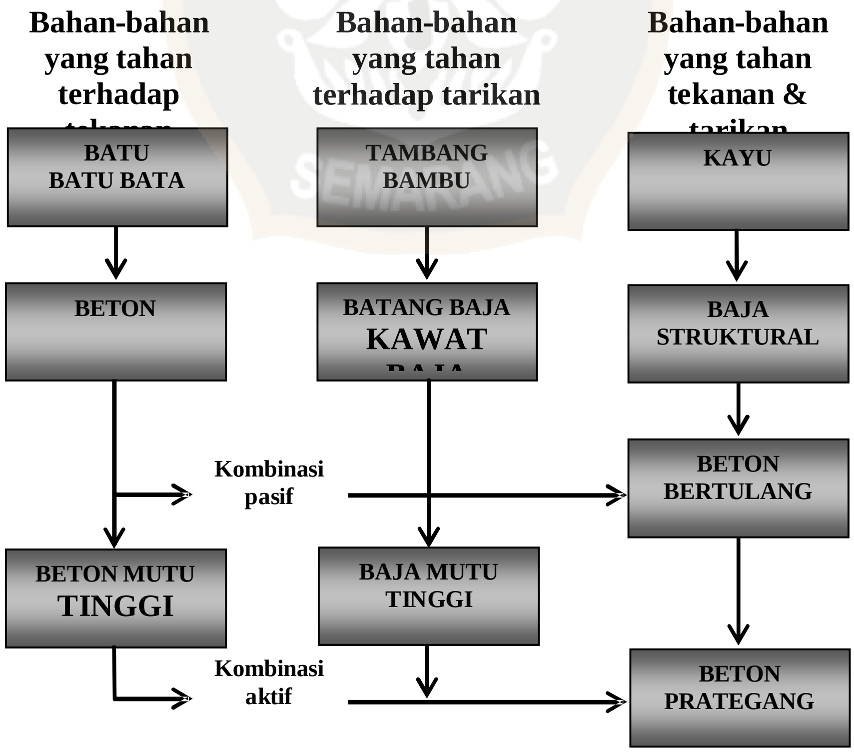
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. TINJAUAN UMUM

Perkembangan bahan-bahan bangunan dalam ilmu struktur bangunan dibagi dalam tiga jenis *(Gambar 2.1)*. Jenis pertama adalah bahan-bahan yang tahan terhadap tekanan yang dimulai dari batu dan batu bata, kemudian berkembang menjadi beton dan akhir-akhir ini berkembang menjadi beton berkekuatan tinggi. Jenis kedua adalah bahan-bahan yang tahan terhadap tarikan seperti bambu dan tambang, kemudian besi dan baja, dan akhir-akhir ini menjadi baja mutu tinggi. Jenis ketiga adalah bahan-bahan yang tahan terhadap tekanan dan tarikan. Pertama-tama digunakan kayu, kemudian baja struktural, beton bertulang dan berkembang pada penggunaan beton prategang.



Gambar 2.1. Perkembangan Bahan-Bahan Bangunan

2.2. DASAR-DASAR PERITUNGAN METODE LENTUR "n"

2.2.1. Asumsi dalam Perhitungan

Perhitungan struktur dengan *metode elastis* pada prinsipnya merupakan perhitungan struktur dengan cara lentur "n" yang memperhitungkan variabel "n", dimana n = Es/Ec (Es = modulus elastisitas baja, Ec = modulus elastisitas beton), sehingga mutu beton dan mutu baja sangat mempengaruhi harga "n" serta perhitungan struktur.

Semakin baik mutu beton, semakin rendah harga "n", sebaliknya semakin buruk mutu beton semakin tinggi harga "n". Asumsi-asumsi yang dipakai dalam perhitungan metode elastis :

1. Bidang-bidang rata dianggap tetap rata setelah mengalami lentur dan tetap tegak lurus pada sumbu konstruksi.
2. Regangan-regangan dalam garis penampang dianggap berbanding lurus dengan jaraknya ke garis netral.
3. Pada keadaan elastis dianggap terdapat hubungan linier antara tegangan tekan beton dan regangan tekan beton yang ditentukan oleh modulus tekan beton Ec. Dalam segala hal, modulus tekan beton tidak boleh kurang dari :
   - Ø Pembebanan tetap : Ec = 6400 •f'c (kg/cm^2)
   - Ø Pembebanan sementara : Ec = 9600 •f'c (kg/cm^2)
4. Setiap satuan luas baja dapat dianggap ekuivalen dengan "n" satuan luas beton dalam hal memikul tegangan, tegangan baja di suatu titik penampang dapat dianggap "n" kali tegangan beton di titik yang sama. Besaran "n" disebut angka ekuivalensi dan ditentukan oleh rumus : n = Es/Ec (Es = modulus elastisitas baja, Ec = modulus elastisitas beton).

Keterangan notasi :

A = luas tulangan tarik.

A' = luas tulangan tekan.

A_1 = luas tulangan tarik yang letaknya terjauh pada gaya normal tarik dengan eksentrisitas yang kecil.

A_2 = luas tulangan tarik yang letaknya terdekat pada gaya normal tarik dengan eksentrisitas yang kecil.

b = lebar penampang persegi.

C = koefisien untuk menghitung eksentrisitas tambahan e_1.

Ca, Cb = koefisien penampang.

d' = jarak dari titik berat tulangan tekan sampai tepi penampang yang tertekan.

D = resultante gaya-gaya tekan di dalam penampang.

Da = gaya tekan dalam tulangan tekan.

Db = gaya tekan beton (resultante dari blok tegangan beton).

e_a = eksentrisitas gaya normal terhadap sumbu tulangan tarik.

e = eksentrisitas gaya normal terhadap sumbu balok (kolom).

e_o = eksentrisitas mula gaya normal.

e_1,e_2 = eksentrisitas tambahan gaya normal untuk memperhitungkan tekuk.

h = tinggi manfaat penampang.

= jarak antara titik berat tulangan tarik sampai tepi penampang yang tertekan.

h_t = tinggi total penampang.

i = koefisien pada lentur dengan gaya normal yang harus dikalikan dengan luas tulangan tarik untuk memperoleh suatu penampang ideal terhadap momen lentur dengan gaya normal dalam stadium retak dapat diperlakukan sama seperti lentur murni.

k,k_1,k_2 = faktor yang harus dikalikan dengan bh^2 untuk memperoleh momen pikul penampang.

lk = panjang tekuk kolom.

