

BAB II

STRUKTUR BALOK KONVENSIONAL

2.1 Umum

Secara garis besar komponen-komponen struktur beton dapat diklasifikasikan atas:

1. “Slab” atau pelat

“Slab” adalah elemen horizontal utama yang menyalurkan beban hidup atau beban mati ke rangka pendukung vertikal dari suatu sistem struktur. Elemen tersebut dapat berupa “slab” di atas balok, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1, “flat slab” (“slab” tanpa balok yang tertumpu pada kolom).

2. Balok

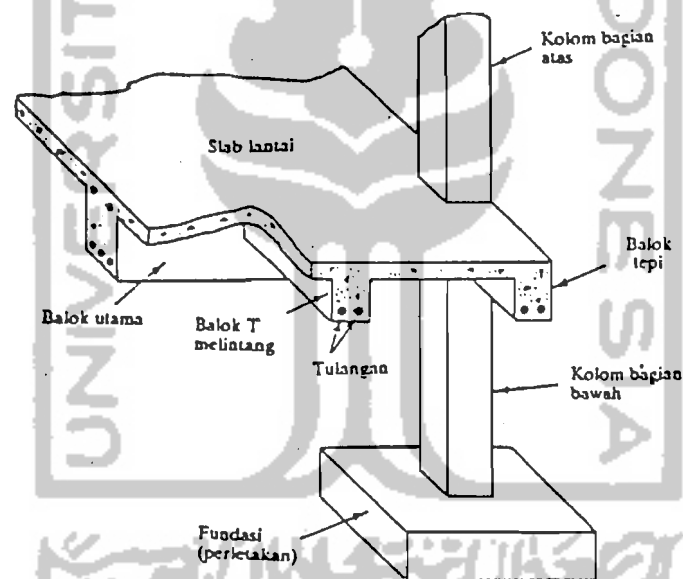
Balok adalah elemen struktur yang menyalurkan beban-beban dari “slab” lantai ke kolom penyangga yang vertikal. Secara struktural tulangan berada pada bagian bawah, atau dibagian atas dan bawah.

3. Kolom

Kolom adalah elemen struktural yang memikul sistem lantai struktural. Elemen ini merupakan elemen yang mengalami tekan dan pada umumnya disertai dengan momen lentur.

4. Pondasi

Pondasi adalah elemen beton struktural yang meneruskan beban dari struktur di atasnya ke tanah yang memikulnya. Pondasi ini dapat mempunyai berbagai bentuk sesuai dengan kondisi tanah yang ada dan perencanaan. Bentuk yang paling sederhana adalah pondasi setempat seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1. Pondasi dari jenis ini dapat dipandang sebagai pelat terbalik yang meneruskan beban merata dari tanah ke kolom.

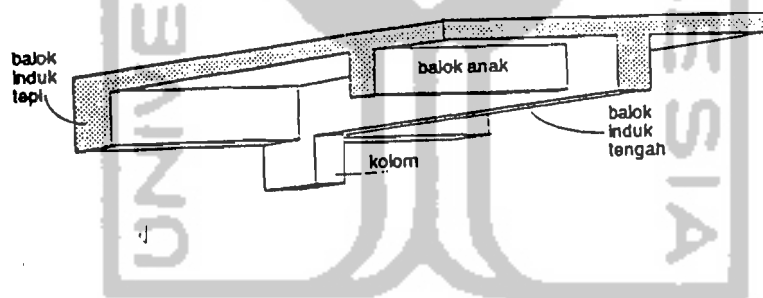


Gambar 2.1 Sistem struktural rangka beton

2.2 Struktur Balok Konvensional

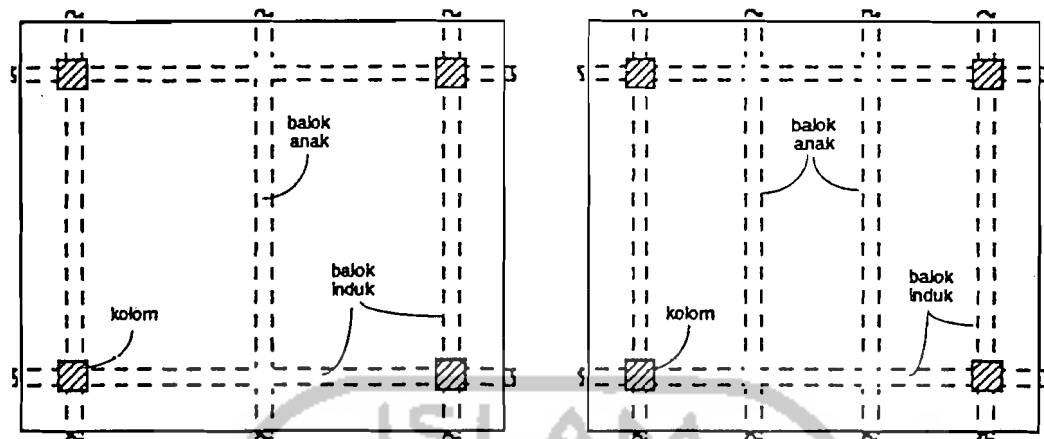
Komponen lantai atau atap bangunan gedung struktur beton bertulang dapat berupa pelat dengan seluruh beban yang didukung langsung dan dilimpahkan ke kolom dan selanjutnya dilimpahkan ke pondasi bangunan. Bentangan struktur

pelat tidak boleh panjang pada ketebalan tertentu (berarti pula berat sendiri) menghasilkan struktur yang tidak hemat dan praktis, oleh karena itu telah banyak dikembangkan jenis sistem struktur pelat yang bertujuan untuk memperoleh bentangan sepanjang mungkin dengan beban mati sekecil mungkin. Salah satu diantaranya dinamakan sistem balok anak dan induk, terdiri dari pelat yang tertumpu pada balok anak yang membentuk rangka dengan balok induk serta kolom sebagai penopang struktur keseluruhan. Struktur balok anak dan induk inilah yang nantinya dalam Tugas Akhir ini kami sebut dengan struktur balok konvensional. Pada Gambar 2.2 menunjukkan struktur balok konvensional pada pelat.



Gambar 2.2 Struktur balok konvensional pada pelat

Pada umumnya balok anak membagi bentangan balok induk menjadi setengah, sepertigaan, seperempat, seperti tampak pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tata letak balok anak dan balok induk

2.3 Metode Analisis dan Perencanaan

Perencanaan komponen struktur beton dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak timbul retak berlebihan pada penampang sewaktu mendukung beban kerja, dan masih mempunyai cukup keamanan serta cadangan kekuatan untuk menahan beban dan tegangan lebih lanjut tanpa mengalami runtuh. Timbulnya tegangan-tegangan lentur akibat terjadinya momen karena beban luar, dan tegangan tersebut merupakan faktor yang menentukan dalam menetapkan dimensi penampang komponen struktur. Proses perencanaan atau analisis biasanya dimulai dengan memenuhi persyaratan terhadap lentur, kemudian baru dari segi lain-lainya.

Ada dua macam metode analisis dan perencanaan yaitu metode tegangan kerja (“Working Stress Method”) dan metode rencana kekuatan (“Strength Design Method”).

