

## **BAB V**

### **BALOK PERSEGI DAN PLAT BERTULANGAN TARIK**

#### **5. 1. PENDAHULUAN**

Apabila suatu gelagar balok bentang sederhana menahan beban yang mengakibatkan timbulnya momen lentur, akan terjadi deformasi (regangan) lentur di dalam balok tersebut. Pada kejadian momen lentur positif, regangan tekan terjadi di bagian atas dan regangan tarik terjadi di bagian bawah dari penampang. Regangan-regangan tersebut mengakibatkan timbulnya tegangan-tegangan yang harus ditahan oleh balok, tegangan tekan di sebelah atas dan tegangan tarik di bagian bawah. Agar stabilitasnya terjamin, batang balok sebagai bagian dari sistem yang menahan lentur harus kuat untuk menahan tegangan tekan dan tarik tersebut. Untuk memperhitungkan kemampuan dan kapasitas dukung komponen struktur beton terlentur (balok, plat, dinding, dan sebagainya), sifat utama bahwa bahan beton kurang mampu menahan tegangan tarik akan menjadi dasar pertimbangan. Dengan cara memperkuat dengan batang tulangan baja pada daerah dimana tegangan tarik bekerja akan didapat apa yang dinamakan struktur beton bertulang. Apabila dirancang dan dilaksanakan dengan cara yang saksama struktur beton bertulang dengan susunan bahan seperti tersebut di atas akan memberikan kemampuan yang dapat diandalkan untuk menahan lenturan.

Karena tulangan baja dipasang di daerah tegangan tarik bekerja, di dekat serat terbawah, maka secara teoritis balok disebut sebagai bertulangan baja tarik saja. Harap dicatat bahwa di bagian tekan suatu penampang umumnya juga dipasang perkuatan tulangan, akan tetapi dengan pengertian mekanisme yang berbeda seperti yang akan dibahas lebih lanjut di belakang. Kecuali itu, agar penulangan membentuk suatu kerangka kokoh yang stabil umumnya pada masing-masing sudut komponen perlu dipasangi tulangan baja.

## 5. 2. 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 geometris penampang komponen struktur. Proses perencanaan atau analisis umumnya dimulai dengan memenuhi persyaratan terhadap lentur, kemudian baru segi-segi lainnya, seperti kapasitas geser, defleksi, retak, dan panjang penyaluran, dianalisis sehingga keseluruhannya memenuhi syarat.

Seperti diketahui, untuk bahan yang bersifat serba sama dan elastis, distribusi regangan maupun tegangannya linear berupa garis lurus dari garis netral ke nilai maksimum di serat tepi terluar. Dengan demikian nilai tegangannya berbanding lurus dengan nilai nilai regangan dan hal tersebut berlaku sampai dengan dicapainya batas sebanding (proportional limit). Untuk bahan baja dengan mutu yang umum digunakan sebagai komponen struktural, nilai batas sebanding dengan nilai tegangan luluh letaknya berdekatan hampir berimpit, dan nilai tegangan lentur ijin didapat dengan cara membagi tegangan luluh dengan faktor aman. Pada struktur kayu, nilai tegangan lentur ijin didapatkan dengan cara lebih langsung dengan menggunakan faktor aman pembagi terhadap tegangan lentur patah. Dengan menggunakan cara penetapan tegangan lentur ijin seperti tersebut, yang di dasarkan pada anggapan hubungan linier antara tegangan dan regangan, analisis serta perencanaan struktur kayu dan baja dapat dilakukan. Dengan demikian mengikuti sepenuhnya sesuai dengan teori elastisitas.

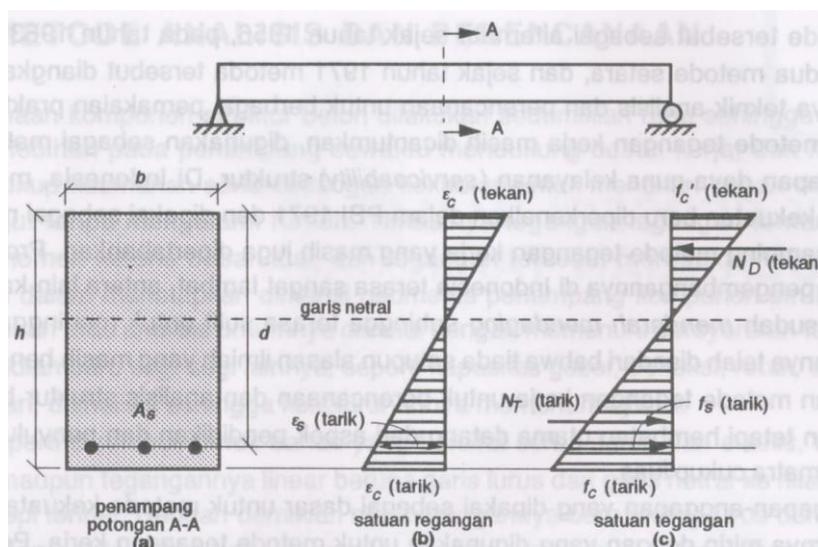
Meskipun disadari bahwa pada kenyataannya bahan beton bersifat tidak serba sama (non homogeneous) dan tidak sepenuhnya elastik, selama ini cara pendekatan linier juga digunakan dan dianggap benar bagi bahan beton. Selama kurun waktu cukup lama perencanaan serta analisis didasarkan pada

pemahaman tersebut dan dinamakan sebagai metode elastik, cara-n, atau metode tegangan kerja (Working Stress Design Method, WSD Method).

Sejak jangka waktu 30 tahun belakangan ini telah dikenal metode pendekatan lain yang lebih realistis, ialah bahwa hubungan sebanding antara tegangan dan regangan dalam beton terdesak hanya berlaku sampai pada suatu batas keadaan pembebanan tertentu, yaitu pada tingkat beban sedang. Pendekatan ini dinamakan metode perencanaan kekuatan (Ultimate Strength Design Method, USD Method) atau metode perencanaan kuat unlimited. Metode tersebut mulai dikenal sejak tahun 60-an, sejak dimuat di dalam peraturan beton di beberapa negara. ACI Building Code, misalnya, telah mengenal baik dan memuat metode tersebut sebagai alternatif sejak tahun 1956, pada tahun 1963 memperlakukan kedua metode setara, dan sejak tahun 1971 metoda tersebut diangkat menjadi satu-satunya teknik analitis dan perencanaan untuk berbagai pemakaian praktis. Walau demikian, metode tegangan kerja masih dicantumkan, digunakan sebagai metode alternatif penetapan daya guna kelayakan (service ability) struktur. Di Indonesia, metode perencanaan kekuatan baru diperkenalkan dalam PBI 1971 dan dipakai sebagai metode alternatif di samping metode tegangan kerja yang masih juga dipertahankan. Proses perubahan dan pengembangannya di Indonesia terasa sangat lambat, antara lain karena metode lama sudah mendarah daging sehingga terasa sulit untuk meninggalkannya. Sesungguhnya telah disadari bahwa tiada satupun alasan ilmiah yang masih hendak mempertahankan metode tegangan kerja untuk perencanaan dan analisis struktur beton bertulang, akan tetapi hambatan utama datang dari aspek pendidikan dan penyuluhan yang mencakup matra luas.

Anggapan-anggapan yang dipakai sebagai dasar untuk metode kekuatan (unlimited) pada dasarnya mirip dengan yang digunakan untuk metode tegangan kerja. Perbedaannya terletak pada kenyataan yang didapat dari berbagai hasil penelitian yang menunjukkan bahwa tegangan beton tekan kira-kira sebanding dengan regangannya hanya sampai pada tingkat pembebanan tertentu. Pada tingkat pembebanan ini, apabila beban ditambah terus, keadaan sebanding akan lenyap dan diagram tegangan tekan pada penampang balik beton akan berbentuk setara dengan kurva tegangan-regangan beton tekan seperti terlihat

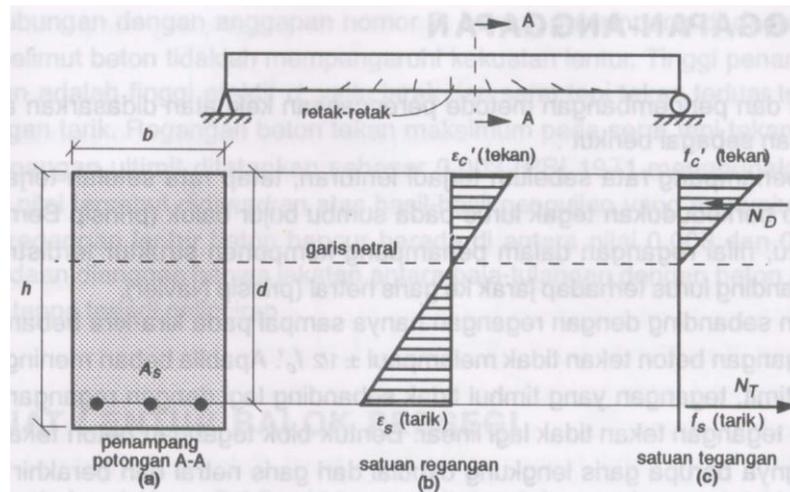
pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.2. Pada metode tegangan kerja, beban yang diperhitungkan adalah service load (beban kerja), sedangkan penampang komponen struktur direncana atau dianalisa berdasarkan pada nilai tegangan tekan lentur ijin yang umumnya ditentukan bernilai  $0.45 f_c'$ , dimana pola distribusi tegangan tekan linier atau sebanding lurus dengan jarak terhadap garis netral. Sedangkan pada metode kekuatan (unlimit), service loads diperbesar, dikalikan suatu faktor beban dengan maksud untuk memperhitungkan terjadinya beban pada saat keruntuhan telah di ambang pintu. Kemudian dengan menggunakan beban kerja yang sudah diperbesar (beban terfaktor) tersebut, struktur direncana sedemikian sehingga didapat nilai kuat guna pada saat runtuh besarnya kira-kira lebih kecil sedikit dari kuat batas runtuh sesungguhnya. Kekuatan pada saat runtuh tersebut dinamakan kuat unlimit dan beban yang bekerja pada atau dekat dengan saat runtuh tersebut dinamakan beban unlimit. Kuat rencana penampang komponen struktur didapatkan melalui perkalian kuat teoritis atau kuat nominal dengan faktor kapasitas yang dimaksudkan untuk memperhitungkan kemungkinan buruk yang berkaitan dengan faktor-faktor bahan, tenaga kerja, ukuran-ukuran, dan pengendalian mutu pekerjaan pada umumnya. Kuat teoretis atau kuat nominal diperoleh berdasarkan pada keseimbangan statis dan kesesuaian regangan-tegangan yang linear di dalam penampang komponen tertentu.