M = momen lentur yang bekerja pada penampang.

n = angka ekivalensi.

= perbandingan antara modulus elastisitas baja dan beton.

N = gaya normal yang bekerja pada penampang.

T = gaya tarik dalam tulangan tarik.

T_1 = gaya tarik dalam tulangan yang letaknya jauh dari gaya normal tarik dengan eksentrisitas kecil.

T_2 = gaya tarik dalam tulangan yang letaknya terdekat pada gaya normal tarik dengan eksentrisitas kecil.

y = jarak garis netral terhadap tepi penampang yang tertekan.

z = lengan momen dalam.

= jarak antara titik-titik tangkap gaya D dan T.

• = perbandingan antara luas tulangan tekan dan luas tulangan tarik.

• = koefisien lengan momen dalam.

= perbandingan antara lengan momen dalam dan tinggi manfaat penampang.

$•_o$ = koefisien lengan momen dalam pada keadaan seimbang.

• = koefisien jarak titik tangkap gaya D terhadap tepi penampang yang tertekan.

• = koefisien jarak garis netral.

= perbandingan antara jarak garis netral dan tinggi manfaat penampang.

$•_0$ = koefisien jarak garis netral pada keadaan seimbang.

• = perbandingan jarak antar tulangan dengan tinggi total penampang kolom pada sumbu yang ditinjau.

$•_a$ = tegangan baja tarik.

$•'_a$ = tegangan baja tekan.

$•'_b$ = tegangan beton di serat yang paling tertekan.

$•_b$maks = tegangan beton di serat yang paling tertekan pada lentur dengan gaya normal tekan pada stadium utuh.

$•_b$min = tegangan beton di serat yang paling tidak tertekan pada lentur dengan gaya normal tekan pada stadium utuh.

$•'_o$ = tegangan rerata pada penampang kolom = N / (b . h_t)

• = perbandingan antara tegangan baja tarik dan n kali tegangan tekan beton di serat yang paling tertekan.

$•_0$ = perbandingan antara tegangan baja tarik dan n kali tegangan tekan beton di serat yang paling tertekan pada keadaan seimbang.

• = koefisien tulangan tarik.

= perbandingan antara luas tulangan tarik dan luas (b x h).

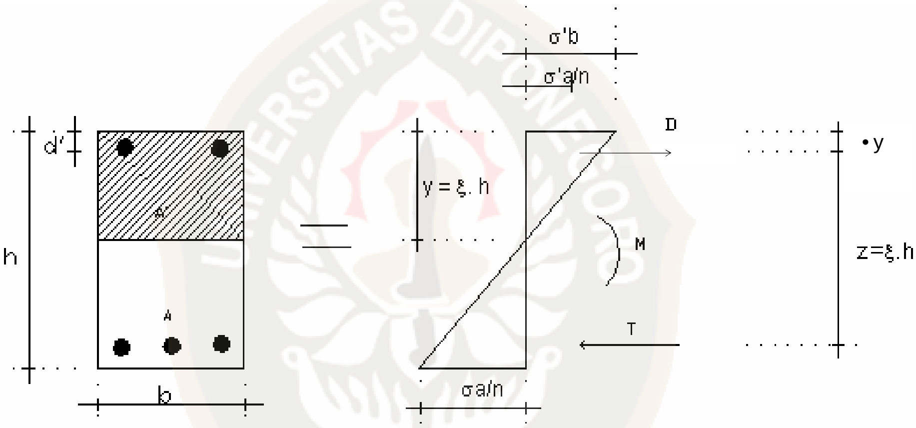
$\bullet_0$ = koefisien tulangan tarik pada keadaan seimbang.

•' = koefisien tulangan tekan.

= perbandingan antara luas tulangan tekan dan luas (b x h).

2.2.2. Penampang Beton yang Memikul Lentur Murni

Untuk menurunkan rumus-rumus yang akan dipakai pada perhitungan penampang beton bertulang yang memikul beban lentur murni dapat dilihat pada *Gambar 2.2* seperti di bawah ini.



(a) (b)

Gambar 2.2. Diagram Tegangan pada Penampang Balok Yang Memikul Lentur Murni

Menentukan koefisien-koefisien dasar berdasarkan rumus-rumus sebagai berikut:

$$\bullet = \frac{y}{h} \quad \textbf{(2.1)}$$

$$\bullet = \frac{s_a}{n s_b} \quad \textbf{(2.2)}$$

$$\bullet' = \frac{s_a}{s_b} \quad \textbf{(2.3)}$$

$$\bullet = \frac{z}{h} \quad \textbf{(2.4)}$$

$$\bullet = \frac{A}{bh} \qquad \textbf{(2.5)}$$

$$\bullet = \frac{A'}{A} \qquad \textbf{(2.6)}$$

$$\bullet' = \frac{A'}{bh} dw \qquad \textbf{(2.7)}$$

Selanjutnya dari perbandingan tegangan-tegangan *(Gambar 2.2b)* kita mendapat koefisien-koefisien :

$$\bullet = \frac{1-x}{x} \qquad \textbf{(2.8)}$$

$$\bullet' = \frac{1-x}{x - \frac{d'}{h}} \qquad \textbf{(2.9)}$$

Di dalam uraian ini kita senantiasa akan mengabaikan pengurangan luas beton oleh luas tulangan tekan dan selalu menganggap bahwa angka ekivalensi (n) untuk tulangan tekan adalah sama dengan untuk tulangan tarik. Jarak garis netral (y) sebagai jarak garis berat penampang ideal memenuhi persamaan :

$$\frac{1}{2}.b.y^2 + n.A'.(y - d') – n.A.(h - y) = 0$$

Setelah diuraikan menghasilkan koefisien tulangan tarik (•) di dalam persamaan :

$$\textbf{n.}\bullet = \frac{\frac{1}{2}x^2}{\frac{d'}{h}d + 1 - x(d + 1)} \qquad \textbf{(2.10)}$$

