangan rangkap seperti dijelaskan dengan Gambar 3.14 menyangkut penentuan kuat nominal lentur M_n suatu penampang dengan nilai-nilai b, d, d', A_s, A_s', f_c', dan f_y yang sudah tertentu. Anggapan-anggapan dasar yang digunakan untuk analisis balok beton bertulangan rangkap pada dasarnya sama dengan balok bertulangan tarik saja. Hanya ada satu tambahan anggapan yang penting ialah bahwa tegangan tulangan baja tekan (f_s') merupakan fungsi dari regangannya tepat pada titik berat tulangan baja tekan. Seperti pembahasan terdahulu, tulangan baja berperilaku elastik hanya sampai pada tingkat di mana regangannya mencapai luluh (ε_y). Dengan kata lain, apabila regangan tekan baja (ε_s') sama atau lebih besar dari regangan luluhnya (ε_y) maka sebagai batas maksimum tegangan tekan baja (f_s') diambil sama dengan tegangan luluhnya (f_y). Sedangkan apabila regangan tekan baja yang terjadi kurang dari regangan luluhnya maka tegangan tekan baja $f_s' = \varepsilon_s' E_s$, di mana E_s adalah modulus elastisitas baja. Tercapainya masing-masing keadaan (kondisi) tersebut tergantung dari posisi garis netral penampang.

Dengan dua bahan berbeda yang akan menahan gaya tekan N_D, beton dan baja tekan, gaya tekan total terbagi menjadi dua komponen ialah gaya tekan yang ditahan oleh beton N_{D1} dan yang ditahan oleh tulangan baja tekan N_{D2}. Sehingga di dalam analisis *momen tahanan dalam total* dari balok diperhitungkan terdiri dari dua bagian atau dua *kopel momen dalam*, yaitu kopel pasangan beton tekan dengan tulangan baja tarik dan pasangan tulangan baja tekan dengan tambahan tulangan baja tarik. Kedua *kopel momen dalam* seperti tergambar pada Gambar 3.14. Kuat momen total balok bertulangan rangkap merupakan penjumlahan kedua *kopel momen dalam* dengan mengabaikan luas beton tekan yang ditempati oleh tulangan baja tekan.



Gambar 3.14. Analisis balok bertulangan rangkap

Kuat momen dari pasangan kopel tulangan baja tekan dan baja tarik tambahan dihitung sebagai berikut:

$$M_{n2} = N_{T2}\, z_2$$

Dengan menganggap tulangan baja tarik telah meluluh, sehingga $f_s = f_y$:

$$M_{n2} = A_{s2}\, f_y\, (d - d')$$

Keseimbangan gaya-gaya: $\Sigma(H) = 0$, sehingga $N_{D2} = N_{T2}$, maka:

$$A_s' f_s' = A_{s2}\, f_y$$

Apabila dianggap tulangan baja tekan sudah meluluh, sehingga $f_s' = f_y$:

$$A_s' f_y = A_{s2}\, f_y$$

di mana, $A_s' = A_{s2}$

maka, $M_{n2} = A_s' f_y\, (d - d')$

Sedangkan kuat momen dari pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik dihitung sebagai berikut:

$$M_{n1} = N_{T1}\, z_1$$

Dengan menganggap tulangan baja tarik telah meluluh, $f_s = f_y$:

$$M_{n1} = A_{s1}\, f_y\, (d - 1/2\, a)$$

Karena $A_s = A_{s1} + A_{s2}$, maka: $A_{s1} = A_s - A_{s2}$

dan karena $A_{s2} = A_s'$, maka: $A_{s1} = A_s - A_s'$

dengan demikian, $M_{n1} = (A_s - A_s')\, f_y\, (d - 1/2\, a)$

Dengan menjumlahkan dua kopel momen tersebut didapatkan *kuat momen ideal* balok bertulangan rangkap:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = (A_s - A_s')\, f_y\, (d - 1/2 a) + A_s' f_y\, (d - d')$$

Momen tahanan M_R didapatkan dengan mengalikan faktor reduksi kekuatan terhadap M_n,

$$M_R = \phi\, M_n$$

Ungkapan tersebut didasarkan pada anggapan bahwa kedua penulangan baik tekan maupun tarik telah meluluh sebelum atau paling tidak pada saat regangan beton mencapai 0,003. Hal tersebut dapat diperiksa dengan menghitung regangan-regangan yang tercapai pada saat terjadi momen batas yang dengan sendirinya tergantung pada letak (posisi) garis netral pada penampang balok.

Letak garis netral dapat ditentukan dengan terlebih dahulu menghitung tinggi blok tegangan beton tekan.

$$N_T = N_{D1} + N_{D2}$$

$$A_s f_y = (0{,}85 f_c')ab + A_s' f_y$$

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

Dengan didapatkannya nilai a, maka letak (posisi) garis netral dapat ditentukan dengan menggunakan rumus $a = \beta_1 c$ dan kemudian dilakukan pemeriksaan terhadap kebenaran anggapan-anggapan yang digunakan.