1. Metode tegangan kerja (“Working Stress Method”)

Di dalam metode tegangan kerja yaitu suatu unsur struktur direncanakan sedemikian hingga tegangan yang diakibatkan oleh aksi dari beban layan (“service load” atau beban kerja) dan yang dihitung secara mekanika dari unsur-unsur yang elastis, tidak melampaui suatu harga ijin, yang ditetapkan lebih dulu. Beban kerja adalah beban seperti beban mati, hidup, angin dan gempa, yang dimisalkan benar-benar terjadi sewaktu masa kerja dari struktur.

Metode tegangan kerja ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$f \leq [\text{tegangan ijin, } f_{\text{ijin}}]$$

dimana :

f = tegangan yang dihitung secara elastis dengan menggunakan rumus lentur $f = M \cdot c / I$ untuk balok.

f_{ijin} = suatu tegangan pembatas yang ditetapkan oleh peraturan bangunan sebagai suatu persentasi dari kekuatan tekan f'_c untuk beton atau tegangan leleh f_y dari baja tulangan.

2. Metode perencanaan kekuatan (“Strength Design Method”)

Di dalam metode perencanaan kekuatan beban kerja dinaikkan secukupnya dengan beberapa faktor untuk mendapatkan beban dimana keruntuhan dinyatakan sebagai “telah diambang pintu”. Beban ini dinamakan beban berfaktor. Struktur atau unsurnya selanjutnya diproporsikan sedemikian hingga mencapai kekuatannya pada saat bekerjanya beban berfaktor. Perhitungan dari kekuatan ini

memperhitungkan sifat hubungan yang tidak linier antara tegangan dan regangan beton. Metode rencan kekuatan dapat dinyatakan sebagai berikut :

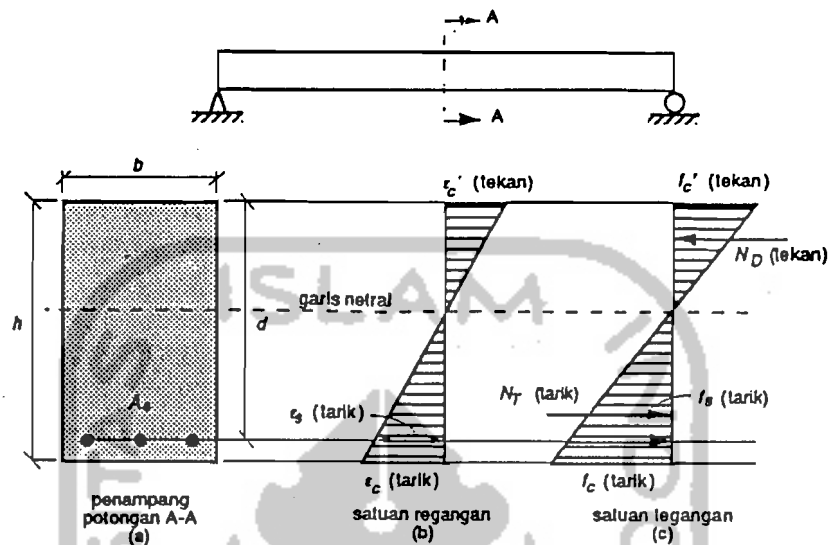
$$\text{kekuatan yang tersedia} \geq [\text{kekuatan yg diperlukan memikul beban} \\ \text{berfaktor}]$$

dimana kekuatan yang tersedia (seperti kekuatan moment) dihitung sesuai dengan peraturan dan pemisalan dari sifat yang ditetapkan oleh suatu peraturan bangunan, dan kekuatan yang diperlukan adalah kekuatan yang dihitung dengan menggunakan suatu analisa struktur untuk beban berfaktor. Kekuatan yang tersedia telah dikenal oleh para perencana sebagai kekuatan ultimit.

Mengingat pada kenyataannya bahan beton bersifat tidak serba sama dan tidak sepenuhnya elastis, metode perencanaan kekuatan lebih realistis karena menganggap hubungan sebanding antara tegangan dan regangan dalam beton terdesak hanya berlaku sampai suatu batas keadaan pembebanan tertentu yaitu pada tingkat beban sedang. Didalam tugas akhir ini metode analisis dan perencanaan yang kami gunakan adalah metode perencanaan kekuatan. Pendekatan dan pengembangan metode perencanaan kekuatan didasarkan atas anggapan-anggapan sebagai berikut :

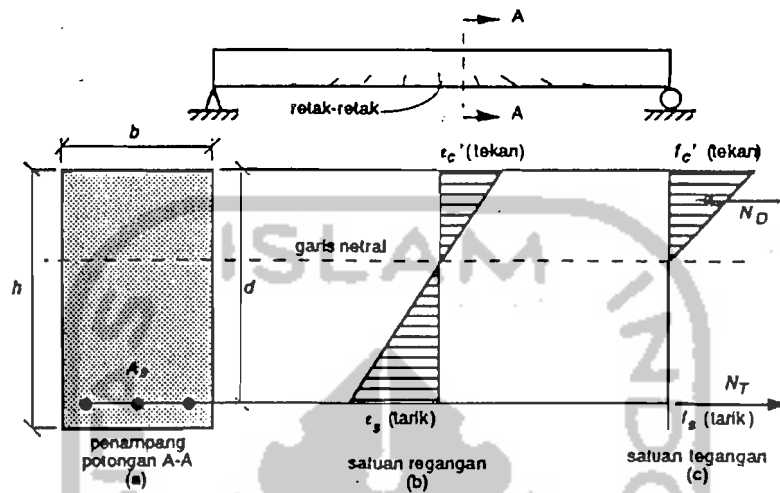
1. Bidang penampang rata sebelum terjadi lenturan tetap rata setelah terjadi lenturan dan tetap berkedudukan tegak lurus pada sumbu bujur balok. Oleh karena itu, nilai regangan dalam penampang komponen

struktur terdistribusi linier atau sebanding lurus terhadap jarak ke garis netral.



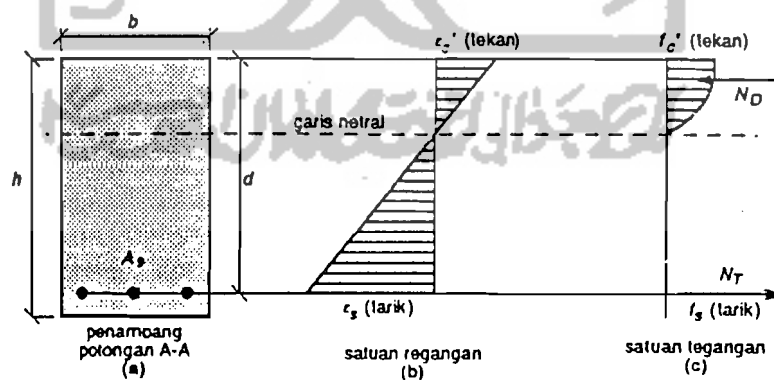
Gambar 2.4 Perilaku lentur pada beban kecil

2. Tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai pada kira-kira beban sedang, dimana tegangan beton tekan tidak melampaui $\pm 1/2 f_c$. Apabila beban meningkat sampai beban ultimit, tegangan yang timbul tidak sebanding lagi dengan regangannya berarti distribusi tegangan tekan tidak lagi linier. Bentuk blok tegangan beton tekan pada penampangnya berupa garis lengkung dimulai dari garis netral dan berakhir pada serat tepi tekan terluar. Tegangan tekan maksimum sebagai kuat tekan lentur beton pada umumnya tidak terjadi pada serat tepi tekan terluar, tetapi agak masuk ke dalam.