Untuk tulangan tunggal berlaku A' = 0, berarti • = 0, sehingga persamaan menjadi :

$$\textbf{n.}\bullet = \frac{\frac{1}{2}x^2}{1 - x} \qquad \textbf{(2.11)}$$

Jarak titik tangkap resultante gaya-gaya tekan D terhadap tepi balok yang tertekan kita nyatakan dengan •y *(Gambar 2.2b)*, yang mana ditentukan oleh persamaan :

$$\bullet.y = \frac{D_b x \frac{1}{3} + D_a x\, d'}{D_a + D_b}$$

Setelah disubstitusikan harga-harga D_b dan D_a yang sesuai dan diuraikan lebih lanjut

didapat nilai : $\bullet.\bullet = \dfrac{\frac{1}{6}x^3 + dhw\frac{d'}{h}(x - \frac{d'}{h})}{\frac{1}{2}x^2 + dhw(x - \frac{d'}{h})}$

Lengan momen dalam adalah : z = •.h = h – •.y = (1 – •.•).h

Sehingga koefisien lengan momen dalam menjadi :

$$\bullet = 1 - \frac{\frac{1}{6}x^3 + dn\frac{d'}{h}(x - \frac{d'}{h})}{\frac{1}{2}x^2 + dnw(x - \frac{d'}{h})} \quad \textbf{(2.12)}$$

Untuk tulangan tunggal berlaku lagi A’= 0 atau • = 0, sehingga persamaan beralih menjadi :

$$\bullet = 1 - \frac{1}{3}\bullet \quad \textbf{(2.13)}$$

Keseimbangan momen mensyaratkan M = T.z, yang memberikan:

$$\mathbf{M} = A.\bullet_a.\bullet.h = \bullet.\bullet.b.h.\frac{s_a}{n}.\bullet.h \quad \textbf{(2.14)}$$

Dari persamaan di atas dapat ditulis persamaan :

$$\mathbf{h^2} = \frac{nM}{s_a b} x \frac{1}{nwz} = \frac{M}{s'_b} x \frac{1}{hwjz} \quad \textbf{(2.15)}$$

Menghasilkan :

$$\mathbf{h} = C_a.\sqrt{\frac{nM}{s_a b}} = C_b.\sqrt{\frac{M}{s'_b b}} \quad \textbf{(2.16)}$$

Dengan koefisien-koefisien penampang :

$$\mathbf{C_a} = \sqrt{\frac{1}{nwz}} \quad \textbf{(2.17)}$$

$$\mathbf{C_b} = \sqrt{\frac{1}{nwjz}} \quad \textbf{(2.18)}$$

Persamaan (2.14) juga memberikan persamaan luas tulangan tarik :

$$\mathbf{A} = \frac{M}{s_a zh} \quad \textbf{(2.19)}$$

Dari penurunan rumus-rumus di atas dapat dilihat, bahwa apabila • dan (d'/h) diketahui, maka kpefisien-koefisien •, •', n•, •, C_a, dan C_b merupakan fungsi-fungsi dari • saja. Jadi, untuk harga • dan (d'/h) yang diketahui, maka untuk harga-harga • yang variabel di dalam tabel dapat dihitung koefisien-koefisien penampang yang bersangkutan.

Pembebanan luar (M) dan koefisien-koefisien penampang dihubungkan satu sama lain dengan perantaraan persamaan (2.16) dan (2.19). Tabel-tabel tersebut adalah yang dimuat dalam tulisan ini, dan yang telah dihitung untuk • = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,67; dan 2,5. Sedangkan (d'/h) senantiasa dianggap = 0,10. Harga (d'/h)=0,10 adalah harga yang pada umumnya dipenuhi oleh balok-balok di dalam praktek.

Di dalam PBI 1971, persamaan-persamaan untuk penampang persegi akibat lentur murni dinyatakan sedikit berbeda daripada yang telah diturunkan di muka. Dengan transformasi lebih lanjut, persamaan (2.15) dapat ditulis sebagai :

$$M = \frac{s_a}{n} nwzbh^2 = \bullet'_b.n.\bullet.\frac{1-x}{x}\bullet.b.h^2$$

Dari persamaan ini diperoleh momen pikul penampang persegi menurut PBI 1971, yaitu :

$$\mathbf{M} = k.b.h^2 \qquad \mathbf{(2.20)}$$

Dimana faktor k adalah harga terkecil diantara k_1 dan k_2 menurut persamaan-persamaan :

$$\mathbf{k_1} = \frac{s_a}{n} nwz \qquad \mathbf{(2.21)}$$

$$\mathbf{k_2} = \bullet'_b.n.\bullet.\frac{1-x}{x} z \qquad \mathbf{(2.22)}$$

Koefisien jarak garis netral • di dalam PBI didapat dari persamaan (2.10) dengan memecahkan persamaan kuadrat, yaitu :

$$\bullet = n.\bullet.\mathbf{[\ -(1+\bullet) +} \sqrt{(1+d)^2 + \frac{2}{nw}(1+\frac{d'}{h}d)}\ \mathbf{]} \qquad \mathbf{(2.23)}$$

Koefisien lengan momen dalam pada PBI 1971 ditentukan dengan persamaan yang sama seperti persamaan (2.12).

Pada keadaan seimbang, yaitu apabila tegangan baja dan tegangan beton keduanya mencapai tegangan yang diijinkan, koefisien jarak garis netral $\bullet_0$ didapat dari persamaan (2.8), yaitu :

$$\bullet_0 = \frac{1}{1+j_0} = \frac{1}{1+\dfrac{s_a}{ns_b}} \qquad \textbf{(2.24)}$$

Koefisien tulangan tarik pada keadaan seimbang yang dicantumkan dalam PBI didapat dengan mensubstitusikan $\bullet_0$ di atas ke dalam persamaan (2.10) yaitu :

$$n.\bullet_0 = \frac{1}{2(1+\dfrac{s_a}{ns_b})\left[\dfrac{s_a}{ns_b}(1+\dfrac{d'}{hd}) - d(1-\dfrac{d'}{h})\right]} \qquad \textbf{(2.25)}$$

Dengan diketahuinya $n\bullet_0$, maka di dalam tabel dengan • yang sesuai dapat dicari harga koefisien-koefisien $C_a = C_{a0}$ atau $C_b = C_{b0}$ atau $\bullet = \bullet_0$ yang bersangkutan, sehingga momen pikul seimbang M_0 dapat dihitung melalui persamaan (2.16) atau (2.19).