Kasus di mana kedua penulangan baik tekan maupun tarik telah meluluh sebelum atau paling tidak pada saat regangan beton tekan mencapai 0,003 digolongkan sebagai *kondisi I*, lihat Contoh 3.6. Sedangkan kasus di mana tulangan baja tarik meluluh tetapi tulangan baja tekan belum juga meluluh pada saat regangan beton tekan mencapai 0,003 digolongkan sebagai *kondisi II*, lihat Bab 3.8 dan Contoh 3.7.

Contoh 3.6.

Hitung kuat momen tahanan M_R untuk balok dengan b = 300 mm, d = 510 mm, d' = 65 mm, h = 600 mm, A_s = 6D32 (dua lapis), A_s' = 2D16, f_c' = 20 MPa, f_y = 300 MPa.

Penyelesaian

Dianggap bahwa semua penulangan telah meluluh, maka $f_s' = f_y$ dan $f_s = f_y$.

dengan demikian,

$$A_{s2} = A_s'$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2}$$

$$A_{s1} = A_s - A_s' = 4825{,}6 - 2035{,}8 = 2789{,}8 \text{ mm}^2$$

Dari pasangan kopel beton tekan dan tulangan baja tarik, tinggi blok tegangan tekan beton dapat dihitung sebagai berikut,

$$a = \frac{A_{s1}\, f_y}{(0{,}85\, f_c')b} = \frac{2789{,}8\,(300)}{0{,}85\,(20)(300)} = 164{,}1 \text{ mm}$$

Dengan menggunakan anggapan sama dengan yang dipakai pada balok bertulangan tarik saja tentang hubungan antara tinggi *blok tegangan beton tekan* dengan jarak garis netral penampang balok terhadap serat tepi tekan ($a = \beta_1 c$), maka letak garis netral dapat ditentukan dan selanjutnya digunakan untuk memeriksa regangan-regangan tulangan baja.

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{a}{0{,}85} = \frac{164{,}1}{0{,}85} = 193{,}1 \text{ mm}$$

Pemeriksaan regangan-regangan untuk mengetahui apakah asumsi yang digunakan benar, yang berarti bahwa kedua penulangan baik tulangan tekan ataupun tarik telah luluh sebelum beton hancur, lihat Gambar 3.14.b.

Regangan yang diperhitungkan terjadi pada saat dicapai momen ultimit, ialah:

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c}(0{,}003) = \frac{(193{,}1 - 65)\,0{,}003}{193{,}1} = 0{,}0020$$

$$\varepsilon_s = \frac{d - c}{c}(0{,}003) = \frac{(316{,}9)\,0{,}003}{193{,}1} = 0{,}0049$$

$$\varepsilon_y = 0{,}0015$$

Karena ε_s' dan ε_s keduanya lebih besar dari ε_y, baik tulangan baja tekan maupun tarik telah mencapai luluh terlebih dahulu sebelum beton tekan mencapai regangan 0,003. Dengan demikian anggapan mengenai tegangan baja benar dan sesuai perhitungan.
Dari pasangan kopel beton tekan dengan tulangan baja tarik, didapatkan:

$$M_{n1} = A_{s1} f_y (d - 1/2\, a)$$
$$= 2789{,}8(300)[510 - 1/2\,(164{,}1)]10^{-6} = 358{,}2 \text{ kNm}$$

Dari pasangan kopel.tulangan baja tekan dan tambahan tulangan tarik:

$$M_{n2} = A_s' f_y (d - d') = 2035{,}8(300)(510 - 65)(10)^{-6} = 271{,}8 \text{ kNm}$$
$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 358{,}2 + 271{,}8 = 530 \text{ kNm}$$

maka, $M_R = \phi\, M_n = 0.8(629{,}4) = 504$ kNm

Kedua penulangan baik tekan maupun tarik telah mencapai luluh mendahului saat beton tekan mencapai regangan 0,003. Meskipun demikian, perencanaan balok tersebut belum memenuhi persyaratan daktilitas apabila ρ *aktual* lebih besar dari 0,75 ρ_b, sehingga masih diperlukan pemeriksaan akan hal tersebut.