Gambar 2.5 Perilaku lentur pada beban sedang

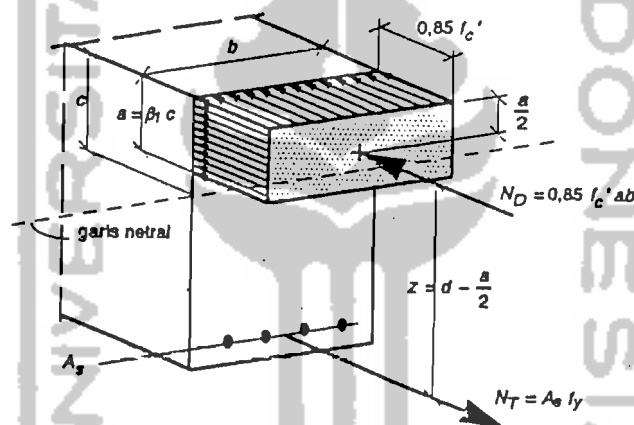
3. Dalam memperhitungkan kapasitas momen ultimit komponen struktur, kuat tarik beton diabaikan (tidak diperhitungkan) dan seluruh gaya tarik dilimpahkan kepada tulangan baja tarik



Gambar 2.6 Perilaku lentur dekat beban ultimit

2.4. Kuat Lentur Balok Persegi

Distribusi tegangan tekan aktual yang terjadi pada penampang mempunyai bentuk parabola, tetapi untuk menghitung blok tegangan tekan yang berbentuk parabola bukanlah merupakan hal yang mudah. Oleh karena itu dapat digunakan blok tegangan segi empat ekuivalen yang dapat digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa harus kehilangan ketelitiannya, yang berarti juga dapat digunakan untuk menghitung kekuatan lentur penampang. Blok tegangan ekuivalen ini mempunyai tinggi a dan tegangan tekan rata-rata sebesar $0,85 f'_c$.



Gambar 2.7 Blok regangan ekuivalen yang diasumsikan

Seperti terlihat pada Gambar 2.7, besarnya a adalah $\beta_1 c$ yang ditentukan dengan menggunakan koefisien β_1 sedemikian rupa sehingga luas blok segi empat ekuivalen kurang lebih sama dengan blok tegangan yang berbentuk parabola. Dengan demikian gaya tekan C pada dasarnya sama untuk kedua jenis distribusi tegangan.

Harga $0,85 f'_c$ untuk tegangan rata-rata dari blok tegangan segi empat ekuivalen ditentukan berdasarkan hasil percobaan pada beton yang berumur lebih 28 hari, serta regangan maksimum yang diijinkan adalah $0,003$. Harga ini dipakai

sebagai harga batas yang masih aman. Dengan menggunakan asumsi diagram distribusi tegangan yang diperlihatkan pada Gambar 2.7 dapat dihitung gaya tekan C sebesar $0,85 f'c. b. a$, yaitu volume blok tekan pada atau dekat keadaan batas, yaitu bila baja tarik tekan leleh ($\epsilon_s > \epsilon_y$). Gaya tarik T dapat ditulis sebagai $A_s.F_y$, sehingga persamaan keseimbangan dapat ditulis sebagai berikut :

$$0,85 f'c. b. a = A_s.F_y$$

atau :

$$a = \frac{A_s.F_y}{0,85 f'c. b}$$

Sehingga moment tahanan nominalnya adalah :

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

Karena $C = T$ maka moment tahan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$M_n = 0,85 f'c. b. a (d - (a/2))$$

Berdasarkan jenis keruntuhan yang dialami oleh balok berpenampang persegi, apakah akan terjadi leleh tulangan tarik atukah hancurnya beton yang tertekan, balok dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok yaitu :

1. Penampang "balanced"

Berdasarkan letak garis netral yang terjadi perbandingan antara regangan baja dengan regangan beton maksimum dapat ditetapkan berdasarkan distribusi regangan linier. Sedangkan letak garis netral tergantung pada jumlah baja tarik yang dipasang dalam suatu penampang sehingga blok tegangan tekan beton mempunyai kedalaman cukup agar dapat tercapai keseimbangan gaya-gaya,

dimana resultan tegangan tekan seimbang dengan resultan tegangan tarik. Apabila pada penampang tersebut luas tulangan baja tarik ditambah maka blok tegangan tekan akan bertambah sehingga letak garis netral akan bergeser ke bawah lagi. Apabila jumlah tulangan baja tarik sedemikian sehingga letak garis netral pada posisi dimana akan terjadi secara bersamaan regangan luluh pada baja tarik dan regangan beton tekan maksimum 0,0003.

2. Penampang “over-reinforced”

Penampang ini disebut juga bertulangan lebih, keruntuhannya ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan. Pada saat awal keruntuhan regangan baja yang terjadi masih lebih kecil dari pada tegangan lelehnya. Dengan demikian tegangan baja juga lebih kecil dari tegangan lelehnya.

3. Penampang “under-reinforced”

Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh tulangan baja yang akan bertambah panjang dengan bertambahnya regangan diatas regangan leleh. Kondisi penampang yang demikian dapat terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi balanced.

Di dalam peraturan perencanaan menetapkan batasan penulangan yang perlu diperhatikan yaitu bahwa jumlah tulangan baja tarik tidak boleh melebihi 0,6 dari jumlah tulangan baja tarik yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan,

$$A_s \leq 0,6 A_{sb}$$

Apabila jumlah batas penulangan tersebut dapat dipenuhi akan memberikan jaminan bahwa kehancuran dapat berlangsung dengan diawali meluluhnya tulangan baja tarik terlebih dahulu dan tidak akan terjadi kehancuran getas yang lebih bersifat mendadak.

Ungkapan pembatasan jumlah penulangan tersebut dapat pula dihubungkan dalam kaitannya dengan rasio penulangan (ρ), perbandingan antara jumlah luas penampang baja tarik (A_s tulangan) terhadap luas penampang adalah :

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

Apabila pembatasan diperlakukan dimana rasio penulangan maksimum yang diijinkan dibatasi dengan 0,6 kali rasio penulangan keadaan seimbang (ρ_b), sehingga :

$$\rho_{maks} = 0,6 \rho_b$$

Dimana rasio penulangan keadaan seimbang (ρ_b) adalah :

$$\rho_b = \frac{(0,85 \cdot f_c \cdot \beta_1) \cdot 600}{f_y \cdot (600 + f_y)}$$

Selain itu didalam SK SNI 91 juga memberikan batas penulangan minimum rasio penulangan sebagai berikut :

$$\rho_{minimum} = 1,4 / f_y$$

Batas minimum penulangan tersebut diperlukan untuk lebih menjamin tidak terjadinya hancur secara tiba - tiba seperti yang terjadi pada balok tanpa tulangan.

Dengan demikian konsep dan kriteria penampang seimbang berguna untuk acuan atau patokan baik untuk perencanaan maupun analisa dalam menentukan cara hancur yang sesuai dengan peraturan.