2.2.3. Penampang Beton yang Memikul Lentur dengan Gaya Normal

Persoalan lentur dengan gaya normal dapat dipecahkan dengan memindahkan gaya normal yang bekerja eksentris pada penampang sedemikian rupa hingga gaya normal tersebut tepat berada di sumbu tulangan tarik. Gaya normal ini menambah *(Gambar 2.3b)* atau mengurangi *(Gambar 2.3c)* gaya di dalam tulangan tarik, bergantung pada sifat gaya normal tersebut berupa gaya tekan atau gaya tarik. Apabila eksentrisitas gaya normal terhadap sumbu tulangan tarik adalah e_a, maka momen lentur yang timbul karena perpindahan gaya normal eksentris ke sumbu tulangan tarik adalah :

$$\mathbf{M} = N.e_a \qquad \textbf{(2.26)}$$

Suatu penampang yang dibebani oleh momen M = N.e dan gaya normal N yang tepat berada di sumbu tulangan tarik memerlukan tulangan tarik sebesar:

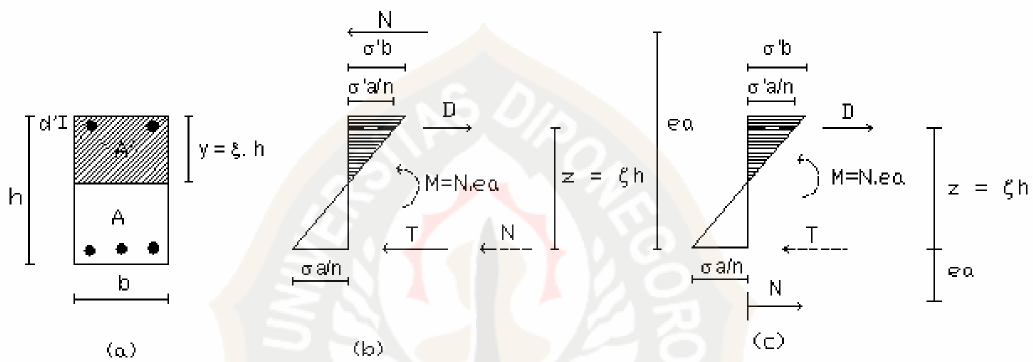
$$\mathbf{A} = \frac{N.e}{s_a zh} - \frac{N}{s_a} \qquad \textbf{(2.27)}$$

Dimana N harus diberi tanda positif apabila berupa gaya normal tekan dan tanda negatif apabila berupa gaya normal tarik.

Persamaan (2.27) dapat kita uraikan lebih lanjut sehingga menjadi :

$$A \;=\; \frac{N.e_a}{s_a zh}\left(1 - z\,\frac{h}{e_a}\right) \text{ atau,}$$

$\mathbf{i.A} \;=\; \dfrac{N.e_a}{s_a zh}$	**(2.28)**
$\mathbf{i} \;=\; \dfrac{1}{1\text{-}z\,\dfrac{h}{e_a}}$	**(2.29)**



Gambar 2.3. Diagram Tegangan pada Penampang Balok Akibat Lentur dengan Gaya Normal

Di dalam persamaan (2.28) dan (2.29), N dan e_a harus diberi tanda negatif apabila gaya normal N berupa gaya tarik. Dengan demikian, maka i > 1 untuk gaya normal tekan dari i < 1 untuk gaya normal tarik.

Apabila sekarang kita bandingkan persamaan (2.28) dengan persamaan (2.19), maka terlihat bahwa kedua persamaan tersebut adalah identik, hanya saja pada lentur murni $N.e_a$ = M dan i =1. Apa artinya i = 1? Bila kita perhatikan persamaan (2.29), maka i = 1 terjadi apabila e_a = ~ (tak terhingga), dan memang benar pada lentur murni itu eksentrisitas gaya normal N (=0) adalah e_a = M/N = M/0 = ~ dan $N.e_a$ beralih menjadi M.

Kesimpulan penting yang dapat ditarik dari uraian di atas adalah, bahwa pesamaan (2.28) adalah persamaan umum yang berlaku untuk lentur pada stadium retak, baik lentur murni maupun lentur dengan gaya normal, dengan catatan bahwa pada lentur murni $N.e_a$ beralih menjadi M.

Kesimpulan di atas berarti pula bahwa dengan mengganti tulangan tarik di dalam penampang ideal dari A menjadi i.A diperoleh suatu penampang ideal yang baru, terhadap mana lentur dengan gaya normal pada stadium retak dapat diperlakukan sama seperti lentur murni.

Arti fisik dari pergantian A menjadi i.A adalah beralihnya garis berat dari penampang ideal semula, sedemikian rupa sehingga menjadi berimpit dengan garis netral penampang ideal kedua. Pada lentur murni jelaslah, bahwa penampang ideal asli (pertama) adalah penampang ideal kedua.

Sehubungan dengan uraian di atas, maka koefisien tulangan tarik pada lentur dengan gaya normal dapat ditulis sebagai :

$$\bullet = \frac{iA}{bh} \qquad \textbf{(2.30)}$$

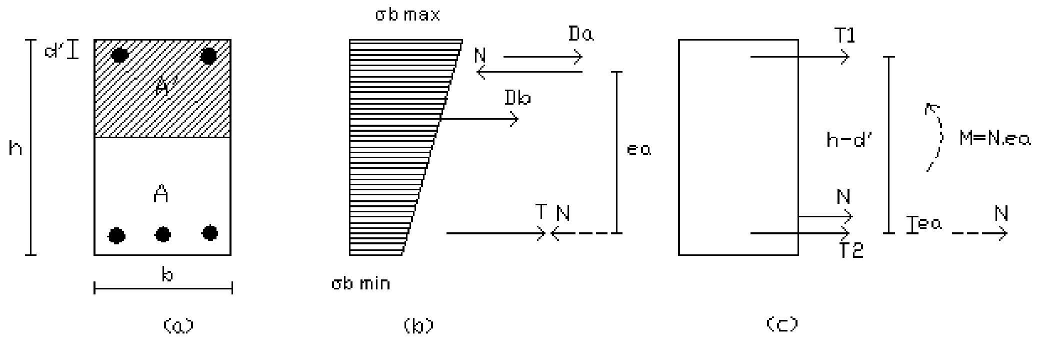
Dari uraian di atas jelas pula, bahwa tabel-tabel yang telah diuraikan pada lentur murni, sepenuhnya berlaku juga untuk lentur dengan gaya normal.