Pembatasan SK SNI T-15-1991-03 untuk ρ pada pasal 3.3.3 ayat 3, berlaku baik untuk balok beton bertulangan rangkap maupun tarik saja. Persamaan $A_{s(maks)}$ untuk balok bertulangan rangkap dapat dikembangkan dan diolah lebih lanjut seperti halnya yang telah dilakukan pada waktu menyusun Daftar 3.1 untuk balok T , dengan cara sebagai berikut:

Letak garis netral dari sisi tepi atas,

$$c_b = \frac{600}{(f_y + 600)}(d)$$

Keseimbangan gaya desak dan tarik dalam penampang memberikan,

$$N_{Db} = N_{Tb}$$
$$(0{,}85 f_c')\beta_1 c_b + A_s' f_s' = A_{sb}\, f_y$$
$$A_{s(maks)} = 0{,}75\, A_{sb}$$

dengan melakukan beberapa substitusi, didapatkan:

$$A_{s(maks)} = 0{,}75\left(\frac{0{,}85\, f_c'\, \beta_1 c_b}{f_y}\right) + 0{,}75\left(\frac{A_s'\, f_s'}{f_y}\right)$$

Sedangkan SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.3 ayat 3 menyatakan bahwa untuk komponen struktur dengan tulangan tekan, bagian ρ_b yang disamakan dengan tulangan tekan tidak perlu direduksi dengan faktor 0,75. Apabila ketentuan tersebut diterapkan pada persamaan yang lalu, dan dengan melakukan substitusi untuk c_b, maka didapatkan:

$$A_{s(maks)} = 0{,}75\left\{\frac{(0{,}85\, f_c')\, \beta_1 (600)(d)}{f_y\,(f_y + 600)}\right\} + \frac{A_s'\, f_s'}{f_y}$$

Sedangkan dari Bab 2.8 terdahulu, untuk balok bertulangan tarik saja, telah didapatkan hubungan sebagai berikut:

$$\rho_{maks} = 0{,}75\,\rho_b = \frac{600(d)}{f_y + 600}(0{,}75)\frac{(0{,}85\, f_c')\, \beta_1}{f_y}$$

Maka untuk balok bertulangan rangkap didapatkan hubungan sebagai berikut:

$$A_{s(maks)} = \rho_{maks}(d) + \frac{A_s' f_s'}{f_y}$$

Pada penampang bertulangan seimbang, apabila $f_s' = f_y$, persamaan menjadi:

$$A_{s(maks)} = \rho_{maks}\,(d) + A_s'$$

Seperti diketahui, nilai-nilai ρ_{maks} balok bertulangan tarik saja untuk berbagai mutu beton dan baja telah diberikan pada Tabel A-6.

Selanjutnya, menentukan nilai f_s' pada penampang bertulangan seimbang,

$$f_s' = \varepsilon_s' E_s = \frac{0{,}003\,(c_b - d')E_s}{c_b} = 600\left(1 - \frac{d'}{c_b}\right)$$

dengan melakukan substitusi untuk c_b, didapatkan:

$$f_s' = \left\{1 - \frac{600 + f_y}{600\ d}(d')\right\}600$$
$$f_s' = \left\{1 - \left(\frac{d'}{d}\right)\left(\frac{600 + f_y}{600}\right)\right\}600$$

Dengan demikian, untuk berbagai nilai f_y dapat ditetapkan nilai d'/d, di mana $f_s' = f_y$.
Sehingga apabila pada suatu penampang yang mempunyai nilai aktual d'/d lebih kecil dari nilai yang didapat dari persamaan, maka $f_s' = f_y$.
Apabila $f_s' = f_y$, nilai-nilai d'/d adalah sebagai berikut:

untuk:	$f_y = 240$	$d'/d = 2{,}33$
	$f_y = 300$	$d'/d = 3{,}00$
	$f_y = 350$	$d'/d = 3{,}80$
	$f_y = 400$	$d'/d = 5{,}00$

Maksud dari peraturan untuk menjamin didapatkannya balok daktail (liat) akan berhasil apabila pasangan *kopel beton tekan* dengan *tulangan baja tarik* mempunyai nilai ρ kurang dari 0,75 ρ_b dan hasil perencanaan akan berperilaku sebagai balok daktail. Pembatasan daktilitas tersebut umumnya cukup memuaskan karena tambahan tulangan yang memberikan pasangan *kopel tulangan baja tekan* (A_s') dan *tulangan tarik tambahan* (A_{s2}) tidak akan mengakibatkan hancur getas karena merupakan pasangan tulangan baja dan umumnya dipakai jenis baja yang cukup liat untuk struktur beton biasa.

Demikian pula yang diterapkan pada struktur plat dan balok rendah, di mana f_s'' mungkin tidak akan mencapai f_y, cukup dijamin dengan membuktikan bahwa pasangan *kopel beton tekan* dan *tulangan baja tarik* ($A_{s1} = A_s - A_s'$) adalah daktail dan tidak perlu merisaukan daktilitas penulangan rangkap secara keseluruhan. Dalam kasus seperti ini hendaknya menggunakan persamaan-persamaan yang sudah disebutkan di atas.

Pemeriksaan penulangan minimum dilakukan sebagai berikut:

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b\,d} = \frac{2789{,}8}{300(510)} = 0{,}0182$$

$$\rho_{min} = 0{,}0241$$

Dengan 0,0182 < 0,0241, berarti kriteria persyaratan penulangan minimum telah terpenuhi.