2.5 Persyaratan Kekuatan

Penerapan faktor keamanan dalam struktur bangunan di satu pihak bertujuan untuk mengendalikan kemungkinan terjadinya runtuh yang membahayakan bagi penghuni, di lain pihak harus juga memperhitungkan faktor ekonomi bangunan. Struktur bangunan dan komponen - komponennya harus direncanakan untuk mampu memikul beban lebih di atas beban yang diharapkan bekerja. Kapasitas tersebut disediakan untuk memperhitungkan dua keadaan, yaitu kemungkinan terdapatnya beban kerja yang lebih besar dan kemungkinan terjadinya penyimpangan kekuatan komponen struktur akibat bahan dasar ataupun pengerjaan yang tidak memenuhi syarat. Kekuatan yang diperlukan menurut peraturan SK SNI 91 menetapkan bahwa beban rencana, gaya geser rencana, dan moment rencana ditetapkan hubungannya dengan beban kerja atau beban guna melalui persamaan sebagai berikut :

$$U = 1,2 D + 1,6 L$$

Dimana U adalah kuat rencana (kuat perlu), D adalah beban mati, dan L adalah beban hidup. Faktor beban berbeda untuk beban mati, beban hidup, beban angin ataupun beban gempa.

SK SNI juga memberikan ketentuan konsep keamanan lapis kedua yaitu reduksi kapasitas teoritik komponen struktur dengan menggunakan faktor reduksi

kekuatannya (ϕ) dalam menentukan kuat rencananya. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa kuat moment yang digunakan M_r (kapasitas momen) sama dengan kuat moment ideal M_n dikalikan dengan faktor (ϕ);

$$M_r = \phi M_n$$

2.6. Perencanaan Balok Persegi Terlentur

Langkah-langkah perencanaan balok persegi terlentur dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Data-data yang diperlukan untuk perancangan balok adalah :
 - a. kuat desak beton (f'_c),
 - b. kuat tarik baja (f_y),
 - c. momen rencana (M_r),
 - d. perbandingan d / b
 - e. panjang bentang balok (L)
2. Mengasumsikan lebar balok awal (b) dan tinggi balok (h) :

$$h_{min} = 1 / 16 * L$$
3. Menentukan lebar balok (b) dan tinggi balok yang dipakai sesuai dengan point dua, dan d pakai (d_p) dimana :

$$d_p = h - 80 \text{ (mm)}$$
4. Tentukan rasio d / b :

$$\text{rasio (r)} = 1,5 \text{ s/d } 2,5$$
5. Kontrol apakah rasio sesuai point 4, jika tidak maka dimensi diperbaharui.

6. Menentukan β_1 dimana :

a. Jika $f'_c \leq 30$ Mpa,

$$\text{maka } \beta_1 = 0,85$$

b. Jika $f'_c > 30$ Mpa

$$\text{maka } \beta_1 = 0,85 - 0,008 (f'_c - 30) \geq 0,65$$

7. Menentukan rasio penulangan balanced dan minimum :

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y}$$

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

8. Kontrol rasio penulangan yang digunakan untuk tarik 1 (ρ_1) sebesar 0,6 dari rasio penulangan balanced (ρ_b) $> \rho_{\min}$, jika tidak memenuhi kembali ke point satu :

$$\rho_1 = 0,6 \rho_b > \rho_{\min}$$

9. Menentukan momen rencana (M_r) yang terdiri dari momen akibat pelat dan momen berat sendiri balok :

$$M_{\text{total}} = M_{\text{pelat}} + M_{\text{bs}}$$

$$M_r = (M_{\text{pelat}} + M_{\text{bs}}) / \phi$$

10. Menentukan asumsi awal bahwa seluruh bagian, baik desak ataupun tarik telah luluh :

$$f'_s = f_y$$

$$f_s = f_y$$

11. Menentukan nilai w dan R , dimana :

$$w = \frac{\rho_l \cdot f_y}{f_c}$$

$$R = w \cdot f_c \cdot (1 - 0,59 \cdot w)$$

12. Tentukan nilai d baru, dimana :

$$db = \sqrt[3]{\frac{M_r \cdot r}{R}}$$

13. Apabila didapat $dp > db$, rencanakan sebagai balok bertulangan sebelah, dan apabila $dp < db$ bertulangan rangkap.

2.6.1. Perencanaan Balok Bertulangan Sebelah

Langkah-langkah perencanaan balok bertulangan sebelah adalah sebagai berikut:

1. Tentukan nilai R baru, dimana :

$$R \text{ baru} = \frac{M_r}{b \cdot dp^2}$$

2. Tentukan nilai m , dimana :

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_c}$$

3. Tentukan besarnya ρ_{perlu} dimana :

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{l}{m} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R \text{ baru}}{f_y}} \right\}$$

4. Hitung luas tulangan (A_s) yang dipakai :

$$A_s = 1,2 \cdot \rho_{\text{perlu}} \cdot b \cdot dp$$

5. Tentukan nilai a , dimana :

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

6. Kontrol nilai M_n yang terjadi harus lebih besar M_r :

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot (dp - 0,5 \cdot a) \geq M_r$$

2.6.2 Perencanaan Balok Bertulangan Rangkap

Langkah-langkah perencanaan balok bertulangan rangkap adalah sebagai berikut :

1. Tentukan luas tulangan 1 (A_{s1}) :

$$A_{s1} = \rho_1 \cdot b \cdot dp$$

2. Tentukan nilai a :

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b}$$

3. Menentukan momen nominal tampang 1 (M_{n1}) :

$$M_{n1} = A_{s1} \cdot f_y \cdot (dp - 0,5 \cdot a)$$

4. Menentukan nilai d' berdasarkan nilai h dan dp , dimana :

$$d' = h - dp$$

5. Menentukan momen nominal keadaan 2, dengan :

$$Mn_2 = Mr - Mn_1$$

6. Dari momen nominal keadaan (2), tentukan luas tulangan 2 (As_2) :

$$As_2 = \frac{Mn_2}{fy \cdot (dp - d')}$$

$$As_2 \text{ pakai} = 1,2 \cdot As_2$$

8. Maka luas tulangan tarik (As) adalah:

$$As = As_1 + As_2$$

9. Tentukan letak garis netral (c) :

$$c = \frac{600}{600 + fy} dp$$

10. Untuk menentukan jenis keruntuhan, ditinjau regangan desak yang terjadi dibandingkan dengan regangan luluh baja :

- a. Regangan luluh baja :

$$\epsilon_y = fy / 200000$$

- b. Regangan desak yang terjadi :

$$\epsilon's = \frac{c - d'}{c} \cdot 0,003$$

Jika $\epsilon_y \leq \epsilon's$ kondisi I (baja telah leleh),

Jika $\epsilon_y > \epsilon's$ kondisi II (baja belum leleh).

Kondisi I : Tulangan Desak Telah Luluh

1. Jika tulangan desak telah luluh, maka :

$$f_s = f_y$$

2. Tentukan nilai a pada kondisi I :

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y - A_{s2} \cdot f_s}{0,85 \cdot f_c \cdot b}$$

3. Tentukan nilai regangan tarik yang terjadi (ϵ_s) :

$$\epsilon_s = \frac{d_p - c}{c} \cdot 0,003$$

4. Kontrol regangan tarik yang terjadi dimana :

Jika $\epsilon_y > \epsilon_s$, kembali ke perencanaan penampang dan penulangan.