Untuk mempermudah penentuan koefisien i, maka untuk berbagai harga • dan e_a/h yang positif (jadi untuk tekan eksentris), di dalam salah satu tabel yang dimuat dalam tulisan ini telah dihitung harga-harga koefisien i yang bersangkutan.

Prinsip pengembalian persoalan lentur dengan gaya normal kepada persoalan lentur murni dengan menggunakan koefisien i dapat dipakai juga sepenuhnya pada keadaan batas.

Dalam hal gaya normal yang bekerja berupa gaya tekan dengan eksentrisitas yang kecil, maka seluruh penampang akan mengalami tekanan dan kalaupun terjadi tarikan, tegangan tarik tersebut rendah nilainya dan masih dapat dipikul oleh beton *(Gambar 2.4b)*.

Dalam hal gaya normal yang bekerja berupa gaya tarik dengan eksentrisitas yang kecil, maka seluruh penampang akan mengalami tarikan. Pemindahan gaya normal ke sumbu tulangan tarik di sini menyebabkan momen lentur $N.e_a$ yang bertanda negatif, artinya menyebabkan tarikan pada serat atas dan tekanan pada serat bawah *(Gambar 2.4c)*.



Gambar 2.4. Diagram Tegangan pada Penampang Balok Akibat Gaya Tarik

Berhubung beton senantiasa tidak dapat menahan tegangan tarik, maka gaya normal N yang eksentris ini harus dipikul oleh tulangan atas A_2 dan tulangan A_1, yang besarnya ditentukan oleh persamaan-persamaan :

$$\mathbf{A_2} = \frac{N.e_a}{s_a(h-d')} \qquad \mathbf{(2.31)}$$

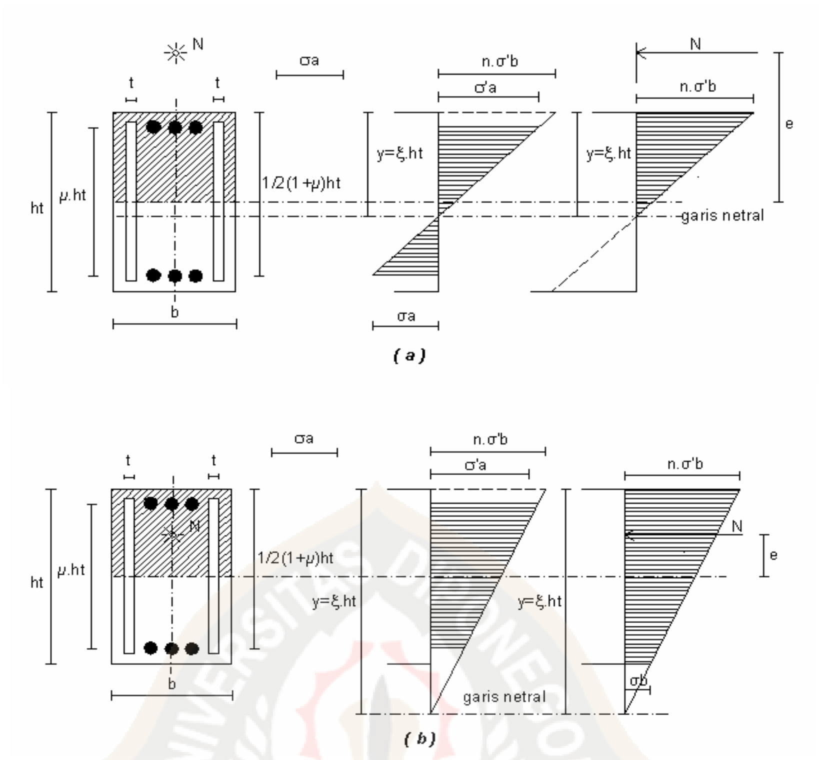
$$\mathbf{A_1} = \frac{N}{s_a} - A_2 \qquad \mathbf{(2.32)}$$

2.2.4. Penampang Kolom Persegi dengan Tulangan Simetris pada Empat Sisi

Untuk mempermudah penurunan rumus-rumus perhitungan tulangan pada penampang kolom persegi dapat dilihat pada *Gambar 2.5* di bawah ini. *Gambar 2.5a* menunjukkan bahwa kolom dalam kondisi elastis dengan letak garis netral berada di dalam penampang. Sedangkan *Gambar 2.5b* menunjukkan bahwa kolom dalam kondisi elastis dengan letak garis netral berada di luar penampang.

Batang-batang tulangan yang tersebar merata pada keempat sisi penampang kolom dapat diasumsikan sebagai pelat baja tipis yang memanjang searah garis sumbu kolom dan memiliki ketebalan :

$$\mathbf{t} = \frac{1/4.A_{tot}}{m.h_t} = \frac{v.b}{4.m} \qquad \mathbf{(2.33)}$$



Gambar 2.5. Kondisi Elastis pada Penampang Kolom Persegi

Besar tegangan tekan baja (•'$_a$) dan tegangan tarik baja (•$_a$) yang tejadi pada penampang beton adalah :

$$\bullet'_a = n.\bullet'_b.\left(1 - \frac{1-m}{2.x}\right) \qquad \textbf{(2.34)}$$

$$\bullet_a = n.\bullet'_b.\left(1 - \frac{1+m}{2.x}\right) \qquad \textbf{(2.35)}$$

a. Kondisi 1 (• • 1)

Apabila koefisien garis netral *(• • 1)*, maka disebut dengan kondisi elastis dengan letak garis netral berada di dalam penampang. Resultan gaya pada tulangan (N$_a$) dapat ditentukan sebesar :

$$N_a = {}^1/_4.A_{tot}.(\bullet'_a + \bullet_a) + {}^1/_2.\bullet.h_t.2t.(\bullet'_a + \bullet_a) \qquad \textbf{(2.36)}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.33), nilai •'$_a$ dan •$_a$ dari persamaan (2.34) dan persamaan (2.35) ke dalam persamaan (2.36), maka akan diperolah :

$$N_a = {}^1/_2.\bullet'_b.b.h_t.n.\bullet.\left(2 - \frac{1}{x}\right) \qquad \textbf{(2.37)}$$