3.8 ANALISIS BALOK TERLENTUR BERTULANGAN RANGKAP (KONDISI II)

Seperti pembahasan terdahulu, umumnya tulangan baja tekan (A_s') mencapai tegangan luluh sebelum beton mencapai regangan tekan 0,003. Tetapi hal yang demikian tidak akan berlangsung pada balok rendah dengan penulangan baja kuat tinggi. Dengan mengacu kepada Gambar 3.14.b, apabila letak garis netral penampang balok relatif tinggi, ada kemungkinan pada saat momen ultimit terjadi, regangan $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ (belum mencapai luluh). Seperti diketahui nilai ε_s' (berarti juga f_s') dan tinggi blok tegangan tekan a, tergantung pada letak garis netral. Sedangkan di lain pihak, suatu penampang harus memenuhi syarat keseimbangan di mana gaya tekan total harus seimbang dengan gaya tarik total. Dengan demikian persamaan keseimbangan dapat disusun untuk menetapkan nilai tepat c yang diperlukan, berupa persamaan kuadrat. Pada contoh berikut ini, akan dapat diamati permasalahan dan sekaligus pemecahannya.

Contoh 3.7.

Hitung kuat momen tahanan M_n dari balok dengan b = 300 mm, d = 530 mm, d' = 65 mm, h = 600 mm, A_s = 3D36, A_s' = 2D25, f_c' = 35 MPa, f_y = 400 MPa.

Penyelesaian

Dianggap semua tulangan baja, baik tarik maupun tekan telah mencapai luluh, maka ditetapkan: $A_{s2} = A_s'$

Dengan mengacu pada Gambar 3.14.b,

$$a = \frac{(A_s - A_s')\,f_y}{(0{,}85\,f_c')b} = \frac{A_{s1}\,f_y}{(0{,}85\,f_c')b} = \frac{2071{,}8(400)}{0{,}85(35)(300)} = 92{,}9 \text{ mm}$$

Tentukan letak garis netral,

$a = \beta_1 c \Rightarrow \beta_1 = 0{,}81$ (SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.2. ayat 7)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{92{,}90}{0{,}81} = 114{,}7 \text{ mm}$$

Pemeriksaan regangan tulangan baja dengan berdasarkan segi tiga sebangun, lihat Gambar 3.15.a :

Pada tulangan tekan,

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c}(0{,}003) = \frac{(114{,}7 - 65)\,0{,}003}{114{,}7} = 0{,}0013$$

Pada tulangan tarik,

$$\varepsilon_s = \frac{d - c}{c}(0{,}003) = \frac{(530 - 114{,}7)\,0{,}003}{114{,}7} = 0{,}0109$$

Untuk baja mutu 40, $\varepsilon_y = 0{,}0020$

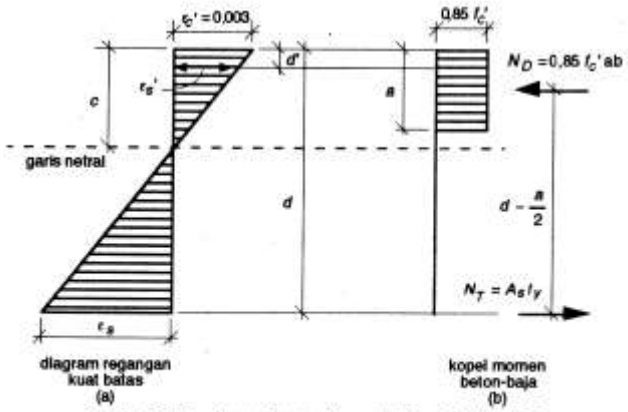
Karena $\varepsilon_s > \varepsilon_y > \varepsilon_s'$, maka tulangan baja tarik telah meluluh tetapi baja tekan belum. Dengan demikian, ternyata anggapan-anggapan pada langkah awal tidak benar. Maka diperlukan mencari letak garis netral terlebih dahulu. Dengan mengacu pada Gambar 3.14, dan menggunakan keseimbangan gaya-gaya horisontal ($\Sigma H_F = 0$), akan didapatkan nilai c.

$$N_T = N_{D1} + N_{D2}$$

$$A_s\,f_y = (0{,}85\,f_c')ba + f_s'A_s'$$

sedangkan,

$$a = \beta_1 c \text{ dan } f_s' = \varepsilon_s' E_s = \frac{(c - d')\,0{,}003}{c}(E_s)$$