**Gambar 5.1. Perilaku lentur pada beban kecil**

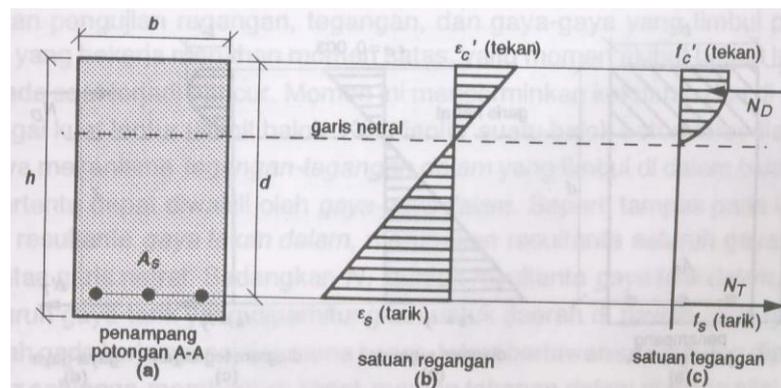
Untuk membahas metode kekuatan lebih lanjut, berikut ini diberikan tinjauan ulang perilaku balok beton bertulang bentangan sederhana untuk memikul beban yang berangsur meningkat dari mula-mula kecil sampai pada suatu tingkat pembebanan yang menyebabkan hancurnya struktur.

Pada beban kecil, dengan menganggap belum terjadi retak beton, secara bersama-sama beton dan baja tulangan bekerja menahan gaya-gaya di mana gaya tekan ditahan oleh beton saja. Distribusi tegangan akan tampak seperti pada Gambar 5.1 dimana distribusi tegangannya linear, bernilai nol pada garis netral dan sebanding dengan regangan yang terjadi. Kasus demikian ditemui bila tegangan maksimum yang timbul pada serat tarik masih cukup rendah, nialinya masih di bawah modulus of rupture. Pada beban sedang, kuat tarik beton dilampaui dan beton mengalami retak rambut seperti tampak pada Gambar 5. 2. Karena beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak, karena terputus-putus, baja tulangan akan mengambil alih memikul seluruh gaya tarik yang timbul. Distribusi tegangan untuk penampang pada atau dekat bagian yang retak tampak seperti pada Gambar 5.2, dan hal yang demikian diperkirakan akan terjadi pada nilai tegangan beton sampai dengan  $1/2f_c'$  . Pada keadaan tersebut tegangan beton tekan masih dianggap bernilai sebanding dengan nilai regangannya. Pada beban yang lebih besar lagi, nilai regangan serta tegangan tekan akan meningkat dan cenderung untuk tidak lagi sebanding antara keduanya, dimana tegangan beton tekan akan membentuk kurva non linear. Kurva tegangan di atas garis netral (daerah tekan) berbentuk sama dengan kurva tegangan-regangan beton seperti tergambar pada Gambar 5.3.



**Gambar 5.3. Perilaku lentur pada beban sedang**

Pada Gambar 5.3 dapat dilihat distribusi tegangan dan regangan yang timbul pada atau dekat keadaan pembebanan unlimit, dimana apabila kapasitas batas kekuatan beton terlampaui dan tulangan baja mencapai luluh, balok mengalami hancur. Sampai dengan tahap ini, tampak bahwa tercapainya kapasitas unlimit merupakan proses yang tidak dapat berulang. Komponen struktur telah retak dan tulangan baja meluluh, mulur, terjadi lendutan besar, dan tidak akan dapat kembali ke panjang semula. Bila komponen lain dari sistem mengalami hal yang sama, mencapai kapasitas unlimitnya, struktur secara keseluruhan akan remuk dalam strata runtuh atau setengah runtuh meskipun belum hancur secara keseluruhan. Walaupun tidak dapat dijamin sepenuhnya untuk dapat terhindar dari keadaan tersebut, namun dengan menggunakan beberapa faktor aman maka tercapainya keadaan unlimit dapat diperhitungkan serta dikendalikan.



Gambar 5.4. Perilaku lentur dekat beban unlimit

### 5. 3. ANGGAPAN-ANGGAPAN

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 (prinsip Bernoulli). Oleh karena itu, nilai regangan dalam penampang komponen struktur terdistribusi linier atau sebanding lurus terhadap jarak ke garis netral (prinsip Navier)
- 2) Tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai pada kira-kira beban sedang, dimana tegangan beton tekan tidak melampaui  $\pm 1/2 \cdot f_c'$ . Apabila beban meningkat sampai beban unlimit, 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 kedalam.
- 3) Dalam memperhitungkan letak resultan gaya tarik yang bekerja pada tulangan baja, baja tulangan dianggap teregang secara serempak dengan nilai regangan diukur pada pusat beratnya. Apabila regangan baja tulangan ( $\epsilon_s$ ) belum mencapai luluh ( $\epsilon_y$ ), nilai tegangan baja tulangan adalah  $E_s f_s$ . Hal yang demikian menganggap bahwa untuk tegangan baja tulangan yang belum mencapai  $f_y$ , maka tegangan sebanding dengan regangannya sesuai hukum Hooke. Sedangkan untuk regangan yang sama atau lebih besar dari

$\varepsilon_y$ , maka tegangan baja tidak lagi sebanding dengan regangannya dan digunakan  $f_y$ .

Sehubungan dengan anggapan no 3, bentuk penampang di daerah tarik dan besarnya selimut beton tidaklah mempengaruhi kekuatan lentur. Tinggi penampang yang menentukan adalah tinggi efektif  $d$ , yaitu jarak dari serat tepi tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik. Regangan beton tekan maksimum pada serat tepi tekan terluar ( $\varepsilon_b'$ ) sebagai regangan unlimit ditetapkan sebesar 0.003 (PBI 1971 menggunakan 0.0035). Penetapan nilai tersebut didasarkan atas hasil-hasil pengujian yang menunjukkan bahwa umumnya regangan lentur beton hancur berada di antara nilai 0.003 dan 0.004. Untuk semua keadaan dianggap bahwa letakan antara baja-tulangan dengan beton berlangsung sempurna, tanpa terjadi gelinciran.

#### 5. 4. KUAT LENTUR BALOK PERSEGI

Telah dikemukakan bahwa distribusi tegangan beton tekan pada penampang bentuknya setara dengan kurva tegangan-regangan beton tekan. Seperti tampak pada gambar 2.4, bentuk distribusi tegangan tersebut berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral, dan untuk mutu beton yang berbeda akan lain pula bentuk kurva dan lengkungannya. Tampak bahwa tegangan tekan  $f_c'$ , yang merupakan tegangan maksimum, posisinya bukan pada srat tepi tekan terluar tetapi agak masuk ke dalam.

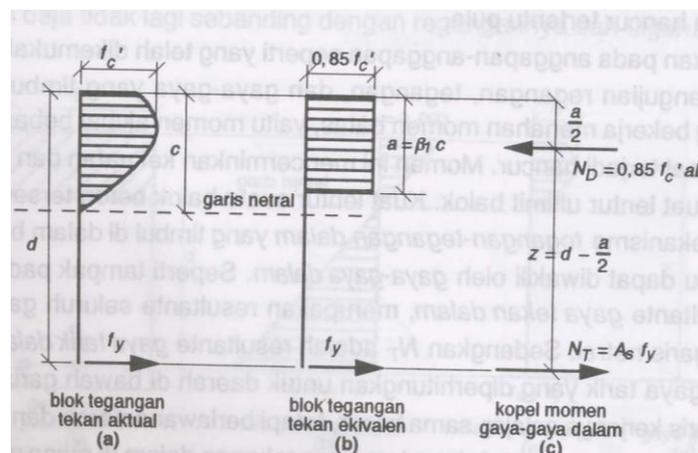
Pada suatu komposisi tertentu balok menahan beban sedemikian hingga regangan tekan lentur beton maksimum ( $\varepsilon'_{b\max}$ ) mencapai 0.003 sedangkan tegangan tarik baja tulangan mencapai tegangan luluh  $f_y$ . Apabila hal demikian terjadi, penampang dinamakan mencapai keseimbangan regangan, atau disebut penampang bertulangan seimbang, merupakan suatu kondisi khusus yang akan dibahas lebih lanjut di bab 5.5. Dengan demikian berarti bahwa untuk suatu komposisi beton dengan jumlah baja tertentu akan memberikan keadaan hancur tertentu pula.

Berdasarkan pada anggapan-anggapan seperti yang telah dikemukakan di atas, dapat dilakukan pengujian regangan, tegangan, dan gaya-gaya yang timbul pada penampang balok yang bekerja menahan momen batas, yaitu momen akibat beban luar yang timbul tepat pada saat terjadi hancur. Momen ini mencerminkan kekuatan dan di masa lalu disebut sebagai kuat lentur unlimit balok. Kuat lentur suatu balok beton tersedia karenaberlangsungnya mekanisme tegangan-tegangan dalam yang timbul di dalam balok yang pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam. Seperti tampak pada Gambar 5.4,  $N_D$  adalah resultan gaya tekan dalam. Merupakan resultan seluruh gaya tekan pada daerah di atas garis netral. Sedangkan  $N_T$  adalah resultan gaya tarik dalam, merupakan jumlah seluruh gaya tarik yang diperhitungkan untuk daerah di bawah garis netral. Kedua gaya ini, arah garis kerjanya sejajar, sama besar, tetapi berlawanan arah dan dipisahkan dengan jarak  $z$  sehingga membentuk kopel momen tahanan dalam di mana nilai maksimumnya disebut sebagai kuat lentur atau momen tahanan penampang komponen struktur terlentur.