Jika $\epsilon_y < \epsilon_s$, kontrol kapasitas momen penampang.

5. Kontrol kapasitas momen yang tampang :

$$M_n = [(A_s \cdot f_y - A_{s2} \cdot f_s) (d_p - 0,5 \cdot a) + A_{s2} \cdot f_s \cdot (d_p - d')] \geq M_r$$

Jika kontrol kapasitas momen tampang tidak aman, kembali ke perencanaan penampang dan penulangan.

Kondisi II : Tulangan Desak Belum Luluh

1. Jika tulangan desak belum luluh :

$$f_s = f_{s2}$$

2. Tentukan nilai $f's_2$, dimana :

$$f's_2 = 200000. \epsilon's$$

3. Tentukan nilai a pada kondisi II :

$$a = \frac{As_1. f_y - As_2. f's_2}{0,85. f_c. b}$$

4. Tentukan nilai regangan tarik yang terjadi (ϵ_s) :

$$\epsilon_s = \frac{0,003. (\beta_1. dp - a)}{a}$$

5. Kontrol regangan tarik yang terjadi dimana :

Jika $\epsilon_y > \epsilon_s$, kembali ke perencanaan penampang dan penulangan.

Jika $\epsilon_y < \epsilon_s$, kontrol kapasitas momen penampang.

6. Kontrol kapasitas momen yang tampang :

$$M_n = [(As. f_y - As_2. f's_2) (dp - 0,5. a) + As_2. f's_2. (dp - d')] \geq M_r$$

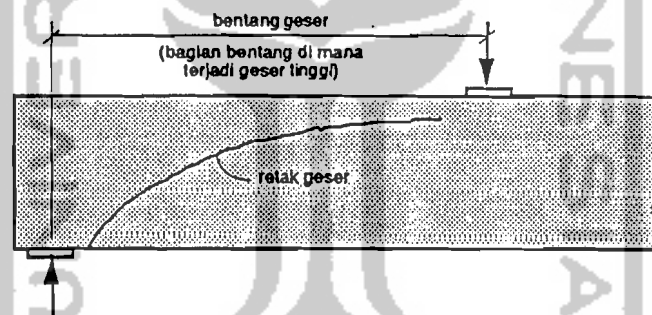
Jika kontrol kapasitas momen tampang tidak aman, kembali ke perencanaan penampang dan penulangan.

2.7. Perencanaan Penulangan Geser Lentur Balok Persegi

Dasar pemikiran perencanaan penulangan geser atau penulangan geser badan balok adalah usaha menyediakan sejumlah tulangan baja untuk menahan gaya tarik arah tegak lurus terhadap retak tarik diagonal sedemikian rupa sehingga mampu mencegah retak lebih lanjut. Berdasarkan atas pemikiran tersebut dan

juga memperhatikan pola retak seperti tergambar pada Gambar 2.8 , penulangan geser dapat dilakukan beberapa cara seperti :

1. sengkang vertikal,
2. jaringan kawat baja las yang dipasang tegak lurus terhadap sumbu aksial,
3. sengkang miring atau diagonal,
4. batang tulangan miring diagonal yang dapat dilakukan dengan cara membengkokkan batang tulangan pokok balok di tempat-tempat yang diperlukan,
5. tulangan spiral.



Gambar 2.8 Kerusakan tipikal akibat tarik diagonal

Perencanaan geser untuk komponen-komponen struktur terlentur didasarkan pada anggapan bahwa beton menahan sebagian dari gaya geser, sedangkan kelebihanannya atau kekuatan geser diatas kemampuan beton untuk menahannya dilimpahkan kepada baja tulangan geser. Cara yang lebih umum digunakan dan lebih sering dipakai untuk penulangan geser adalah dengan menggunakan sengkang, dimana selain pemasangannya lebih mudah juga menjamin ketepatan pemasangannya. Penulangan dengan sengkang hanya memberikan andil sebagian

pertahanan geser, karena formasi atau arah retak yang miring. Tetapi bagaimanapun, cara penulangan demikian terbukti mampu memberikan sumbangan untuk peningkatan kuat geser ultimit komponen struktur yang mengalami lenturan.

Untuk komponen-komponen struktur yang menahan geser dan lentur saja, persamaan (3.4-3) SK SNI T-15-1991-03 memberikan kapasitas kemampuan beton (tanpa penulangan geser) untuk menahan gaya geser adalah V_c ,

$$V_c = (1/6 \cdot \sqrt{f'_c}) b \cdot d$$

Di dalam peraturan juga menyatakan bahwa meskipun secara teoritis tidak perlu penulangan geser apabila $V_u \leq \phi \cdot V_c$, akan tetapi peraturan mengharuskan untuk selalu menyediakan penulangan geser minimum pada semua bagian struktur yang mengalami lenturan (meskipun menurut perhitungan tidak memerlukannya). Kuat geser ideal geser beton dikenakan faktor reduksi kekuatan $\phi = 0,6$ sehingga menjadi kuat geser beton.

Ketentuan penulangan geser minimum tersebut terutama untuk menjaga agar apabila timbul beban yang tidak terduga pada komponen struktur yang mungkin akan mengakibatkan kerusakan geser. Pada tempat dimana diperlukan tulangan geser minimum, jumlah luasnya ditentukan dengan persamaan (3.4-14) SK SNI T-15-1991-03 sebagai berikut :

$$A_v = \frac{1}{3} \frac{b \cdot s}{f_y}$$

dimana :

A_v = luas penampang tulangan geser total dengan jarak antar spasi tulangan s (mm^2)

b = lebar balok (mm)

s = jarak pusat ke batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok memanjang (mm)

f_y = kuat luluh tulangan geser (Mpa)

Untuk memperjelas perencanaan tulangan geser lentur, dapat dilihat langkah-langkah di bawah ini :

1. Data-data yang diperlukan untuk perencanaan penulangan geser lentur :
 - a. Kuat desak beton (f'_c)
 - b. Kuat tarik baja (f_y)
 - c. Lebar balok (b)
 - d. Tinggi balok (h)
 - e. Faktor reduksi kuat bahan ($\phi = 0,6$)
 - f. Tinggi efektif balok (d)
 - g. Bentang balok (L)
 - h. Diameter tulangan sengkang (D)
2. Tentukan besarnya gaya geser maksimum atau $V_u \text{ mak}$ (dari mekani - ka) :

$$V_u \text{ mak} = V_u \text{ pelat} + V_u \text{ berat sendiri}$$

3. Menentukan kapasitas kuat geser beton (V_c) :

$$V_c = (1/6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d)$$

4. Tentukan luas tulangan sengkang (A_v) :

$$A_v = 2 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2$$

5. Menentukan kuat geser nominal tulangan (V_s) :

$$V_s = \frac{V_{u \text{ mak}}}{\phi} - V_c$$

6. Menetapkan perlu tidaknya tulangan geser dengan pemeriksaan terhadap nilai V_u :

$$V_{u \text{ mak}} > 1/2 \cdot \phi \cdot V_c$$

Jika nilai :

$V_{u \text{ mak}} > 1/2 \cdot \phi \cdot V_c$, diperlukan tulangan sengkang.