Gambar 3.15. Pemeriksaan Kompatibilitas Contoh 3.7

Dengan melakukan beberapa substitusi didapatkan:

$$A_s f_y = (0,85 f_c')b\beta_1 c + 0,003\left(\frac{c-d'}{c}\right)E_s A_s'$$

Apabila persamaan tersebut dikalikan dengan c, akan didapat:

$$A_s f_y c = (0,85 f_c')b\beta_1 c^2 + c(0,003)\ E_s A_s' - d'(0,003)E_s A_s'$$

setelah dilakukan pengelompokan, didapatkan persamaan:

$$(0,85\ f_c' b\beta_1)c^2 + (0,003\ E_s A_s' - A_s f_y)c - d'(0,003)E_s A_s' = 0$$

dengan memasukkan nilai $E_s = 200000$ MPa, persamaan menjadi:

$$(0,85\ f_c' b\beta_1)c^2 + (600\ A_s' - A_s f_y)c - 600\ d' A_s' = 0$$

di mana, $A_s = 3053,6$ mm² $A_s' = 981,8$ mm² $\beta_1 = 0,81$

$f_y = 400$ MPa $f_c' = 35$ MPa

$b = 300$ mm $d' = 65$ mm

dan setelah dilakukan substitusi, didapat persamaan:

$$\{0,85(35)(300)(0,81)\}\ c^2 + 600(981,8) - 3053,6(400)\}\ c - 600(65)(981,8) = 0$$

$$7229,25\ c^2 - 632360\ c - 38290200 = 0$$

$$c^2 - 87,47\ c - 5297 = 0$$

Selanjutnya mencari nilai c atau akar persamaan pangkat dua di atas, dapat diselesaikan dengan cara sebagai berikut:

$$c^2 - 87,47\ c = 5297$$

$$c^2 - 87,47\ c + \{1/2(-87,47)\}^2 = 5297 + \{1/2(-87,47)\}^2$$

$$c^2 - 87,47\ c + 1912,7 = 5297 + 1912,7 = 7209,7$$

$$(c - 43,74)^2 = 7209,7$$

$$c - 43,74 = \sqrt{(7209,7)} = 84,91 \Rightarrow c = 128,7 \text{ mm}$$

Penyelesaian persamaan kuadrat untuk mencari c dapat juga diselesaikan dengan cara sebagai berikut:

$$c = \pm\sqrt{(Q + R^2)} - R$$

di mana, $R = \dfrac{600\ A_s' - A_s f_y}{1,7\ f_c'\ b\ \beta_1}$ dan $Q = \dfrac{600\ d'\ A_s'}{0,85\ f_c'\ b\ \beta_1}$

Dengan nilai c tersebut, nilai-nilai lain yang belum diketahui dapat dicari.

$$f_s' = \frac{(c-d')}{c}(600) = \frac{(128,7-65)}{128,7}(600) = 296,97 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

dengan demikian berarti anggapan yang digunakan benar.

$a = \beta_1 c = 0,81(128,7) = 104,2$ mm

$N_{D1} = (0,85\ f_c')ab = 0,85(35)(104,2)(300)10)^{-3} = 929,98$ kN

$N_{D2} = A_s' f_s' = 296,97(981,8)(10)^{-3} = 291,57$ kN

$N_D = N_{D1} + N_{D2} = 1221,55$ kN

$N_T = A_s f_y = 3053,6(400)(10)^{-3} = 1221,44$ kN

$N_D = N_T$

$M_{n1} = N_{D1}(z_1) = N_{D1}(d - 1/2a)$

$= 929,98(530 - 1/2(104,2))(10)^{-3} = 444,44$ kNm

$M_{n2} = N_{D2}(z_2) = N_{D2}(d - d')$

$= 291,57(10)^{-3}(530 - 65) = 135,58$ kNm

$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 580,02$ kNm

$M_R = \phi\ M_n = 0,8(580,02) = 464,02$ kNm

Dengan menggunakan syarat SK SNI T-15-1991-03 dilakukan pemeriksaan daktilitas balok. Karena $f_s' < f_y$ maka jumlah luas penampang tulangan baja tarik (A_{s2}) yang diperlukan sebagai pasangan dengan *tulangan baja tekan* untuk membentuk *kopel momen dalam* akan kurang dari A_s'.

Hitung ulang berapa sebenarnya A_{s1} *efektif* yang berlaku.

$N_{T2} = N_{D2}$

$A_{s2} f_y = A_s' f_s'$

$$A_{s2} = \frac{A_s'\ f_s'}{f_y} = \frac{981,8\ (296,97)}{400} = 729 \text{ mm}^2$$

Kemudian didapatkan, $A_{s1} = A_s - A_{s2} = 3053,6 - 729 = 2325$ mm²

Untuk pasangan kopel beton tekan dengan tulangan baja tarik,

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b\ d} = \frac{2325}{300(530)} = 0,0146$$

$0,75\ \rho_b = 0,0271$ (Tabel A-6)

dengan demikian maka: $\rho = 0,0146 < 0,0271$

Untuk memudahkan di dalam memahami analisis penampang balok bertulangan rangkap, berikut diberikan ringkasan langkah-langkahnya,

1) Anggap bahwa segenap penulangan meluluh, maka: $f_s = f_s' = f_y$, dan $A_{s2} = A_s'$.
2) Dengan menggunakan persamaan pasangan kopel beton tekan dan tulangan baja tarik, dan $A_{s1} = A_s - A_s'$, hitunglah tinggi blok tegangan tekan a.