Dan besar momen yang terjadi akibat gaya pada tulangan terhadap titik berat penampang kolom adalah :

$$M_a = {}^{1}/_{4}.A_{tot}.\ {}^{1}/_{2}.\bullet.h_t.(\bullet'_a - \bullet_a) + {}^{1}/_{2}.\bullet.h_t.2t.\ {}^{1}/_{6}.\bullet.h_t.(\bullet'_a - \bullet_a)$$

Dari hasil substitusi persamaan persamaan (2.33), nilai $\bullet'_a$ dan $\bullet_a$ dari persamaan (2.34) dan persamaan (2.35) ke dalam persamaan di atas, maka persamaan momen akibat gaya pad tulangan dapat disederhanakan menjadi :

$$\mathbf{M_a} = \frac{s'_b.b.h_t^{\,2}}{6.x}.n.\bullet\ .\bullet^2 \qquad \mathbf{(2.38)}$$

Resultan gaya tekan yang terjadi pada beton (D_b) dan resultan momen akibat gaya tekan beton terhadap titik berat penampang kolom (M_b) adalah :

$$\mathbf{D_b} = {}^{1}/_{2}.\bullet'_b.b.h_t.\bullet \qquad \mathbf{(2.39)}$$

$$\mathbf{M_b} = \frac{s'_b.b.h_t^{\,2}}{12}.(3.\bullet - 2.\bullet^2) \qquad \mathbf{(2.40)}$$

Dari persamaan kesetimbangan gaya $N = N_a + D_b$ akan diperoleh persamaan :

$$\mathbf{N} = {}^{1}/_{2}.\ \bullet'_b.b.h_t.n.\bullet\ .(2 - \frac{1}{x}) + {}^{1}/_{2}.\bullet'_b.b.h_t.\bullet$$

Dan lebih lanjut dapat ditulis dalam bentuk sederhana :

$$\frac{N}{b.h_t.s'_b} = {}^{1}/_{2}.(\bullet + (2 - \frac{1}{x})) \qquad \mathbf{(2.41)}$$

Dari persamaan kesetimbangan momen $N.e = M_a + M_b$ akan diperoleh persamaan :

$$N.e = \frac{s'_b.b.h_t^{\,2}}{6.x}.n.\bullet\ .\bullet^2 + \frac{s'_b.b.h_t^{\,2}}{12}.(3.\bullet - 2.\bullet^2)$$

Selanjutnya dapat ditulis dalam bentuk sederhana :

$$\frac{N}{b.h_t.s'_b}.\frac{e}{h_t} = \frac{x}{12}.(3 - 2.\bullet) + \frac{1}{6.x}.n.\bullet\ .\bullet^2 \qquad \mathbf{(2.42)}$$

Setelah mensubstitusikan persamaan (2.41) ke dalam persamaan (2.42) diperoleh persamaan :

$$\frac{e}{h_t} = \frac{x.(3-2x) + \frac{2.n.v}{x}.m^2}{6x + 6.n.w.(2 - \frac{1}{x})} \qquad \mathbf{(2.43)}$$

Akibat gaya normal merata pada penampang kolom, maka akan mengakibatkan terjadinya tegangan rerata ($•'_o$) pada penampang kolom sebesar : $•'_o = \frac{N}{b.h_t}$. Dan dari hasil substitusi nilai $•'_o$ ke dalam persamaan (2.41) didapat persamaan :

$$\frac{s'_o}{s'_b} = {}^1/_2.(• + n.• .(2 - \frac{1}{x})) \qquad \textbf{(2.44)}$$

b. Kondisi 2 (• > 1)

Apabila koefisien garis netral *(• > 1)*, maka disebut dengan kondisi elastis dengan letak garis netral berada di luar penampang. Besar resultan gaya dan momen yang terjadi pada tulangan sama dengan kondisi *(• • 1)*. Namun untuk menentukan gaya dan momen pada beton yang tertekan berbeda dari kondisi pertama.

Resultan gaya tekan yang terjadi pada beton (D_b) dan resultan momen akibat gaya tekan beton terhadap titik berat penampang kolom (M_b) adalah :

$$\mathbf{D_b} = {}^1/_2.•'_b.b.h_t.(2 - \frac{1}{x}) \qquad \textbf{(2.45)}$$

$$\mathbf{M_b} = \frac{s'_b.b.h_t^2}{12.x} \qquad \textbf{(2.46)}$$

Dari persamaan kesetimbangan gaya $N = N_a + D_b$ akan diperoleh persamaan :

$$\mathbf{N} = {}^1/_2.\ •'_b.b.h_t.n.• .(2 - \frac{1}{x}) + {}^1/_2.•'_b.b.h_t.(2 - \frac{1}{x})$$

Dan lebih lanjut dapat ditulis dalam bentuk sederhana :

$$\frac{N}{b.h_t.s'_b} = {}^1/_2.(\ 2 - \frac{1}{x} + n.• .(2 - \frac{1}{x})) \qquad \textbf{(2.47)}$$

Dari persamaan kesetimbangan momen $N.e = M_a + M_b$ akan diperoleh persamaan :

$$N.e = \frac{s'_b.b.h_t^2}{6.x}.n.• . •^2 + \frac{s'_b.b.h_t^2}{12.x}$$

Selanjutnya dapat ditulis dalam bentuk sederhana :

$$\frac{N}{b.h_t.s'_b}.\frac{e}{h_t} = \frac{1}{12}.(\frac{1}{x} + \frac{2.n.v}{x} . •^2 \qquad \textbf{(2.48)}$$

Setelah mensubstitusikan persamaan (2.47) ke dalam persamaan (2.48) diperoleh persamaan :

$$\frac{e}{h_t} = \frac{\frac{1}{x} + \frac{2.n.v}{x}.m^2}{6.(2 - \frac{1}{x}) + 6.n.w.(2 - \frac{1}{x})} \qquad \textbf{(2.49)}$$