Momen tahanan dalam tersebut yang akan menahan atau memikul momen lentur rencana aktual yang ditimbulkan oleh beban luar. Untuk itu dalam merencanakan balok pada kondisi pembebanan tertentu harus disusun komposisi dimensi balok beton dan jumlah serta besar (luas) baja tulangnya sedemikian rupa sehingga dapat menimbulkan momen tahanan dalam paling tidak sama dengan momen lentur maksimum yang ditimbulkan oleh beban. Menentukan momen tahanan dalam merupakan hal yang kompleks sehubungan dengan bentuk diagram tegangan tekan di atas garis netral yang berbentuk garis lengkung. Kesulitan timbul tidak hanya pada waktu menghitung besarnya  $N_D$ , tetapi juga penentuan letak garis kerja gaya relatif terhadap pusat berat tulangan gaya tarik. Tetapi karena momen tahanan dalam pada dasarnya merupakan fungsi dari  $N_D$  dan  $z$ , tidaklah sangat penting benar untuk mengetahui bentuk tepat distribusi tegangan tekan di atas garis netral. Untuk menentukan momen tahanan dalam, yang penting adalah mengetahui terlebih dahulu resultan total gaya beton tekan  $N_D$ , dan letak garis kerja gaya dihitung terhadap serat tepi tekan terluar, sehingga jarak  $z$  dapat dihitung. Kedua nilai tersebut dapat ditentukan melalui penyederhanaan bentuk distribusi tegangan lengkung

digantikan dengan bentuk ekuivalen yang lebih sederhana, dengan menggunakan nilai intensitas tegangan rata-rata sedemikian sehingga nilai dan letak resultan tidak berubah.

Untuk tujuan penyederhanaan, Whitney telah mengusulkan bentuk persegi panjang sebagai distribusi tegangan beton tekan ekuivalen. Standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.2 ayat 7 juga menetapkan bentuk tersebut sebagai ketentuan, meskipun pada ayat 6 tidak menutup kemungkinan untuk menggunakan bentuk-bentuk yang lain sepanjang hal tersebut merupakan hasil-hasil pengujian. Pada kenyataannya, usulan Whitney telah digunakan secara luas karena bentuknya berupa empat persegi panjang yang memudahkan dalam penggunaannya, baik untuk perencanaan maupun analisis.



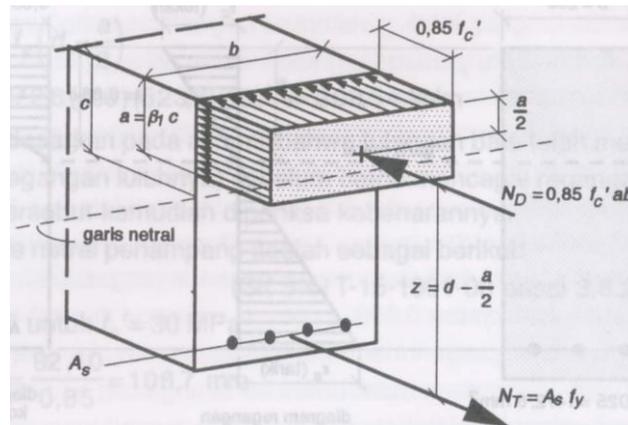
**Gambar 5.5. Blok Tegangan ekuivalen Whitney**

Berdasarkan bentuk empat persegi panjang, seperti tampak pada Gambar 5.5, intensitas tegangan beton tekan rata-rata ditentukan sebesar  $0.85f'_c$  dan dianggap bekerja pada daerah tekan dari penampang balok selebar  $b$  dan sedalam  $a$ , yang mana besarnya ditentukan dengan rumus:

$$a = \beta_1 c$$

dimana :  $c$  = jarak serat tekan terluar ke garis netral

$\beta_1$  = konstanta yang merupakan fungsi dari kelas kuat beton



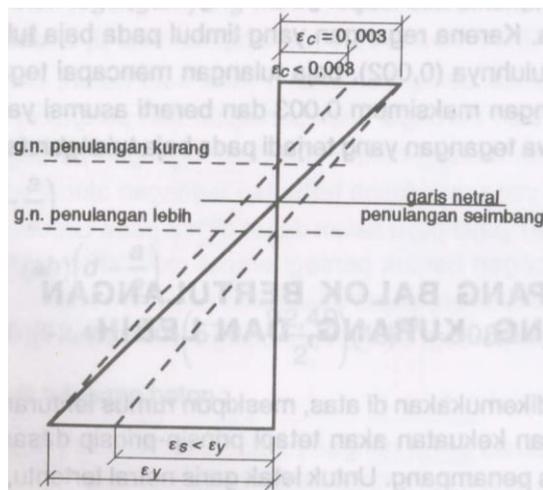
**Gambar 5.6. Blok Tegangan Ekuivalen untuk perencanaan dan analisis kekuatan**

Standar SK SNI T-15-1991-03 menetapkan nilai  $\beta_1$  diambil 0.85 untuk  $f_c' \leq 30$  Mpa, berkurang 0.008 untuk setiap kenaikan 1 Mpa kuat beton, dan nilai tersebut tidak boleh kurang dari 0.65. dari berbagai hasil penelitian dan pengujian telah terbukti bahwa hasil perhitungan dengan menggunakan distribusi tegangan persegi empat ekuivalen tersebut memberikan hasil yang mendekati terhadap tegangan aktual yang rumit. Sebuah gambar isometrik hubungan gaya-gaya dalam dapat dilihat pada gambar 1.6. dengan menggunakan distribusi tegangan bentuk persegi empat ekuivalen serta anggapan-anggapan kuat rencana yang diberlakukan, dapat ditentukan besarnya kuat lentur ideal  $M_n$  dari balok beton bertulang empat persegi dengan penulangan tarik saja.

## 5. 5. PENAMPANG BALOK BERTULANGAN SEIMBANG, KURANG, DAN LEBIH

Seperti yang telah dikemukakan di atas, meskipun rumus lenturan tidak berlaku lagi dalam metoda perencanaan kekuatan akan tetapi prinsip-prinsip dasar teori lentur masih digunakan pada analisis penampang. Untuk letak garis netral tertentu, perbandingan antara regangan baja dengan regangan beton maksimum dapat ditetapkan berdasarkan distribusi regangan linear. Sedangkan letak garis netral tergantung pada jumlah tulangan baja tarik yang dipasang dalam suatu penampang sedemikian sehingga balok tegangan tekan beton

mempunyai kedalaman cukup agar dapat tercapai keseimbangan gaya-gaya, di mana resultan tegangan tekan seimbang dengan resultan tegangan tarik  $\sum H = 0$ . Apabila pada penampang tersebut luas tulangan baja tariknya ditambah, kedalaman blok tegangan beton tekan akan bertambah pula, dan oleh karenanya 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 bajatarik dan regangan beton tekan maksimum 0.003, maka penampang disebut bertulangan seimbang. Kondisi keseimbangan regangan menempati posisi penting karena merupakan pembatas antara dua keadaan penampang balok beton bertulang yang berbeda cara hancurnya.



**Gambar 5.7. Variasi letak garis netral**

Apabila penampang balok beton bertulang mengandung jumlah tulangan baja tarik lebih banyak dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan, penampang balok demikian disebut bertulangan lebih (overreinforced). Berlebihnya tulangan baja tarik mengakibatkan garis netral bergeser ke bawah, lihat Gambar 5.7. hal yang demikian pada gilirannya akan berakibat beton mendahului mencapai regangan maksimum 0.003 sebelum tulangan baja tariknya luluh. Apabila penampang balok tersebut dibebani momen lebih besar lagi, yang berarti regangannya semakin besar sehingga kemampuan regangan beton terlampaui, maka akan berlangsung keruntuhan dengan beton hancur secara mendadak tanpa diawali dengan gejala-gejala peringatan terlebih dahulu.

Sedangkan apabila suatu penampang balok beton bertulang mengandung jumlah tulangan baja tarik kurang dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan, penampang demikian disebut bertulangan kurang (*underreinforced*). Letak garis netral akan lebih naik sedikit daripada keadaan seimbang, lihat Gambar 5.7, dan tulangan baja tarik akan mendahului mencapai regangan luluhnya (tegangan luluhnya) sebelum beton mencapai regangan maksimum 0.003. pada tingkat keadaan ini, bertambahnya beban akan mengakibatkan tulangan baja mulur (memanjang) cukup banyak sesuai dengan perilaku bahan baja, dan berarti bahwa baik regangan beton maupun baja terus bertambah tetapi gaya tarik yang bekerja pada tulangan baja tidak bertambah besar. Dengan demikian berdasarkan keseimbangan gaya-gaya horizontal  $\sum H = 0$ , gaya beton tekan tidak mungkin bertambah sedangkan tegangan tekannya terus meningkat berusaha mengimbangi beban, sehingga mengakibatkan luas daerah tekan beton pada penampang menyusut (berkurang) yang berarti posisi garis netral akan berubah bergerak naik. Proses tersebut di atas terus berlanjut sampai suatu saat daerah beton tekan yang terus berkurang tidak mampu lagi menahan gaya tekan dan hancur sebagai efek sekunder. Cara hancur demikian, yang sangat dipengaruhi oleh peristiwa meluluhnya tulangan baja tarik berlangsung meningkat secara bertahap. Segera setelah baja mencapai titik luluh, lendutan balok meningkat tajam sehingga dapat merupakan tanda awal dari kehancuran. Meskipun tulangan baja berperilaku duktail (*liat*), tidak akan tertarik lepas dari beton sekalipun pada waktu terjadi kehancuran.