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

3) Tentukan letak garis netral,

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

4) Dengan menggunakan diagram regangan memeriksa regangan tulangan baja tekan maupun tarik, untuk membuktikan apakah anggapan pada langkah awal benar.

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

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

Dengan menganggap $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$, yang berarti tulangan baja tarik telah meluluh, akan timbul salah satu dari dua kondisi berikut ini:

a. Kondisi I: $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$, menunjukkan bahwa anggapan pada langkah awal betul dan tulangan baja tekan meluluh.

b. Kondisi II: $\varepsilon_s' \leq \varepsilon_y$, menunjukkan bahwa anggapan pada langkah awal tidak betul dan tulangan baja tekan belum meluluh.

Harap dicatat bahwa masih ada dua kemungkinan lagi, salah satunya ialah apabila $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$, yang berarti tegangan tulangan baja tarik masih belum melampaui tegangan luluh. Keadaan tersebut termasuk jarang terjadi, tetapi terkadang juga timbul pada balok atau plat bertulangan rangkap dengan penulangan berlebihan.

Kondisi I:

5) Apabila ε_s' dan ε_s keduanya melampaui ε_y, hitunglah kapasitas momen teoretis M_{n1} dan M_{n2}.
   Untuk pasangan kopel gaya tulangan tekan dan tarik: $M_{n2} = A_s' f_y (d - d')$
   Untuk pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan tarik: $M_{n2} = A_{s1} f_y (d - 1/2a)$
   dengan demikian, $M_n = M_{n1} + M_{n2}$
6) $M_R = \phi M_n$
7) Pemeriksaan syarat daktilitas dengan membuktikan bahwa rasio penulangan (ρ) pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik tidak melampaui 0,75 ρ_b (Tabel A-6), atau membuktikan bahwa luas penampang tulangan baja tarik tidak lebih dari $A_{s(maks)}$ seperti ditetapkan persamaan dalam Bab 3.7.

$$\rho \text{ aktual} = \frac{A_{s1}}{b\,d}$$

Kondisi II:

5) Jika $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ dan $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$, untuk mendapatkan nilai c digunakan persamaan sebagai berikut:

$$(0{,}85\, f_c' b \beta_1) c^2 + (600\, A_s' - A_s f_y) c - 600\, d' A_s' = 0$$

   dapatkan nilai c dari persamaan kuadrat baik dengan cara biasa ataupun pendekatan seperti pada Contoh 3.7.
6) Menghitung tegangan pada tulangan baja tekan,

$$f_s' = \frac{c - d'}{c}(600)$$

7) Dapatkan a dengan menggunakan persamaan: $a = \beta_1 c$
8) Menghitung gaya-gaya tekan,

$$N_{D1} = (0{,}85\, f_c')ba$$
$$N_{D2} = A_s' f_s'$$

   kemudian diperiksa dengan menghitung gaya tarik,

$$N_T = A_s f_y$$

   di mana N_T harus sama dengan $N_{D1} + N_{D2}$.
9) Menghitung kuat momen tahanan ideal untuk masing-masing kopel,

$$M_{n1} = N_{D1}(d - 1/2a)$$
$$M_{n2} = N_{D2}(d - d')$$
$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

10) $M_R = \phi M_n$
11) Pemeriksaan syarat daktilitas dengan membuktikan bahwa rasio penulangan pasangan kopel *gaya beton tekan* dan *tulangan baja tarik* tidak melampaui nilai 0,75 ρ_b (Tabel A-6), dan A_{s1} dihitung berdasarkan keadaan bahwa tegangan pada tulangan baja tekan belum mencapai f_y.

$$A_{s1} = A_s - \frac{A_s' f_s'}{f_y} \quad \text{dan} \quad \rho \text{ aktual} = \frac{A_{s1}}{b\,d}$$

   atau persyaratan daktilitas diperiksa dengan membandingkan A_s dengan $A_{s(maks)}$ seperti yang telah dijabarkan dalam Bab 3.7, di mana dilakukan penyelidikan apakah kondisi seimbang tercapai.

3.9 PERENCANAAN BALOK BERTULANGAN RANGKAP

Apabila pengamatan menunjukkan bahwa penampang balok persegi bertulangan tarik saja tidak kuat untuk menahan beban tertentu dan ukurannya tidak memungkinkan untuk diperbesar dikarenakan alasan-alasan arsitektural ataupun teknis pelaksanaan, misalnya, pilihan akan jatuh pada balok bertulangan rangkap. Sedangkan prosedur perencanaan pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua bagian perencanaan *kopel gaya dalam* yang bila hasil keduanya dijumlahkan akan didapat kekuatan balok yang diperlukan.

Contoh 3.8.

Rencanakan penulangan balok persegi beton bertulang untuk mendukung momen M_{DL} = 230 kNm dan M_{LL} = 370 kNm, b = 350 mm, h = 800 mm, f_c' = 20 MPa, f_y = 240 MPa, apabila dipakai tulangan baja tekan gunakan d' = 70 mm.