Akibat gaya normal merata pada penampang kolom, maka akan mengakibatkan terjadinya tegangan rerata ($\bullet'_o$) pada penampang kolom sebesar : $\bullet'_o = \frac{N}{b.h_t}$. Dan dari hasil substitusi nilai $\bullet'_o$ ke dalam persamaan (2.47) didapat persamaan :

$$\frac{s'_o}{s'_b} = {}^1/_2.(2 - \frac{1}{x} + n.\bullet\ (2 - \frac{1}{x})) \qquad \textbf{(2.50)}$$

2.3. DASAR-DASAR PERITUNGAN METODE ULTIMATE

2.3.1. Asumsi dalam Perhitungan

Pada dasarnya metode ultimate dihitung berdasarkan analisa penampang beton bertulang terhadap kekuatan batas. Dasar-dasar analisa dan desain yang dipergunakan sebagai dasar teori kekuatan batas adalah sebagai berikut :

1. Penampang yang semula rata akan tetap rata setelah terjadi deformasi atau perubahan bentuk. *Dalil J. Bernoulli (1654-1705)* ini tetap berlaku, sampai saat beton mengalami kehancuran.
2. Ikatan antara beton dan tulangan akan tetap dipertahankan, sampai saat kehancuran. Ini berarti bahwa regangan yang terjadi di dalam beton sama dengan regangan yang terjadi pada tulangan.
3. Regangan maksimum yang terjadi di dalam beton $\bullet_c$max adalah 0,003. Anggapan ini berarti bahwa beton, baik yang konvensional maupun yang berkekuatan tinggi, akan hancur setelah mencapai regangan 0,003. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa seringkali regangan maksimum beton dapat mencapai nilai lebih dari 0,003, tetapi di dalam proses analisa dan desain, kelebihan regangan yang mungkin terjadi ini diabaikan.
4. Meskipun beton mampu memikul tegangan tarik, di dalam perencannan kemampuan ini diabaikan, dan kemampuan beton memikul tegangan tarik beton dianggap nol.

5. Untuk mempermudah perhitungan , maka diagram yang menunjukkan hubungan antara tegangan dengan regangan baja tulangan harus dapat dinyatakan secara skematis dan bentuk yang sederhana. Apabila regangan leleh pada baja = $\bullet_y$, maka terdapat hubungan linier antara tegangan dan regangan :

   $f_s = \bullet_s E_s$ untuk $\bullet_s \bullet \bullet_y$

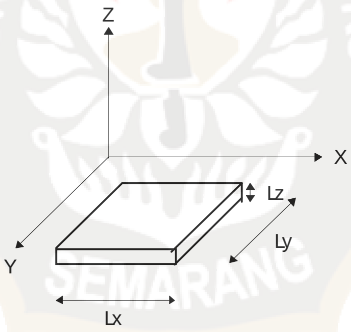
   Setelah mencapai titik leleh di A akan berlaku rumus :

   $f_s = f_y$ untuk $\bullet_s > \bullet_y$

   Tegangan di dalam tulangan tidak boleh melebihi tegangan leleh besi/baja.

2.3.2. Metode Amplop pada Pelat

Pelat merupakan struktur bidang datar (tidak melengkung) yang jika ditinjau secara tiga dimensi mempunyai tebal yang jauh lebih kecil daripada ukuran bidang pelat. Dimensi bidang pelat lx dan ly serta tebal pelat (*h* = lz) dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.6. Dimensi Bidang Pelat

Langkah-langkah perencanaan pelat dengan menggunakan metode amplop adalah sebagai berikut :

1. Menentukan syarat-syarat batas, tumpuan dan panjang bentang.
2. Menentukan tebal pelat (*h*).

   Tebal pelat dapat ditentukan sesuai dengan SKSNI T-15-1991-03, pasal 3.2.5, ayat (3), butir (3)
3. Menghitungkan beban-beban yang bekerja pada pelat.

   $Wu = 1{,}2\ .W_D + 1{,}6\ .W_L$

   Dimana : Wu = Beban total dengan faktor beban.

   W_D = Beban mati.

W_L= Beban hidup.

4. Menghitung nilai ly / lx.
5. Menghitung momen yang menentukan (Mu), dapat ditentukan dari Tabel 4.2.b, buku “Grafik dan Tabel Perencanaan Beton Bertulang”.
6. Menghitung tulangan (arah-x dan arah-y)

Ø Dengan tebal pelat (*h*) yang telah ditentukan dan tebal selimut beton (*p*) yang ditentukan bedasarkan Tabel 2.1, buku “Grafik dan Tabel Perencanaan Beton Bertulang”.

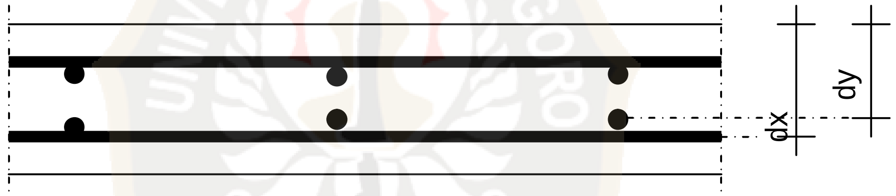
Ø Tinggi efektif : dx = h – p – ½ . ϕ Dx , dan dy = h – p – ϕDx – ½ . ϕDy

Dimana : *h* = tebal pelat.

p = tebal selimut beton.

ϕDx = diameter tulangan arah x.

ϕDy = diameter tulangan arah y.