## 5. 6. PEMBATASAN PENULANGAN TARIK

Dengan demikian ada dua macam cara hancur, yang pertama kehancuran diawali meluluhnya tulangan baja tarik berlangsung secara perlahan dan bertahap sehingga sempat memberikan tanda-tanda keruntuhan, sedangkan bentuk kehancuran dengan diawali hancurnya beton tekan terjadi secara mendadak tanpa sempat memberikan peringatan. Tentu saja cara hancur pertama lebih disukai karena dengan adanya tanda peringatan, resiko akibatnya dapat diperkecil. Untuk itu, standar SK SNI T-15-1991-03 menetapkan pembatasan penulangan yang perlu diperhatikan. Pada pasal 3.3.3 ditetapkan

bahwa jumlah tulangan baja tarik tidak boleh melebihi 0.75 dari jumlah tulangan baja tarik yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan.

$$A_s \leq 0.75 A_{sb}$$

Apabila jumlah batas penulangan tersebut dapat dipenuhi akan memberikan jaminan bahwa kehancuran daktail 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 kaitannyadengan rasio penulangan ( $\rho$ ) atau kadang-kadang disebut rasio baja, perbandingan antara jumlah luas penampang tulangan baja tarik ( $A_s$ ) terhadap luas efektif penampang (lebar  $b$  x tinggi efektif  $d$ ),  $= \frac{A_s}{bd}$ . apabila pembatasan diberlakukan, dimana rasio penulangan maksimum yang diijinkan dibatasi dengan 0.75 kali rasio penulangan keadaan seimbang ( $\rho_b$ ), sehingga :  $\rho_{maks} = 0.75 \rho_b$ .

Untuk menentukan rasio penulangan keadaan seimbang ( $\rho_b$ ) dapat diuraikan berdasarkan pada Gambar 5.8 sebagai berikut:

Letak garis netral pada keadaan seimbang dapat ditentukan dengan menggunakan segitiga sebanding dari diagram regangan.

$$\frac{c_b}{0.003} = \frac{d}{(0.003 + \frac{f_y}{E_s})}$$

Dengan memasukan nilai  $E_s = 200000$  Mpa, maka:

$$c_b = \frac{0.003(d)}{(0.003 + \frac{f_y}{2000})}$$

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

Dan, karena  $\sum H = 0$  dan  $N_{Db} = N_{Tb}$ , maka  $(0.85 (0.85 f'_c) \beta_1 c_b) = A_{sb} f_y$

$$c_b = \frac{A_{sb} f_y}{(0.85 f'_c) \beta_1 b}$$

$$A_{sb} = \rho_b b d$$

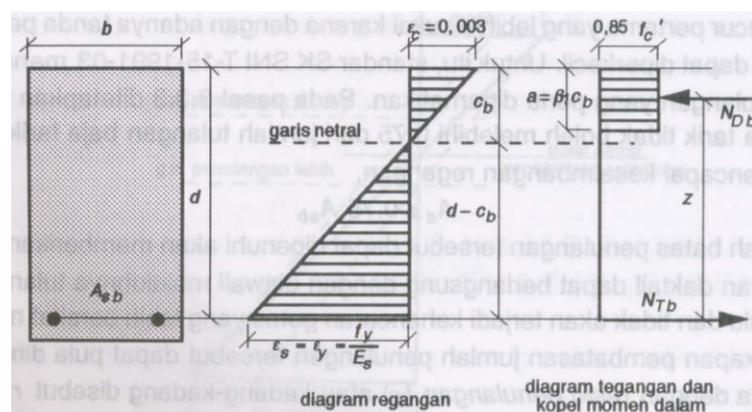
$$c_b = \frac{\rho_b b d f_y}{(0.85 f'_c) \beta_1 b}$$

$$c_b = \frac{\rho_b d f_y}{(0.85 f_c') \beta_1}$$

Dengan menggunakan persamaan diatas dapat dicari ( $\rho_b$ )

$$\rho_b = \frac{(0.85 f_c' \beta_1)}{f_y} \frac{600}{(600 + f_y)}$$

Dari persamaan terakhir tersebut di atas, untuk mendapatkan nilai ( $\rho_b$ ) dapat digunakan daftar yang dibuat berdasarkan berbagai kombinasi nilai  $f_c'$  dan  $f_y$ .



**Gambar 5.8. Keadaan Seimbang Regangan**

## 5. 7. 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. Sehingga untuk mendapatkan faktor keamanan yang sesuai, perlu ditetapkan kebutuhan relatif yang ingin dicapai untuk dipakai sebagai dasar konsep faktor keamanan tersebut. Struktur bangunan dan komponen-komponennya harus direncanakan untuk lebih mampu memikul beban lebih di atas beban yang diharapkan bekerja. Kapasitas lebih tersebut disediakan untuk memperhitungkan dua keadaan, yaitu kemungkinan terdapatnya beban kerja yang lebih besar yang ditetapkan dan kemungkinan terjadinya penyimpangan kekuatan komponen struktur akibat bahan dasar ataupun pengerjaan yang tidak memenuhi syarat. Kriteria dasar kuat rencana dapat diungkapkan sebagai berikut :

$$\text{Kekuatan yang tersedia} \geq \text{Kekuatan yang dibutuhkan}$$

Kekuatan setiap penampang komponen struktur harus diperhitungkan dengan menggunakan kriteria dasar tersebut. Kekuatan yang dibutuhkan, atau disebut kuat perlu menurut SK SNI T-13-1991-03 dapat diungkapkan sebagai beban rencana ataupun momen, gaya geser, dan gaya-gaya lain yang berhubungan dengan beban rencana. Beban rencana atau beban terfaktor didapatkan dari mengalikan beban kerja dengan faktor beban, dan kemudian digunakan subskrip  $u$  sebagai penunjuknya. Dengan demikian, apabila digunakan kata sifat rencana atau rancangan menunjukkan bahwa beban sudah terfaktor. Untuk beban mati dan hidup SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.2 ayat 1 menetapkan bahwa beban rencana, gaya geser rencana, dan momen rencana ditetapkan hubungannya dengan beban kerja atau beban guna melalui persamaan berikut:

$$U = 1.2D + 1.6L$$

persamaan (3.2-1) SK SNI T-15-1991-03 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. Ketentuan faktor beban untuk jenis pembebanan lainnya, tergantung kombinasi pembebanannya terdapat dalam SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.2 ayat 2, 3, dan 4.

## 5. 8. ANALISIS BALOK TERLENTUR BERTULANGAN TARIK SAJA

Analisis penampang balok terlentur dilakukan dengan terlebih dahulu mengetahui dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari: jumlah dan ukuran tulangan baja tarik ( $A_s$ ), lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif ( $d$ ), tinggi total ( $h$ ),  $f'_c$ , dan  $f_y$ , sedangkan yang dicari adalah kekuatan balok ataupun manifestasi kekuatan dalam bentuk yang lain, misalnya menghitung  $M_n$ , atau memeriksa kehandalan dimensi penampang balok tertentu terhadap beban yang bekerja, atau menghitung jumlah beban yang dapat dipikul balok. Di lain pihak, proses perencanaan balok terlentur adalah menentukan satu atau lebih unsur dimensi penampang balok yang belum diketahui, atau menghitung jumlah kebutuhan tulangan tarik dalam penampang berdasarkan mutu bahan, jenis pembebanan yang sudah ditentukan. Penting sekali untuk mengenal perbedaan dua pekerjaan

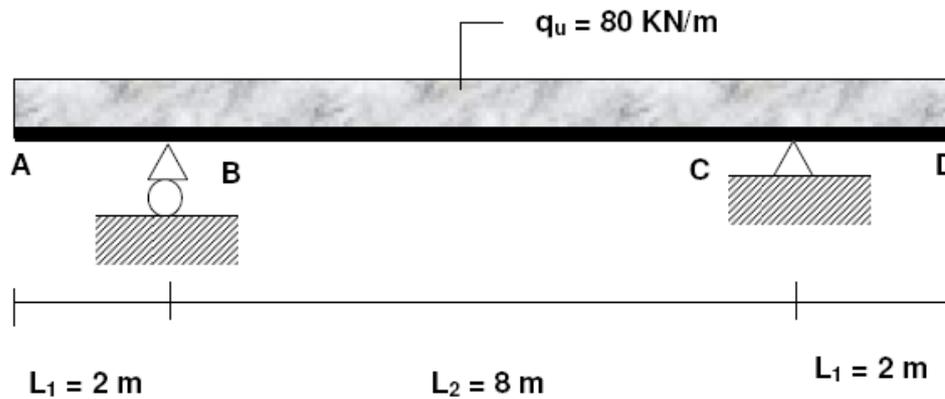
dan permasalahan tersebut dengan baik, masing-masing memiliki langkah penyelesaian yang berbeda.

Analisis dapat pula diterapkan untuk suatu komponen struktur yang pada masa lalu direncanakan berdasarkan metoda tegangan kerja (cara-n). seperti diketahui, pada metode perencanaan tegangan (beban) kerja mungkin tidak menggunakan pembatasan rasio penulangan sehingga penulangan balok cenderung berlebihan. Meskipun hal demikian tidak sesuai dengan filosofi peraturan yang belakangan sekarang, bagaimanapun balok-balok tersebut nyatanya sampai saat ini digunakan dan bekerja, sehingga analisis kapasitas momennya secara rasional dilakukan dengan hanya memperhitungkan tulangan baja tarik  $0.75\rho_b$ . Atau dengan kata lain, pendekatan dilakukan dengan mengabaikan kekuatan baja diluar jumlah 75% dari jumlah tulangan tarik yang diperlukan untuk mencapai keadaan seimbang.

### Contoh Perhitungan.

#### Diketahui:

Balok yang memikul beban merata berfaktor total sebesar  $q_u$ :



$$f'_c = 30 \text{ MPa.}$$

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

$$b = 300 \text{ mm.}$$

$$h = 550 \text{ mm.}$$

$$d_s = 40 \text{ mm.}$$

$$E_s = 2,0 \times 10^5 \text{ MPa.}$$

#### Ditanya:

Luas tulangan tarik ( $A_{st}$ ) = ?