Penyelesaian

Anggap bahwa $d = h - 100 = 700$ mm, jarak pusat berat tulangan baja tarik terhadap tepi beton ditentukan 100 mm dengan memperhitungkan kemungkinan penggunaan dua lapis tulangan baja tarik.

Menghitung momen rencana,

$$M_u = 1{,}2M_{DL} + 1{,}6M_{LL}$$
$$= 1{,}2(230) + 1{,}6(370) = 276 + 592 = 868 \text{ kNm}$$

Terlebih dahulu dihitung apakah mungkin menggunakan balok bertulangan tarik saja. Dari Tabel A-9, didapatkan nilai k.

$$k\ maksimum = 5{,}9792 \text{ MPa}$$
$$M_R\ maks = \phi b d^2 k$$
$$= 0{,}8(350)(700)^2(5{,}9792)10^{-6} = 820 \text{ kNm}$$

Karena M_R maks= 820 kNm < 868 kNm, maka disimpulkan tidak dapat menggunakan balok dengan hanya bertulangan tarik saja, harus bertulangan rangkap.

Perhitungkan bahwa pasangan kopel *gaya beton tekan* dengan *tulangan baja tarik* mempunyai rasio penulangan kira-kira 90% dari ρ_{maks}.

$$\rho = 0{,}90(0{,}0323) = 0{,}0291$$

dengan nilai tersebut dicari nilai k dari Tabel A-9,

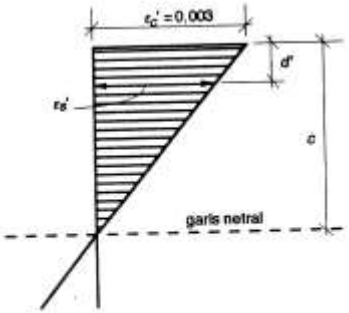
$$k = 5{,}5451 \text{ MPa}$$

Kuat momen tahanan atau kapasitas pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik adalah:

$$M_{R1} = \phi\ bd^2k = 0{,}8(350)(700)^2(5{,}5451)(10)^{-6} = 761 \text{ kNm}$$

Tentukan luas penampang tulangan tarik yang diperlukan untuk pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik,

$$A_{s1} = \rho bd = 0{,}0291(350)(700) = 7130 \text{ mm}^2$$



Gambar 3.16. Diagram regangan Beton tekan (contoh 3.8)

Pasangan kopel gaya tulangan baja tekan dan tarik ditentukan sedemikian rupa sehingga kuat momennya memenuhi keseimbangan terhadap momen rencana.

$$M_{R2} \text{ perlu} = M_u - M_{R1} = 868 - 761 = 107 \text{ kNm}$$

Berdasarkan pada pasangan kopel gaya tulangan baja tekan dan tarik didapatkan:

$$M_{R2} = \phi\ N_{D2}(d - d')$$
$$N_{D2} = \frac{M_{R2}}{\phi(d - d')} = \frac{107000}{0{,}8(700-70)} = 212{,}3 \text{ kN}$$

Karena $N_{D2} = A_s' f_s'$, maka f_s' dihitung berdasarkan letak garis netral pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik, kemudian dilakukan pemeriksaan terhadap regangan ε_s' pada tulangan baja tekan.

$$a = \frac{A_{s1} f_y}{(0{,}85 f_c')b} = \frac{7130(240)}{0{,}85(20)(350)} = 287{,}6 \text{ mm}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{287{,}6}{0{,}85} = 338{,}4 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c}(0{,}003) = \frac{268{,}4(0{,}003)}{338{,}4} = 0{,}0024$$

$$\varepsilon_y = 0{,}0020$$

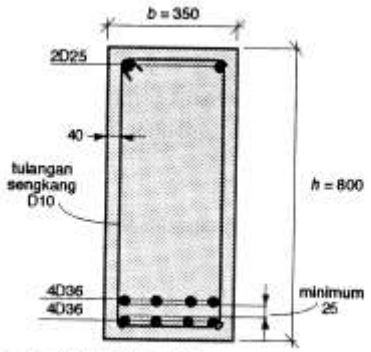
Karena $\varepsilon_y < \varepsilon_s'$, maka terbukti bahwa memang tulangan baja tarik akan meluluh sebelum regangan beton tekan mencapai 0,003, dan karenanya sebagai batas tegangan: $f_y' = f_y$.