$V_{u \text{ mak}} < 1/2 \cdot \phi \cdot V_c$, tidak diperlukan tulangan sengkang.

2.7.1 Perencanaan Jika Secara Teori Tidak Dibutuhkan Tulangan sengkang

1. Meskipun secara teori tidak dibutuhkan sengkang, untuk menjaga bila timbulnya beban yang tidak terduga, menurut SK SNI diperlukan tulangan geser minimum.
2. Menentukan jarak sengkang (S) :
 - a. Jika $V_s \geq 1/3 \cdot f'_c \cdot b \cdot d$;
 - (i) $S = 1/4 \cdot d$

$$(ii) S = 600 \text{ mm},$$

$$(iii) S = \frac{3 \cdot Av \cdot fy}{b}$$

dari point (i), (ii), dan (iii) ambil yang terkecil.

b. Jika $V_s < 1/3 \cdot f'c \cdot b \cdot d$;

$$(i) S = 1/2 \cdot d$$

$$(ii) S = 300 \text{ mm}$$

$$(iii) S = \frac{3 \cdot Av \cdot fy}{b}$$

dari point (i), (ii), dan (iii) ambil yang terkecil.

3. Tentukan luas penampang tulangan geser total (A_{vt}):

$$n = (0,5 \cdot L) / S$$

$$A_{vt} = n \cdot Av$$

2.7.2 Perencanaan jika dibutuhkan tulangan sengkang :

1. Kontrol nilai V_s :

Jika :

$$V_s < (4/6) \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d \longrightarrow \text{dimensi bisa dipakai}$$

$$V_s > (4/6) \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d \longrightarrow \text{dimensi tidak aman}$$

2. Tentukan panjang bentang kritis :

$$L_{kritis} = d$$

3. Tentukan kuat geser penampang kritis (V_{sk}) :

$$V_{sk} = V_s$$

4. Tentukan spasi sengkang pada penampang kritis (S_{kr}) :

$$S_{kr} = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{b}$$

5. Kontrol nilai S_{kr} terhadap spasi minimum :

Jika :

$S_{kr} < 50 \text{ mm}$ → perbesar diameter sengkang

$S_{kr} > 50 \text{ mm}$ → kontrol S_{kr} terhadap S_{mak}

6. Kontrol S_{kr} terhadap spasi maksimum :

- a. Jika $V_{sk} \geq 1/3 \cdot f_c \cdot b \cdot d$;

(i) $S = 1/4 \cdot d$

(ii) $S = 600 \text{ mm}$,

(iii) $S = \frac{3 \cdot A_v \cdot f_y}{b}$

dari point (i), (ii), dan (iii) ambil yang terkecil.

$$S_{maksimum} = S$$

- b. Jika $V_{sk} < 1/3 \cdot f_c \cdot b \cdot d$;

(i) $S = 1/2 \cdot d$

(ii) $S = 300 \text{ mm}$

$$(iii) S = \frac{3 \cdot Av \cdot fy}{b}$$

dari point (i), (ii), dan (iii) ambil yang terkecil.

$$S_{maksimum} = S$$

Jika :

$S_{kr} > S_{mak}$ \longrightarrow spasi sengkang kritis dan non kritis sama

$S_{kr} < S_{mak}$ \longrightarrow bagi menjadi beberapa daerah pada non -
kritis

Perencanaan jika $S_{kr} > S_{mak}$:

1. Hitung banyaknya sengkang (n) :

$$n = (0,5 \cdot L) / S_{mak}$$

2. Hitung luas total tulangan sengkang (A_{vt}) :

$$A_{vt} = n \cdot A_v$$

Perencanaan jika $S_{kr} < S_{mak}$:

1. Hitung banyaknya sengkang pada daerah kritis (n) :

$$n_{kr} = d / S_{kr}$$

2. Hitung luas tulangan sengkang pada daerah kritis (A_{vk}) :

$$A_{vk} = n_{kr} \cdot S_{kr}$$

3. Tentukan panjang bentang daerah non kritis (Z) :

$$Z = 0,5 \cdot L - d$$

4. Bagi bentang non kritis menjadi r daerah.

5. Tentukan panjang masing - masing daerah (x) :

$$x = Z / r$$

6. Hitung spasi sengkang pada masing - masing daerah :

$$S_r = \frac{A_v \cdot f_y \cdot x}{[V_s - \{(d/0,5.L) \cdot V_s + (r-1)(x/0,5.L) \cdot V_s\}]}$$

$$S_1 = \frac{A_v \cdot f_y \cdot x}{[V_s - \{(d/0,5.L) \cdot V_s\}]}$$

$$S_2 = \frac{A_v \cdot f_y \cdot x}{[V_s - \{(d/0,5.L) \cdot V_s + (x/0,5.L) \cdot V_s\}]}$$

dst

7. Hitung banyaknya sengkang pada masing-masing daerah (Pr) :

$$Pr = x / S_r$$

8. Hitung luas tulangan sengkang pada daerah non kritis (Avnk) :

$$Avnk = Pr \cdot A_v$$

9. Hitung luas tulangan total :

$$A_v \text{ total} = A_vk + Avnk$$

2.8. Perencanaan Penulangan Torsi

Ketentuan perencanaan tulangan torsi diberikan dalam SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.4.6. Apabila komponen struktur membutuhkan penulangan torsi maka harus dipasang tulangan baja yang merupakan tambahan terhadap penulangan yang sudah ada yakni penulangan untuk menahan gaya geser, lentur atau gaya

aksial. Penulangan yang diperlukan untuk menahan gaya torsi pemasangannya dapat dikombinasikan dengan yang diperlukan untuk menahan gaya-gaya yang lain asalkan luas penampang tulangan total yang terpasang merupakan jumlah dari masing-masing kebutuhan penulangan yang perlu untuk menahan gaya-gaya tersebut, dan juga memenuhi persyaratan terberat untuk spasi dan penempatan penulangannya. Tulangan torsi terdiri dari sengkang tertutup, sengkang pengikat tertutup, atau lilitan spiral, yang dikombinasikan dengan tulangan memanjang. Kuat momen torsi T_s tidak boleh melebihi $4 T_c$.