Luas tulangan tekan ( $A_s'$ ) = ?

dengan kondisi *Under Reinforced*.

#### Penyelesaian:

##### Prosedur Desain Penulangan Lentur Balok Persegi – Momen Lapangan:

$$M_u = (1/8 \cdot q_u) \cdot (L_2^2 - 4 \cdot L_1^2)$$

$$M_u = (1/8 \cdot 80) \cdot (8^2 - 4 \cdot 2^2).$$

$$M_u = 480 \text{ kN.m.}$$

**a. Menghitung Tinggi Efektif Balok (d):**

Nilai:  $d = h - d_s - \phi_s - 0,5 \cdot \phi_{ut}$  (asumsi 1 lapis), atau  $d = 0,9 \cdot h$ .

$$d = 0,9 \cdot h = 0,9 \cdot 550 \text{ mm} = 495 \text{ mm.}$$

**b. Menghitung Nilai  $\beta_1$ :**

$$\beta_1 = 0,85; \text{ untuk } f_c' = 30 \text{ MPa.}$$

**c. Menentukan Momen Nominal Maksimum ( $M_{n1}$ ):**

Menghitung nilai  $k_{maks}$  :

$$k_{maks} = 0,75 \cdot k_b = 0,75 \cdot \left( \beta_1 \cdot \frac{600}{600 + f_y} \right)$$

$$k_{maks} = 0,75 \cdot k_b = 0,75 \cdot \left( 0,85 \cdot \frac{600}{600 + 400} \right)$$

$$k_{maks} = 0,383.$$

Menghitung kapasitas momen  $M_{n1}$  :

$$M_{n1} = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot d^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot k_{maks} \right)$$

$$M_{n1} = 0,85 \cdot 30 \cdot 300 \cdot 495^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot 0,383 \right) \times (10^{-6})$$

$$M_{n1} = 1.515,954 \text{ KN.m.}$$

**d. Analisis apakah Balok perlu Tulangan Rangkap:**

Menghitung nilai Momen Nominal ( $M_n$ ) :

$$M_n = M_u / \phi$$

$$M_n = ((1/8 \cdot q_u) \cdot (L_2^2 - 4 \cdot L_1^2)) / 0,80.$$

$$M_n = ((1/8 \cdot 80) \cdot (8^2 - 4 \cdot 2^2)) / 0,80.$$

$$M_n = 480 / 0,80.$$

$$M_n = 600 \text{ KN.m}$$

- ☑ Menghitung selisih momen:  $M_{n2} = \Delta M = M_n - M_{n1}$

$$M_{n2} = \Delta M = M_n - M_{n1}$$

$$M_{n2} = \Delta M = 600 \text{ KN.m} - 1.515,954 \text{ KN.m.}$$

$$M_{n2} = \Delta M = -915,954 \text{ KN.m.}$$

$M_{n2} = -915,954 \text{ KN.m} < 0$ , maka cukup dipakai **tulangan tunggal**.

e. Jika Diperlukan Tulangan Tunggal:

- ☑ Menghitung nilai Momen Nominal ( $M_n$ ) :

$$M_n = 600 \text{ KN.m.}$$

- ☑ Menghitung nilai  $k_{\text{perlu}}$  :

$$k_{\text{perlu}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_n}{0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2}}$$

$$k_{\text{perlu}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 600}{0,85 \cdot 30 \cdot 300 \cdot 495^2}} \times (10^6)$$

$$k_{\text{perlu}} = 0,320.$$

- ☑ Menghitung luas tulangan tarik perlu ( $A_{s \text{ perlu}}$ ) :

$$A_{s \text{ perlu}} = \frac{M_n}{f_y \cdot d \cdot \left(1 - \frac{k_{\text{perlu}}}{2}\right)}$$

$$A_{s \text{ perlu}} = \frac{600}{400 \cdot 495 \cdot \left(1 - \frac{0,320}{2}\right)} \times (10^6)$$

$$A_{s \text{ perlu}} = 3.607,709 \text{ mm}^2 \approx 3.608 \text{ mm}^2.$$

- ☑ Memilih tulangan dengan syarat:  $A_s \geq A_{s \text{ perlu}}$

Dicoba dengan **tulangan polos** dalam tabel, tidak ada yang memenuhi syarat.

Akhirnya dipilih 4 buah tulangan ulir dengan diameter = 35 mm dan  $A_{s_t} = 3.828,031 \text{ mm}^2$ .

$$A_{s_t} = 3.828,031 \text{ mm}^2 > A_{s_{\text{perlu}}} = 3.608 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{OKE!}$$

- Kontrol kapasitas momen, dengan syarat:  $M_{nt} \geq M_n$**

$$k_1 = [A_{s_t} / (b \cdot d)] \cdot [f_y / (0,85 \cdot f_c')] = \rho \cdot [f_y / (0,85 \cdot f_c')]$$

$$k_1 = [3.828,031 / (300 \times 495)] \times [400 / (0,85 \times 30)]$$

$$k_1 = 0,404.$$

$$M_{nt} = A_{s_t} \cdot f_y \cdot d \cdot (1 - \frac{1}{2} \cdot k_1)$$

$$M_{nt} = 3.828,031 \times 400 \times 495 \times (1 - \frac{1}{2} \cdot 0,404) \times (10^{-6})$$

$$M_{nt} = 604,708 \text{ KN.m} > M_n = 600 \text{ KN.m} \rightarrow \text{OKE!}$$

- Menghitung nilai Rasio Tulangan Maksimum:**

**Rasio Tulangan Seimbang:**

$$\rho_b = [(0,85 \cdot f_c') / f_y] \cdot \beta_1 \cdot [600 / (600 + f_y)]$$

$$\rho_b = [(0,85 \times 30) / 400] \times 0,85 \times [600 / (600 + 400)]$$

$$\rho_b = 0,0325.$$

**Rasio Tulangan Maksimum:**

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

$$\rho_{\text{maks}} = 0,75 \times 0,0325$$

$$\rho_{\text{maks}} = 0,0244.$$

- Menghitung nilai Rasio Tulangan Minimum:**

Untuk beton  $f_c' > 30 \text{ MPa}$ , maka:

$$\rho_{\text{min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \cdot f_y}$$

$$\rho_{\text{min}} = \frac{\sqrt{30}}{4 \cdot 400}$$

$$\rho_{\text{min}} = 0,0034.$$

Tetapi tidak boleh kurang dari  $\rho_{\min} = 1,4 / f_y = 1,4 / 400 = 0,0035$ .

$\rho_{\text{perlu}} = 0,0034 < \rho_{\min} = 0,0035 \rightarrow$  Tidak OKE!

Jika  $\rho_{\text{perlu}} < \rho_{\min}$ , maka hitung:

$\rho_{\text{perlu}}^* = (4/3) \cdot \rho_{\text{perlu}} = (4/3) \cdot 0,0034 = 0,0046$ .

Jika  $\rho_{\text{perlu}}^* = 0,0046 > \rho_{\min} = 0,0035$ , maka  $\rho_{\text{perlu}} = \rho_{\text{perlu}}^* = 0,0046$ .

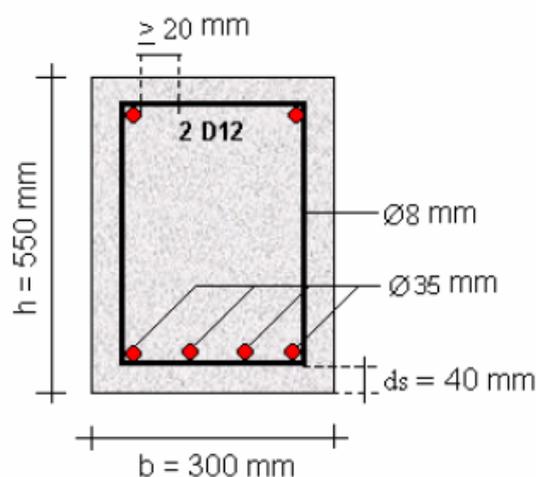
$\rho_{\text{perlu}} = 0,0046 > \rho_{\min} = 0,0035 \rightarrow$  OKE!

☑ **Kontrol Syarat Daktilitas:**

$$\left. \begin{array}{l} \rho_{\min} = 0,0035 \\ \rho = 0,0046 \\ \rho_{\max} = 0,0244 \end{array} \right\} \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \rightarrow \text{OKE!}$$

Tulangan memenuhi syarat daktilitas.

Jadi untuk tulangan tarik dipakai 4 buah tulangan ulir dengan diameter 35 mm dan  $A_{s_t} = 3.828,031 \text{ mm}^2$ . Sedangkan untuk tulangan tekannya, bisa saja dipakai 2 buah tulangan polos dengan diameter 12 mm atau yang lebih kecil dari itu.