Tentukan jumlah tulangan baja tekan yang diperlukan.

$$A_s' \text{ perlu} = \frac{N_{D2}}{f_s'} = \frac{N_{D2}}{f_y} = \frac{212{,}3(10)^3}{240} = 884{,}6 \text{ mm}^2$$

Tentukan jumlah tulangan baja tarik yang diperlukan untuk pasangan kopel gaya tulangan baja tekan dan tarik tambahan dengan $f_s' = f_y$.

$$A_{s2} = A_s' = 884{,}6 \text{ mm}^2$$



Gambar 3.17. Sketsa Rancangan Contoh 3.8

Tentukan luas tulangan baja tarik total yang diperlukan,

$$A_s \text{ total} = A_{s1} + A_{s2} = 7130 + 884{,}6 = 8014{,}6 \text{ mm}^2$$

Pilih tulangan baja tekan yang akan dipasang jika diperlukan luasan 884,6 mm².
Gunakan 2 batang tulangan D28 ($A_s' = 1231{,}4$ mm²).
Pilih tulangan baja tarik yang akan dipasang jika diperlukan luasan 8014,6 mm².
Gunakan 8 batang tulangan D36 ($A_s = 8143$ mm²), tempatkan pada posisi dua lapis (4 batang tiap lapis). Dengan susunan tulangan tersebut kemudian diperiksa seberapa lebar balok yang diperlukan, apakah lebar yang ada ($b = 350$ mm) masih memenuhi.
Untuk tulangan sengkang gunakan batang tulangan D12, tinggi balok total 800 mm, selimut beton pelindung tulangan 40 mm, batang tulangan tarik D36, dan jarak bersih minimum antar-lapis 25 mm. Maka, tinggi efektif balok dapat dihitung sebagai berikut:

$$d \text{ aktual} = 800 - 6 - 18 - 12{,}5 = 723{,}5 \text{ mm}$$

sedangkan tinggi efektif (d) yang digunakan 700 mm < 723,5 mm.

Dengan demikian ringkasan langkah-langkah perencanaan balok bertulangan rangkap adalah sebagai berikut:
Ukuran penampang balok sudah ditentukan.

1) Anggap bahwa $d = h - 100$ mm
2) Menghitung momen rencana total M_u.
3) Dilakukan pemeriksaan apakah benar-benar perlu balok bertulangan rangkap. Dari Tabel Apendiks A diperoleh nilai k maksimum untuk digunakan menghitung M_R balok bertulangan baja tarik saja.

   $$M_R \text{ maksimum} = \phi\, bd^2k$$

4) Apabila $M_R < M_u$, rencanakan balok sebagai balok bertulangan rangkap, dan apabila $M_R \geq M_u$, balok direncanakan sebagai balok bertulangan tarik saja.

Apabila harus direncanakan sebagai balok bertulangan rangkap :

5) Menghitung rasio penulangan pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik, $\rho = 0{,}90(\rho_{maks}) = 0{,}90(0{,}75\ \rho_b)$
   Nilai ρ tersebut digunakan untuk mencari k pada Tabel.
6) Menentukan kapasitas momen dari pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik.

   $$M_{R1} = \phi bd^2k$$

   Menghitung tulangan baja tarik yang diperlukan untuk pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan baja tarik,

   $$A_{s1}\ perlu = \rho bd$$

7) Menghitung selisih momen, atau momen yang harus ditahan oleh pasangan gaya tulangan baja tekan dan tarik tambahan, $M_{R2} = M_u - M_{R1}$
8) Dengan berdasarkan pada pasangan kopel gaya tulangan baja tekan dan tarik tambahan, hitung gaya tekan pada tulangan yang diperlukan (anggap bahwa $d' = 70$ mm).

   $$N_{D2} = \frac{M_{R2}}{\phi(d - d')}$$

9) Dengan $N_{D2} = A_s' f_s'$, hitung f_s' sedemikian sehingga A_s' dapat ditentukan. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan letak garis netral dari pasangan gaya beton tekan dan tulangan baja tarik kemudian memeriksa regangan ε_s' pada tulangan tekan, sedangkan nilai ε_y didapat dari Tabel.

   $$a = \frac{A_{s1} f_y}{(0{,}85 f_c')b}$$

   $$c = \frac{a}{\beta_1}$$

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

   Apabila $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$, tulangan baja tekan telah meluluh pada momen ultimit dan $f_s' = f_y$, sedangkan apabila $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$, hitunglah $f_s' = \varepsilon_s' E_s$ dan gunakan tegangan tersebut untuk langkah berikutnya.
10) Karena $N_{D2} = A_s' f_s'$

    maka A_s' perlu $= \dfrac{N_{D2}}{f_s'}$
11) Menghitung A_{s2} perlu,

    $$A_{s2} \text{ perlu} = \frac{f_s' A_s'}{f_y}$$

12) Menghitung jumlah luas tulangan baja tarik total yang diperlukan, $A_s = A_{s1} + A_{s2}$
13) Memilih batang tulangan baja tekan A_s'.
14) Memilih batang tulangan baja tarik (A_s). Periksa lebar balok dengan mengusahakan agar tulangan dapat dipasang dalam satu lapis saja.
15) Memeriksa *d aktual* dan bandingkan dengan *d teoretis*. Apabila *d* aktual sedikit lebih besar, berarti rancangan agak konservatif (lebih aman). Apabila *d* aktual lebih kecil yang berarti perencanaan kurang aman, dilakukan perencanaan ulang.
16) Berikan sketsa rancangan.