Dengan cara memperlakukan sama seperti pada waktu merencanakan penulangan untuk menahan gaya geser, penulangan torsi harus didasarkan pada :

$$T_u \leq \phi \cdot T_n$$

dimana : $T_n = T_c + T_s$

T_c = kuat momen torsi nominal yang disumbangkan oleh beton

T_s = kuat momen torsi nominal yang disumbangkan oleh tulangan torsi

Untuk memperjelas perencanaan tulangan geser puntir, dapat dilihat langkah - langkah di bawah ini :

1. Data-data yang diperlukan untuk perencanaan penulangan geser lentur :
 - a. Kuat desak beton (f'_c)
 - b. Kuat tarik baja (f_y)
 - c. Lebar balok (b)

d. Faktor reduksi kuat bahan ($\phi = 0,6$)

e. Tinggi efektif balok (d)

f. Tinggi balok (h)

2. Tentukan tegangan geser maksimum ($V_u \text{ mak}$) dari mekanika :

$$V_u \text{ mak} = V_u \text{ pelat} + V_u \text{ berat sendiri}$$

3. Tentukan momen torsi (T_u) dari mekanika :

$$T_u = M \text{ pelat}$$

4. Tentukan besarnya momen torsi nominal (T_n) :

$$T_n = T_u / \phi$$

5. Tentukan besarnya nilai $\Sigma x^2 y$:

$$\Sigma x^2 y = b^2 \cdot h$$

6. Kontrol apakah diperlukan tulangan torsi :

Jika :

$$T_u > \phi \cdot (1/24 \cdot \sqrt{f_c} \cdot \Sigma x^2 y) \quad \text{perlu tulangan torsi}$$

$$T_u < \phi \cdot (1/24 \cdot \sqrt{f_c} \cdot \Sigma x^2 y) \quad \text{tidak perlu tulangan torsi}$$

7. Tentukan besarnya nilai C_t :

$$C_t = \frac{b \cdot d}{\Sigma x^2 y}$$

8. Tentukan besarnya kuat torsi nominal (T_c) badan beton :

$$T_c = \frac{(1/15 \cdot \sqrt{f_c}) \cdot \Sigma x^2 y}{\sqrt{1 + \left[\frac{0,4 V_u}{C_t \cdot T_u} \right]^2}}$$

9. Tentukan besarnya kuat torsi nominal (T_s) tulangan :

$$T_s = T_n - T_c$$

10. Kontrol besarnya nilai T_s :

Jika :

$$T_s < 4 \cdot T_c \rightarrow \text{penampang aman}$$

$$T_s > 4 \cdot T_c \rightarrow \text{perbesar dimensi penampang.}$$

11. Tentukan diameter tulangan yang dipakai (\emptyset tul) :

12. Tentukan besarnya nilai x_1 dan y_1 :

$$x_1 = b - 2(40 + 1/2 \cdot \emptyset \text{ tul.})$$

$$y_1 = h - 2(40 + 1/2 \cdot \emptyset \text{ tul.})$$

13. Tentukan besarnya nilai α_1 :

$$\alpha_1 = 1/3 \cdot (2 + y_1/x_1) < 1,5$$

jika $\alpha_1 > 1,5$ pakai $\alpha_1 = 1,5$

14. Tentukan besarnya nilai A_t/s dalam ($\text{mm}^2 / \text{mm jarak} / \text{kaki}$) :

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_s}{\alpha_1 \cdot x_1 \cdot y_1 \cdot f_y}$$

15. Rencanakan sengkang geser :

$$V_c = \frac{1/6 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b \cdot d}{\sqrt{1 + \left[2,5 \cdot C_t \cdot \frac{T_u}{V_u} \right]^2}}$$

16. Tentukan besarnya gaya geser yang harus dipikul oleh sengkang (V_s) :

$$V_s = (V_u / \phi) - V_c$$

17. Tentukan besarnya A_v / s dalam (mm^2 / mm jarak / dua kaki) :

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y \cdot d}$$

18. Rencanakan sengkang tertutup gabungan untuk torsi dan geser :

$$\frac{A_{vt}}{s} = \frac{2 \cdot A_t}{s} + \frac{A_v}{s}$$

19. Tentukan besarnya luas tulangan yang dipakai A_s :

$$A_s = 2 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \phi_{tul}^2$$

20. Tentukan besarnya spasi sengkang (s) :

$$s = \frac{A_s}{\frac{A_{vt}}{s}}$$

21. Kontrol spasi sengkang (s) terhadap spasi minimum :

Jika :

$s < 50 \text{ mm} \rightarrow$ perbesar ϕ_{tul}

$s > 50 \text{ mm} \rightarrow$ kontrol terhadap spasi maksimum ijin

22. Kontrol spasi sengkang terhadap spasi maksimum :

$$s_{\text{mak}} = 1/4 \cdot (x_1 + x_2)$$

Jika :

$$s > s_{\text{mak}} \longrightarrow s_{\text{pakai}} = s_{\text{mak}}$$

$$s < s_{\text{mak}} \longrightarrow s_{\text{pakai}} = s$$

23. Hitung luas tulangan sengkang total yang dipakai (A_{vt}) :

$$A_{vt} = n \cdot A_s$$

dimana :

$$n = (0,5 L) / s_{\text{pakai}}$$

24. Tentukan besarnya tulangan torsi memanjang (A_l) :

$$A_l = (2 \cdot A_t / s) (x_1 + y_1)$$

2.9 Lendutan

Pada SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.1 mensyaratkan bahwa setiap komponen struktur harus memiliki cukup kekuatan struktural untuk mendukung beban rencana berfaktor yang bekerja padanya. Atau dengan kata lain, struktur dan segenap komponennya harus direncanakan sehingga penampangnya mempunyai rencana minimum sama dengan kuat perlu yang dihitung berdasarkan kombinasi beban dan gaya terfaktor yang sesuai. Di samping itu komponen struktur harus memenuhi kemampuan kelayakan pada tingkat beban kerja dan lendutan. Semua lendutan dihitung dengan menggunakan formula standar atau cara hitungan lain yang dapat diterima tidak boleh melebihi nilai lendutan ijin maksimum yang dapat ditetapkan tabel 3.2.5.b SK SNI.

2.9.1 Lendutan Seketika

Lendutan seketika pada komponen struktur terjadi apabila segera setelah beban bekerja seketika itu pula terjadi lendutan. Untuk memperhitungkannya komponen struktur dianggap berperilaku elastis sepenuhnya. Pada SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.5 ayat 2.3 ditetapkan bahwa lendutan seketika dihitung dengan menggunakan nilai momen inersia efektif I_e berdasarkan persamaan berikut ini :

$$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M_a} \right]^3 I_g + \left[1 - \left[\frac{M_{cr}}{M_a} \right]^3 \right] I_{cr} \leq I_g$$

dimana :

I_e = momen inersia efektif

I_{cr} = momen inersia penampang ratak transformasi

I_g = momen inersia penampang utuh terhadap sumbu berat penampang, seluruh batang tulangan diabaikan

M_a = momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung

M_{cr} = momen pada saat timbul retak yang pertama kali.

M_{cr} dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_t}$$

dimana :

f_r = modulus retak beton, untuk beton berat normal $f_r = 0,7\sqrt{f_c}$

y_t = jarak garis netral penampang utuh keserat tepi tertarik.

Lendutan komponen struktur merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan dan kondisi ujung (bentang sederhana, menerus, atau jepit), jenis beban (terpusat, merata), dan kekakuan lentur komponen (EI).

Lendutan maksimum adalah :

$$\Delta_{\text{maks}} = \frac{KW (ln)^3}{48. E_c . I_{cr}}$$

dimana :

W = beban total disepanjang bentang,

ln = panjang bentang bersih,

E_c = modulus elastisitas beton,

I_{cr} = momen inersia penampang retak,

K = faktor tingkat kekakuan tumpuan.

Persamaan tersebut juga dapat dinyatakan dalam momen lentur sehingga lendutan setiap tempat pada balok dapat dihitung sebagai berikut :

$$\Delta_{\text{maks}} = \frac{KM (ln)^3}{48. E_c . I_e}$$

di mana :

M = momen yang bekerja tepat pada penampang yang ditinjau,

I_e = momen inersia efektif.