**Prosedur Desain Penulangan Lentur Balok Persegi – Momen Tumpuan:**

$$M_u = 1/2 \cdot q_u \cdot L_1^2$$

$$M_u = 1/2 \cdot 80 \cdot 2^2$$

$$M_u = 160 \text{ kN.m.}$$

**a. Menghitung Tinggi Efektif Balok (d):**

Nilai:  $d = h - d_s - \phi_s - 0,5 \cdot \phi_{ut}$  (asumsi 1 lapis), atau  $d = 0,9 \cdot h$ .

$$d = 0,9 \cdot h = 0,9 \cdot 550 \text{ mm} = 495 \text{ mm.}$$

**b. Menghitung Nilai  $\beta_1$ :**

$$\beta_1 = 0,85; \text{ untuk } f_c' = 30 \text{ MPa.}$$

**c. Menentukan Momen Nominal Maksimum ( $M_{n1}$ ):**

Menghitung nilai  $k_{maks}$  :

$$k_{maks} = 0,75 \cdot k_b = 0,75 \cdot \left( \beta_1 \cdot \frac{600}{600 + f_y} \right)$$

$$k_{maks} = 0,75 \cdot k_b = 0,75 \cdot \left( 0,85 \cdot \frac{600}{600 + 400} \right)$$

$$k_{maks} = 0,383.$$

Menghitung kapasitas momen  $M_{n1}$  :

$$M_{n1} = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot d^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot k_{maks} \right)$$

$$M_{n1} = 0,85 \cdot 30 \cdot 300 \cdot 495^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot 0,383 \right) \times (10^{-6})$$

$$M_{n1} = 1.515,954 \text{ KN.m.}$$

**f. Analisis apakah Balok perlu Tulangan Rangkap:**

- Menghitung nilai Momen Nominal ( $M_n$ ) :

$$M_n = M_u / \phi$$

$$M_n = 160 / 0,80.$$

$$M_n = 200 \text{ KN.m}$$

- Menghitung selisih momen:  $M_{n2} = \Delta M = M_n - M_{n1}$

$$M_{n2} = \Delta M = M_n - M_{n1}$$

$$M_{n2} = \Delta M = 200 \text{ KN.m} - 1.515,95 \text{ KN.m.}$$

$$M_{n2} = \Delta M = -1.315,954 \text{ KN.m.}$$

$$M_{n2} = -1.315,954 \text{ KN.m} < 0, \text{ maka cukup dipakai tulangan tunggal.}$$

**g. Jika Diperlukan Tulangan Tunggal:**

- Menghitung nilai Momen Nominal ( $M_n$ ) :

$$M_n = 200 \text{ KN.m.}$$

- Menghitung nilai  $k_{\text{perlu}}$  :

$$k_{\text{perlu}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_n}{0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2}}$$

$$k_{\text{perlu}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 200}{0,85 \cdot 30 \cdot 300 \cdot 495^2}} \times (10^6)$$

$$k_{\text{perlu}} = 0,170.$$

- Menghitung luas tulangan tarik perlu ( $A_{s \text{ perlu}}$ ) :

$$A_{s \text{ perlu}} = \frac{M_n}{f_y \cdot d \cdot \left(1 - \frac{k_{\text{perlu}}}{2}\right)}$$

$$A_{s \text{ perlu}} = \frac{200}{400 \cdot 495 \cdot \left(1 - \frac{0,170}{2}\right)} \times (10^6) = 1.067,026 \text{ mm}^2 \approx 1.068 \text{ mm}^2.$$

$$A_{s \text{ perlu}} = 1.067,026 \text{ mm}^2 \approx 1.068 \text{ mm}^2.$$

- Memilih tulangan dengan syarat:  $A_{s_t} \geq A_{s \text{ perlu}}$**

Dicoba 2 buah tulangan polos dengan diameter = 28 mm dan  $A_{s_t} = 1.232 \text{ mm}^2$ .

$$A_{s_t} = 1.232 \text{ mm}^2 > A_{s \text{ perlu}} = 1.068 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{OKE!}$$

- Kontrol kapasitas momen, dengan syarat:  $M_{nt} \geq M_n$**

$$k_1 = [A_{s_t} / (b \cdot d)] \cdot [f_y / (0,85 \cdot f_c')] = \rho \cdot [f_y / (0,85 \cdot f_c')]$$

$$k_1 = [1.232 / (300 \times 495)] \times [400 / (0,85 \times 30)]$$

$$k_1 = 0,130.$$

$$M_{nt} = A_{s_t} \cdot f_y \cdot d \cdot (1 - \frac{1}{2} \cdot k_1)$$

$$M_{nt} = 1.232 \times 400 \times 495 \times (1 - \frac{1}{2} \cdot 0,130) \times (10^{-6})$$

$$M_{nt} = 228,063 \text{ KN.m} > M_n = 200 \text{ KN.m} \rightarrow \text{OKE!}$$

- Menghitung nilai Rasio Tulangan Maksimum:**

**Rasio Tulangan Seimbang:**

$$\rho_b = [(0,85 \cdot f_c') / f_y] \cdot \beta_1 \cdot [600 / (600 + f_y)]$$

$$\rho_b = [(0,85 \times 30) / 400] \times 0,85 \times [600 / (600 + 400)]$$

$$\rho_b = 0,0325.$$

**Rasio Tulangan Maksimum:**

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

$$\rho_{maks} = 0,75 \times 0,0325$$

$$\rho_{maks} = 0,0244.$$

- Menghitung nilai Rasio Tulangan Minimum:**

Untuk beton  $f_c' > 30 \text{ MPa}$ , maka:

$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \cdot f_y}$$

$$\rho_{\min} = \frac{\sqrt{30}}{4 \cdot 400}$$

$$\rho_{\min} = 0,0034.$$

Tetapi tidak boleh kurang dari  $\rho_{\min} = 1,4 / f_y = 1,4 / 400 = 0,0035$ .

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,0034 < \rho_{\min} = 0,0035 \rightarrow \text{Tidak OKE!}$$

Jika  $\rho_{\text{perlu}} < \rho_{\min}$ , maka hitung:

$$\rho_{\text{perlu}}^* = (4/3) \cdot \rho_{\text{perlu}} = (4/3) \cdot 0,0034 = 0,0046.$$

Jika  $\rho_{\text{perlu}}^* = 0,0046 > \rho_{\min} = 0,0035$ , maka  $\rho_{\text{perlu}} = \rho_{\text{perlu}}^* = 0,0046$ .

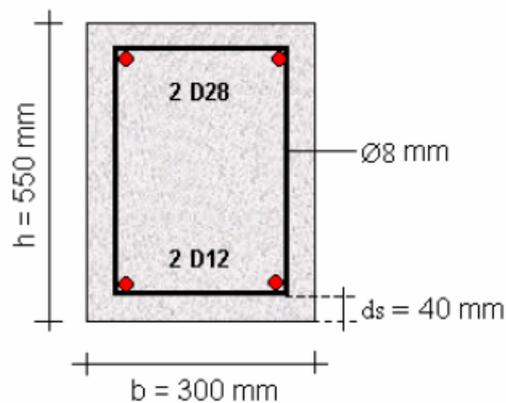
$$\rho_{\text{perlu}} = 0,0046 > \rho_{\min} = 0,0035 \rightarrow \text{OKE!}$$

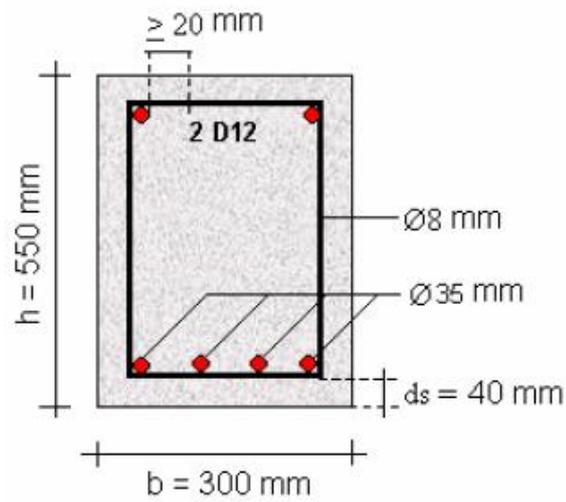
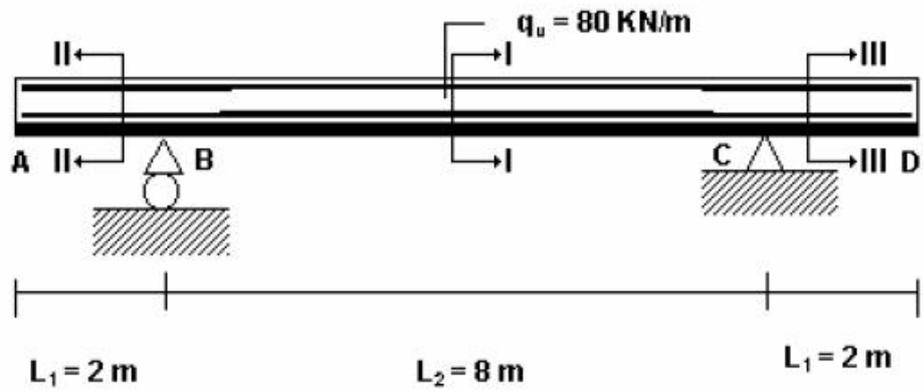
**Kontrol Syarat Daktilitas:**

$$\left. \begin{array}{l} \rho_{\min} = 0,0035 \\ \rho = 0,0046 \\ \rho_{\max} = 0,0244 \end{array} \right\} \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \rightarrow \text{OKE!}$$

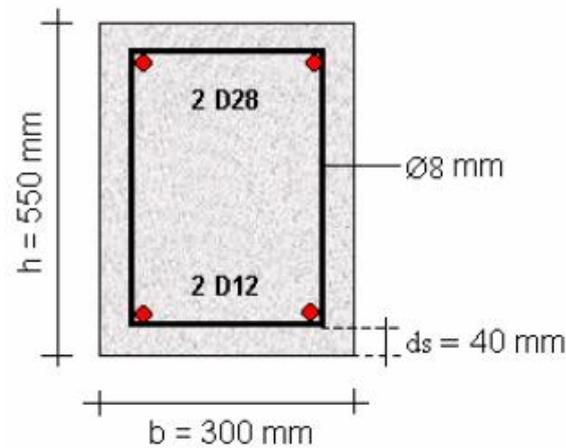
Tulangan memenuhi syarat daktilitas.

Jadi untuk tulangan tarik dipakai 2 buah tulangan polos dengan diameter = 28 mm dan  $A_{s_t} = 1.232 \text{ mm}^2$ . Sedangkan untuk tulangan tekannya, bisa saja dipakai 2 buah tulangan polos dengan diameter 12 mm atau yang lebih kecil dari itu.