2.9.2 Lendutan Jangka Panjang

Pada komponen struktur beton bertulang, disamping terjadi lendutan seketika, akan mengalami pula lendutan yang timbul secara berangsur - angsur dalam jangka waktu cukup lama. Lendutan tersebut terutama disebabkan oleh sifat atau perilaku rayapan dan susut pada bahan beton, yang mengakibatkan bertambahnya regangan. Dengan sendirinya bertambahnya regangan mengakibatkan perubahan distribusi tegangan pada beton dan tulangan baja sehingga lendutan juga bertambah untuk beban yang bersifat menetap. Selanjutnya, lendutan tersebut dinamakan “ lendutan jangka panjang” , dan dihitung berdasarkan atas dua hal yaitu :

1. besarnya beban mati dan hidup yang menetap,
2. rasio perbandingan tulangan desak terhadap tulangan tarik pada balok.

Nilai lendutan dinyatakan dalam perkalian suatu faktor dengan lendutan seketika yang disebabkan oleh beban menetap.

$$\Delta_{LT} = \Delta_1 \cdot \lambda = \Delta_1 \cdot \left\{ \frac{\xi}{1 + 50 \rho'} \right\}$$

dimana :

Δ_{LT} = lendutan jangka panjang

Δ_1 = lendutan seketika disebabkan oleh beban yang menetap.

ξ = konstanta ketergantungan waktu untuk beban tetap , ditetapkan sebagai berikut :

untuk 5 tahun atau lebih $\xi = 2,0$

12 bulan $\xi = 1,4$

6 bulan $\xi = 1,2$

3 bulan $\xi = 1,0$

$\rho' = As' / bd$, rasio penulangan tekan komponen nonpratekan adalah nilai ditengah bentang untuk balok dua tumpuan dan menerus, pada tumpuan untuk kantilever.

Karena beban hidup tidak selalu bekerja disepanjang waktu, yang diperhitungkan hanya sebagian beban hidup yang dianggap sebagai beban menetap, disamping beban mati yang memang bersifat permanen. Sehingga lendutan total jangka panjang diperhitungkan sebagai berikut :

$$\Delta_{LT} = \Delta_{LL} + \lambda(\infty) \cdot \Delta_{DL} + \lambda(t) \cdot \Delta_{SL}$$

dimana , Δ_{LL} = lendutan seketika akibat beban hidup,

Δ_{DL} = lendutan seketika akibat beban mati,

Δ_{SL} = lendutan akibat sebagian beban hidup yang menetap,

nilainya tergantung pada besar dan lama waktu bekerjanya,

$\lambda(\infty)$ = faktor pengali untuk beban menetap selama tak terhingga,

$\lambda(t)$ = faktor pengali beban menetap dalam waktu tertentu.

Untuk memperjelas apakah lendutan aman, dapat dilihat langkah-langkah di bawah ini :

1. Data-data yang diperlukan untuk kontrol lendutan :
 - a. Kuat desak beton (f^c)
 - b. Kuat tarik baja (f_y)
 - c. Lebar balok (b)
 - d. Bentang balok (L_n)
 - e. Tinggi efektif balok (d)
 - f. Tinggi balok (h)
 - g. Momen beban kerja mati + berat sendiri (M_{DL}) dan momen beban kerja hidup (M_{LL})
 - h. Luas tulangan (A_s)
 - i. Angka ekivalensi (n), ditetapkan berdasarkan f^c
 - j. Konstanta ketergantungan waktu (ξ)
2. Tentukan besarnya luas tulangan setelah di transformasi ($n \cdot A_s$)
3. Tentukan letak garis netral (y) :

Jika :

- a. Tulangan sebelah :

$$y = \frac{n \cdot A_s}{b} \left[\sqrt{\left\{ 1 + \frac{2 \cdot b \cdot d}{n \cdot A_s} \right\} - 1} \right]$$

$$I_{cr} = 1/3 \cdot b \cdot y^3 + n \cdot A_s \cdot (d - y)^2$$

- b. Tulangan rangkap :

$$y = 0,5 \cdot b \cdot y^2 + n \cdot A_s' \cdot y - n \cdot A_s' \cdot d' - n \cdot A_s \cdot d + n \cdot A_s \cdot y = 0$$

$$I_{cr} = 1/3 \cdot b \cdot y^3 + n \cdot A_s \cdot (d - y)^2$$

4. Tentukan momen inersia penampang utuh (I_g) :

$$I_g = 1/12. b. h^3$$

5. Tentukan besarnya momen pada saat timbul retak pertama kali (M_{cr}) :

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_t}$$

dimana : $y_t = 1/2. h$

6. Tentukan perbandingan M_{cr} / M_a :

Jika ditentukan kondisi beban hidup, misalnya 60% beban hidup terus bekerja selama n bulan atau tahun, bagi keadaan menjadi 2 kondisi :

- a. Kondisi I (beban mati + beban hidup) :

$$Mk_I = \frac{M_{cr}}{(M_{DL} + M_{LL})}$$

- b. Kondisi II (beban mati + 60 % beban hidup)

$$Mk_{II} = \frac{M_{cr}}{(M_{DL} + 0,6. M_{LL})}$$

7. Tentukan besarnya momen inersia efektif kedua kondisi tersebut :

a. Kondisi I : $I_{e1} = Mk_I^3 \cdot I_g + \{ 1 - Mk_I^3 \} \cdot I_{cr}$

a. Kondisi II : $I_{e2} = Mk_{II}^3 \cdot I_g + \{ 1 - Mk_{II}^3 \} \cdot I_{cr}$

8. Tentukan besarnya lendutan seketika (jika kondisi tumpuan jepit elastis) :

$$\Delta_{DL} = \frac{1}{48} \frac{M_{DL} \cdot Ln^2}{Ec \cdot I_g}$$



$$\Delta_{LL} = \frac{1}{48} \frac{(M_{DL} + M_{LL}) \cdot L_n^2}{E_c \cdot I_{e1}} - \Delta_{DL}$$

$$\Delta_{SL} = \frac{1}{48} \frac{(M_{DL} + 0,6 \cdot M_{LL}) \cdot L_n^2}{E_c \cdot I_{e2}} - \Delta_{DL}$$

9. Tentukan besarnya lendutan jangka panjang :

$$\Delta_{LT} = \Delta_{LL} + \lambda(\infty) \cdot \Delta_{DL} + \lambda(t) \cdot \Delta_{SL}$$

dimana :

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50 \rho'}$$

10. Periksa terhadap persyaratan lendutan :

$$\Delta_{LL} < L_n / 180$$

$$\Delta_{LL} < L_n / 360$$

$$\Delta_{LT} < L_n / 240$$

2.10. Flow Chart

Flow chart adalah metode yang digunakan untuk menyusun tahap-tahap suatu pekerjaan atau perencanaan dalam bentuk diagram. Sehingga dengan menggunakan flow chart ini diharapkan bisa lebih memahami langkah-langkah yang telah diuraikan secara diskriptif sebelumnya, baik perencanaan balok persegi terlentur, perencanaan penulangan geser lentur, perencanaan penulangan puntir, kontrol lendutan. Flow Chart untuk perencanaan tersebut digunakan untuk menyusun program komputer dan dapat dilihat pada lampiran.