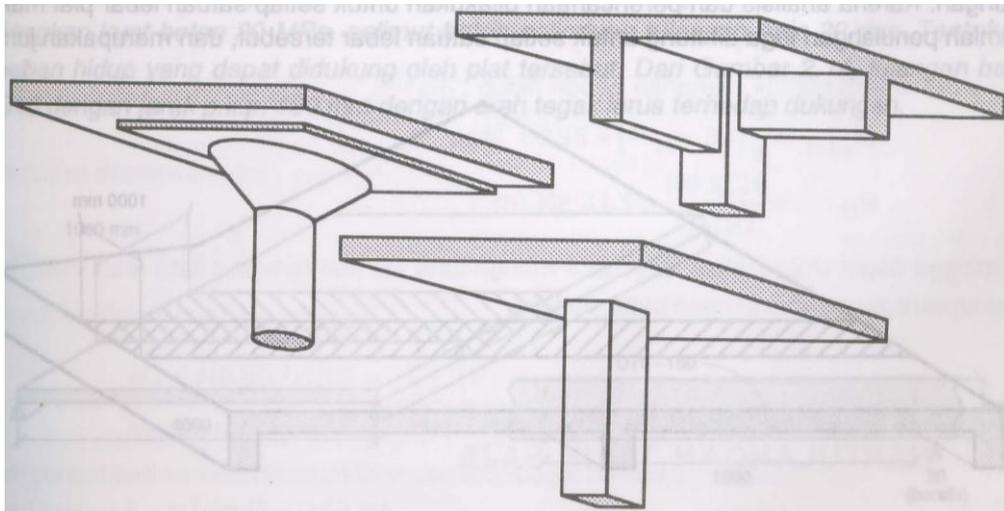
**Potongan I - I**



**Potongan II - II & III - III**

### 5. 9. PLAT TERLENTUR

Struktur bangunan gedung umumnya tersusun atas komponen plat lantai, balok anak, balok induk, dan kolom, yang umumnya dapat merupakan satu kesatuan monolit atau terangkai seperti halnya pada sistem pracetak. Plat juga dipakai untuk atap, dinding, dan lantai tangga, jembatan, atau pelabuhan. Petak pelat dibatasi oleh balok anak pada kedua sisi panjang dan oleh balok induk pada kedua sisi pendek. Apabila plat didukung sepanjang keempat sisinya seperti tersebut di atas, dinamakan sebagai plat dua arah dimana lenturan akan timbul pada dua arah yang saling tegak lurus. Namun, apabila perbandingan sisi panjang dan sisi pendek yang saling tegak lurus lebih besar dari 2, plat dapat dianggap hanya bekerja sebagai plat satu arah dengan lenturan utama pada arah sisi yang lebih pendek. Sehingga struktur plat satu arah dapat di definisikan sebagai plat yang di dukung pada dua tepi yang berhadapan sedemikian sehingga lenturan timbul hanya dalam satu arah saja, yaitu pada arah yang tegak lurusterhadap arah dukungan tepi.



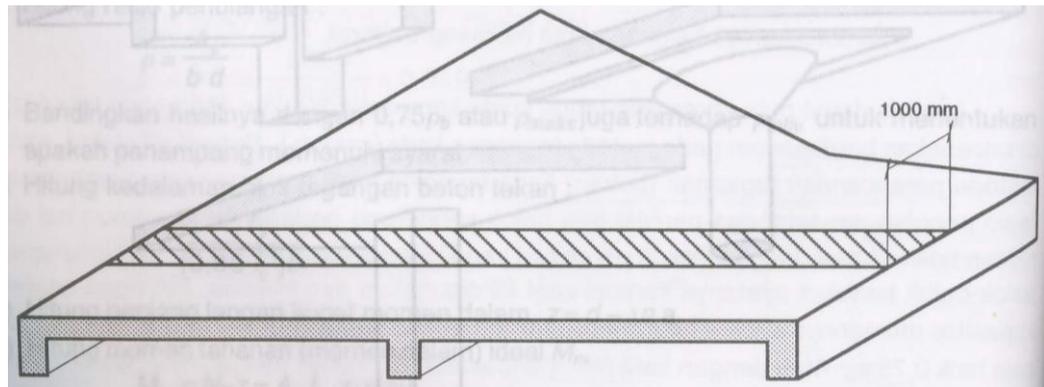
**Gambar 5.9. Plat beton bertulang**

SK SNI T-15-1991-03 juga mengenal jenis plat lain, yaitu plat yang diberi penulangan baja pada dua arah atau lebih yang tidak menggunakan balok-balok untuk media pelimpahan beban tetapi menumpu langsung pada kolom sebagai komponen struktur penopang. Dalam hal demikian, plat dianggap didukung oleh sistem grid, terdiri dari balok-balok yang tingginya sama dengan plat dan

menyatu menjadi satu kesatuan dengan plat itu sendiri. Kolom-kolom penyangga memberikan tekanan pons yang hendak menembus plat ke atas. Sistem kerja demikian berakibatkan timbulnya tegangan geser cukup besar yang dinamakan geser pons, dan apabila plat tidak kuat akan retak atau bahkan pecah tertembus. Untuk menanggulangi tekanan pons tersebut pada umumnya di tempat kolom penumpu plat diberi penebalan berupa drop panel, atau memperbesar ukuran kolom di ujung atas di tempat tumpuan yang biasanya disebut sebagai kapital kolom atau kepala kolom. Apabila sistem tersebut digunakan untuk struktur dengan bentangan lebih pendek dan beban yang didukung lebih ringan, dapat pula dibuat tanpa menggunakan penebalan dengan drop panel atau kepala kolom, jadi plat betul-betul rata dan didukung langsung oleh kolom, lihat Gambar 5.9.

#### **5. 10. ANALISIS PLAT TERLENTUR SATU ARAH**

Karena beban yang bekerja pada plat semuanya dilimpahkan menurut arah sisi pendek, maka suatu plat terlentur satu arah yang menerus di atas beberapa perletakan dapat diperlakukan sebagaimana layaknya sebuah balok persegi dengan tingginya setebal plat dan lebarnya adalah satu satuan panjang, umumnya 1 meter. Apabila diberikan beban merata plat melendut membentuk kelengkungan satu arah, dan oleh karenanya timbul momen lentur pada arah tersebut. Beban merata untuk plat biasanya menggunakan satuan  $\text{kN/m}^2$  (kPa), karena diperhitungkan untuk setiap satuan lebar maka dalam perencanaan dan analisis diubah satuannya menjadi beban per satuan panjang (kN/m). Apabila bentangan dan beban yang bekerja memenuhi kriteria SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.1.3 ayat 3, maka peraturan memperbolehkan menggunakan koefisien momen dan gaya geser standar.



**Gambar 5.10. Plat Satu Arah**

Tulangan pokok lentur plat satu arah dipasang pada arah tegak lurus terhadap dukungan. Karena analisis dan perencanaan dilakukan untuk setiap satuan lebar plat maka jumlah penulangan juga dihitung untuk setiap satuan lebar tersebut, dan merupakan jumlah rata-rata. Dengan demikian, cara menyebut jumlah tulangan baja untuk plat berbeda dengan yang digunakan untuk komponen struktur lainnya. Kecuali diameter tulangan juga disebutkan jarak spasi pusat ke pusat (p.k.p) batang tulangan. Tabel A-5 memberikan kemudahan untuk penetapan tulangan pokok baja tarik untuk plat. Sebagai misal, apabila plat diberi penulangan baja D22 ( $A_s = 380 \text{ mm}^2$ ) dengan jarak pusat ke pusat 400 mm, maka setiap pias satu meter lebar plat, luas tulangan baja rata-rata  $2.50 \times 380 = 950.3 \text{ mm}^2$ , dan penulangan disebut : D22-400 atau  $A_s = 950.3 \text{ mm}^2/\text{m}'$ .

Standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.16.12. menetapkan bahwa untuk plat lantai saerta atap struktural yang hanya menggunakan tulangan pokok lentur satu arah, selain penulangan pokok harus dipasang juga tulangan susut dan suhu dengan arah tegak lurus terhadap tulangan pokoknya. Peraturan lebih jauh menetapkan bahwa apabila digunakan tulangan baja deformasian (BJTD) mutu 30 untuk tulangan susut berlaku syarat minimum  $A_s = 0.0020 bh$ , sedangkan untuk mutu 40 berlaku syarat minimum  $A_s = 0.0018 bh$ , dimana b dan h adalah lebar satuan dan tebal plat. Di samping itu juga berlaku ketentuan bahwa plat struktural dengan tebal tetap, jumlah luas tulangan baja searah dengan bentangan (tulangan pokok) tidak boleh kurang dari tulangan susut dan suhu yang diperlukan. Jarak dari pusat ke pusat tulangan pokok tidak boleh lebih dari

tiga kali tebal plat atau 500 mm, sedangkan jarak tulangan susut dan suhu tidak boleh lebih dari lima kali tebal atau 500 mm.

### 5. 11. PERENCANAAN BALOK TERLENTUR BERTULANGAN TARIK SAJA

Dalam proses perencanaan balok penampang persegi terlentur untuk  $f_y$  dan  $f_c'$  tertentu, yang harus ditetapkan lebih lanjut adalah dimensi lebar balok, tinggi balok, dan luas penampang tulangan. Perlu diketahui bahwa untuk tiga besaran perencanaan tersebut didapatkan banyak sekali kemungkinan kombinasi antar ketiganya yang dapat memenuhi kebutuhan kuat momen untuk penggunaan tertentu. Secara teoretik dapat dikatakan bahwa balok lebar tetapi pendek kemungkinan mempunyai  $M_R$  yang sama dengan balok sempit tetapi tinggi. Perlu diketahui juga bahwa keputusan untuk menentukan nilai-nilai tersebut akan sangat dipengaruhi oleh batas ketentuan-ketentuan peraturan di samping juga pertimbangan teknis pelaksanaannya. Dengan demikian, untuk menentukan bentuk dan dimensi penampang balok terbaik bukanlah hal yang mudah karena perhitungan biaya rupanya tidak hanya ditentukan oleh rendahnya volume beton maupun jumlah tulangan baja harus dipasang di dalam balok, tetapi masih ada faktor lain yang harus dipertimbangkan misalnya saja dari teknis pelaksanaannya.

Dengan memanfaatkan hubungan internal yang sudah dikenal pada waktu membahas analisis balok terdahulu, kemudian dilakukan modifikasi-modifikasi tertentu agar proses perencanaan dapat lebih disederhanakan.

Ungkapan kekuatan balok beton bertulang penampang persegi bertulangan tarik saja telah dikenal yaitu:

$$M_R = \phi N_D z \text{ dan } M_R = \phi(0.85f_c')ba(d - \frac{1}{2}a)$$

dimana,  $a = \frac{Asf_y}{(0.85f_c')b}$

Dengan menggunakan rumus-rumus tersebut dapat dilakukan usaha penyederhanaan dengan cara mengembangkan besaran tertentu sedemikian sehingga dapat disusun dalam bentuk daftar.

$$\rho = \frac{As}{bd} \text{ atau } As = \rho bd$$

$$a = \frac{A_s f_y}{(0.85 f'_c) b} = \frac{\rho b d f_y}{(0.85 f'_c) b} = \frac{\rho d f_y}{(0.85 f'_c)}$$

Kemudian ditetapkan nilai  $\omega = \frac{\rho f_y}{f'_c}$

Maka,  $a = \omega \frac{d}{0.85}$

Masukan dalam ungkapan  $M_R$  :

$$M_R = \phi (0.85 f'_c) (b) \left( \omega \frac{d}{0.85} \right) \left\{ d - \omega \frac{d}{2(0.85)} \right\}$$

$$M_R = \phi b d^2 f'_c \omega (1 - 0.59 \omega)$$

Dari persamaan tersebut didapat bilangan k, sebagai berikut:

$$k = f'_c \omega (1 - 0.59 \omega)$$

Bilangan k disebut sebagai koefisien tahanan yang nialinya tergantung pada  $\rho, f'_c, dan f_y$ . Untuk setiap nilai  $\rho$  dan berbagai pasangan  $f'_c$  dan  $f_y$ . Nilai  $\rho$  yang digunakan adalah nilai maksimum atau  $0.75 \rho b$ .

Dengan demikian ungkapan secara umum untuk  $M_R$  menjadi:

$$M_R = \phi b d^2 k$$

## 5. 12. PERENCANAAN PLAT TERLENTUR SATU ARAH

Pada saat sekarang, di mana perkembangan teknologi telah meningkat dengan pesat, untuk mendapatkan bahan struktur beton bertulang mutu tinggi bukanlah sesuatu yang sulit seperti masa lalu. Dengan menggunakan bahan baja dan beton mutu tinggi akan didapat ukuran atau dimensi komponen struktur beton bertulang yang semakin mengecil. Sebenarnya pengaruh peningkatan kuat atau mutu bahan terhadap defleksi komponen struktur hanya kecil saja, yang berpengaruh besar adalah ukuran penampang atau dalam hal ini momen inersia penampang. Akan terjadi lendutan lebih besar pada komponen struktur bahan mutu tinggi dibandingkan dengan komponen struktur yang sama tetapi dibuat dari bahan dengan mutu lebih rendah, yang pada umumnya luas penampangnya lebih besar sehingga momen inersianya juga besar.

Tebal minimum balok dan plat satu arah  
(kutipan Tabel 3.2.5(a) SK SNI T-15-1991-03)

KOMPONEN STRUKTUR	TEBAL MINIMUM, h			
	DUA TUMPUAN	SATU UJUNG MENERUS	KEDUA UJUNG MENERUS	KANTILEVER
	KOMPONEN TIDAK MENDUKUNG ATAU MENYATU DENGAN PARTISI ATAU KONSTRUKSI LAIN YANG AKAN RUSAK AKIBAT LENDUTAN BESAR			
Plat solid satu arah	$\frac{l}{20}$	$\frac{l}{24}$	$\frac{l}{28}$	$\frac{l}{10}$
Balok atau plat lajur satu arah	$\frac{l}{16}$	$\frac{l}{18.5}$	$\frac{l}{21}$	$\frac{l}{8}$

Penentuan tebal plat terlentur satu arah tergantung pada beban atau momen lentur yang bekerja, defleksi yang terjadi, dan kebutuhan kuat geser yang dituntut. Standar SK SNI T-15-1991-03 menentukan kriteria tinggi balok dan plat dikaitkan dengan bentangnya dalam rangka usaha membatasi lendutan besar yang berakibat mengganggu kemampuan kelayanan atau kinerja struktur pada beban bekerja. Daftar 2.1 (kutipan dari Tabel 3.2.5.a SK SNI T-15-1991-03) memberikan ketebalan minimum balok dan plat satu arah dikaitkan dengan panjang bentangan. Ketentuan tersebut dapat dipakai untuk komponen struktur yang tidak mendukung atau berhubungan dengan struktur lain yang cenderung akan rusak akibat lendutan. Apabila mendukung atau berhubungan dengan struktur seperti tersebut, lendutan harus dihitung secara analitis. Untuk balok atau plat satu arah dengan tebal kurang dari nilai yang tertera dalam daftar, lendutannya harus dihitung dan ukuran tersebut dapat digunakan apabila lendutan memenuhi syarat. Nilai-nilai dalam daftar 3.2.5.a hanya diperuntukkan bagi balok dan plat beton bertulangan satu arah, nonprategangan, berat beton normal ( $w_c=23 \text{ kN/m}^3$ ) dan baja tulangan BJTD mutu 40. Apabila digunakan mutu tulangan baja yang lain nilai daftar harus dikalikan dengan faktor berikut :

$$\left(0.4 + \frac{f_y}{700}\right)$$

Untuk struktur beton ringan dengan satuan massa di antara  $1500\text{-}2000 \text{ kgf/m}^3$  nilai dari daftar dikalikan dengan faktor berikut :

$$(1.65 - 0.005 w_c)$$

Akan tetapi bagaimanapun nilai yang didapat tidak boleh kurang dari 1.09 sedangkan satuan  $w_c$  dalam  $\text{kgf/m}^3$ . Sebagai contoh, untuk plat satu arah yang terletak pada dukungan sederhana, beton dengan berat normal dan tulangan baja mutu 40, tebal minimum yang diperlukan adalah  $\frac{1}{20l}$  jika dikehendaki menggunakan dimensi tersebut tanpa menghitung lendutan, di mana  $l$  adalah panjang bentang plat.

SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.16.7 memberikan ketentuan tebal selimut beton perlidungan tulangan baja untuk plat yang permukaannya tidak terbuka atau berhubungan langsung dengan cuaca luar, atau tidak kontak langsung dengan tanah. Selimut beton tidak boleh kurang dari 20 mm apabila plat, dinding, dan plat berusuk menggunakan batang tulangan D36 atau kurang. Tidak boleh kurang dari 40 mm apabila menggunakan batang tulangan D44 dan D56. Untuk permukaan plat yang terbuka terhadap cuaca luar atau tulangan seperti D19 sampai dengan D56, dan 40 mm apabila menggunakan tulangan D16, kawat W31 atau D31, atau ukuran yang lebih kecil. Apabila plet beton dicor langsung dan permanen berhubungan dengan tanah, selimut beton minimum untuk segala ukuran tulangan baja adalah 70 mm.

Seperti yang telah diuraikan di depan, cara yang dipakai SK SNI T-15-1991-03 untuk membatasi timbulnya lendutan besar ialah dengan menerapkan syarat tebal minimum. Akan tetapi meskipun plat telah memenuhi syarat tebal minimum, misalnya, masih tetap harus dirancang untuk kuat lenturnya. Lendutan plat tidak perlu dihitung ataupun diperiksa secara analitis kecuali apabila plat merupakan struktur pendukung atau berhubungan dengan komponen lain yang akan rusak bila mengalami lendutan besar.

Standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.1.7 memberikan ketentuan mengenai panjang bentangan untuk perencanaan balok atau plat yang secara integral tidak menyatu dengan dukungannya, sebagai berikut :

**Panjang bentang = bentang bersih + tebal komponen**

Ketentuan tersebut dapat digunakan sebagai pedoman tetapi nilainya tidak boleh lebih besar dari jarak antar pusat dukungan. Karena tebal plat belum ditentukan, umumnya pada awal perencanaan digunakan jarak antar pusat dukungan.

Langkah-langkah perencanaan plat terlentur satu arah sebagai berikut:

1. Hitung  $h$  minimum plat sesuai dengan Daftar 2.1 atau SK SNI T-15-1991-03 Tabel 3.2.5.a, pembulatan dalam centimeter.
2. Hitung beban mati berat sendiri plat, dan kemudian hitunglah beban rencana total  $w_u$ .
3. Hitung momen rencana  $M_u$ .
4. Perkirakan dan hitung tinggi efektif plat  $d$ , gunakan batang tulangan baja D19 dan selimut beton pelindung tulangan baja 20 mm, dengan hubungannya sebagai berikut:

$$d = h - 29.5 \text{ mm}$$

5. Hitung  $k$  perlu

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

6. Tentukan rasio penulangan  $\rho$  dan tidak melampaui  $\rho_{maks}$ . Apabila  $\rho > \rho_{maks}$  maka plat dibuat lebih tebal lagi.
7. Hitung  $A_s$  yang diperlukan,  $A_s = \rho b d$
8. Dengan menggunakan tabel pilihlah tulangan baja pokok yang akan dipasang. Periksa jarak maksimum antara tulangan dari pusat ke pusat  $3h$  atau 500 mm. Periksa ulang anggapan yang digunakan pada langkah ke 4.
9. Sesuaikan SK SNI T-15-1991-03 pilih tulangan untuk susut dan suhu sebagai berikut:  
 $A_s = 0.0020bh$  untuk baja mutu 30  
 $A_s = 0.0018bh$  untuk baja mutu 40  
 $A_s = 0.0018 bh \left(\frac{400}{f_y}\right)$  untuk baja lebih tinggi dari 40
10. Jumlah luas penampang tulangan baja pokok tidak boleh kurang dari jumlah luas penulangan susut dan suhu.
11. Buatlah sketsa rancangan.