Gambar 2.7. Letak Tulangan pada Pelat

Ø Menentukan nilai ρ dengan rumus : $Mu/(b.d^2)$ = •.Ø.fy.(1 – 0,588.(fy/f’c).ρ)

Ø Menentukan nilai $•_{min}$ dengan rumus : $•_{min}$ = 1,4 / fy (berdasarkan SKSNI T-1991-03 ayat 3.3.5 butir 1)

Ø Menentukan nilai $•_{maks}$ dengan rumus : $•_{maks}$ = 0,75.•b

Berdasarkan buku “Menghitung Beton Bertulang”, oleh Ir.Udiyanto, maka :

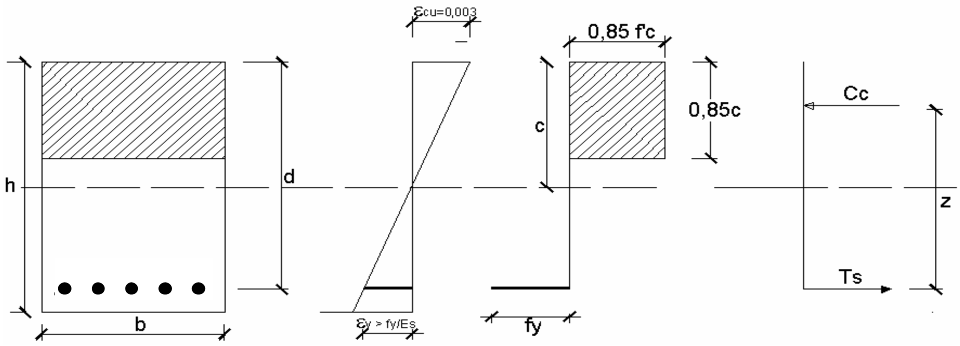
•b = $•_1$.(6000/(6000+fy)).(RL/fy)

Syarat yang harus dipenuhi : $\rho_{min}<\rho<\rho_{maks}$ • Luas tulangan = As = ρ x b x d

7. Memilih tulangan sesuai dengan Tabel 2.2.a, buku “Grafik dan Tabel Perencanaan Beton Bertulang”.

2.3.3. Analisis Penampang yang Memikul Lentur Tanpa Beban Aksial

Untuk memudahkan penurunan rumus untuk perencanaan struktur beton bertulang yang memikul lentur tanpa beban aksial (lentur murni) dapat dilihat dari *Gambar 2.8*.



Gambar 2.8. Diagram Tegangan-regangan pada Penampang yang Memikul Lentur Murni

b, d, c, z dalam satuan m $\quad \bullet_1 = 0,85$

Mu dalam satuan kNm $\quad$ Ø = 0,8 (faktor reduksi kekuatan)

f'c, fy dalam satuan Mpa $\quad$ As = •.b.d.10^6 dalam satuan mm^2

Cc, Ts dalam satuan kN

Cc = 0,85.f'c.a.b.Ø.10^3 = 0,85.f'c.$\bullet_1$.c.b.Ø.10^3 (kN)

Ts = As.fy. Ø = •.b.d.fy.Ø.10^3 (kN)

Persamaan Kesetimbangan :

Cc = Ts

0,85.f'c.$\bullet_1$.c.b.Ø.10^3 = •.b.d.fy. Ø.10^3

0,85.f'c.$\bullet_1$.c = •.d.fy

$$c = \frac{r \,.\, d \,.\, fy}{0{,}85 \,.\, f'c \,.\, b_1} \quad \bullet \quad \frac{c}{d} = \frac{r \,.\, fy}{0{,}85 \,.\, b_1 \,.\, f'c} = 1{,}384 . \bullet . \frac{fy}{f'c}$$

z = d - ½.a = d - ½.$\bullet_1$.c

= d - ½.0,85.c

= d – 0,425.c

$$0{,}425.c = d - z \quad \bullet \quad c = \frac{d - z}{0{,}425}$$

$$\frac{c}{d} = 1{,}384 . \bullet . \frac{fy}{f'c}$$

$$\frac{d - z}{0{,}425.d} = 1{,}384 . \, r \, . \frac{fy}{f'c}$$

$$2{,}353 - \frac{z}{0{,}425 . d} = 1{,}384 . \bullet . \frac{fy}{f'c}$$

$$\frac{z}{0{,}425.d} = 2{,}353 - 1{,}384.\bullet.\frac{fy}{f'c}$$

$$2{,}353.\ \frac{z}{d} = 2{,}353 - 1{,}384.\bullet.\frac{fy}{f'c}$$

$$\frac{z}{d} = 1 - 0{,}588.\bullet.\frac{fy}{f'c}$$

$$Mu = Ts.z = \bullet.b.d.fy.Ø.10^3.\ z$$

$$\bullet\ \ z = \frac{Mu}{Ts} = \frac{Mu}{r.b.d.fy.Ø.10^3}$$

$$\frac{Mu}{r.b.d.fy.Ø.10^3} = (1 - 0{,}588.\bullet.\frac{fy}{f'c}).d$$

$$\frac{Mu}{b.d^2} = \bullet.Ø.fy.10^3.\left(1 - 0{,}588.\frac{fy}{f'c}.\ r\right) \qquad \textbf{(2.51)}$$

$\frac{Mu}{b.d^2}$ dalam satuan MPa

Menghitung luas tulangan dengan rumus :

$$\mathbf{As = \bullet.b.d.10^6} \qquad \textbf{(2.52)}$$

As = luas tulangan dalam satuan mm^2

Dimana :

ly, lx = panjang bentang pelat, dimana ly > lx

Wu = beban ultimate

Mu = Momen yang menentukan

x = koefisien yang didapat dari Tabel 4.2.b, buku “Grafik dan Tabel Perencanaan Beton Bertulang”.

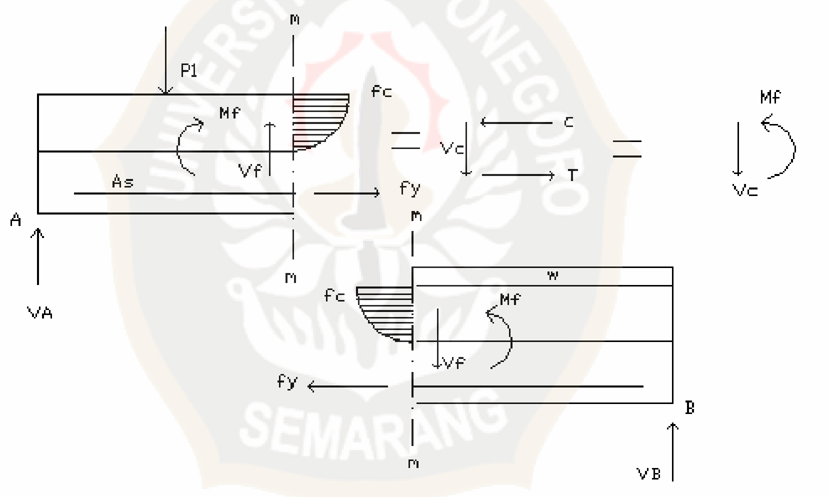
As = luas tulangan

• = rasio penulangan

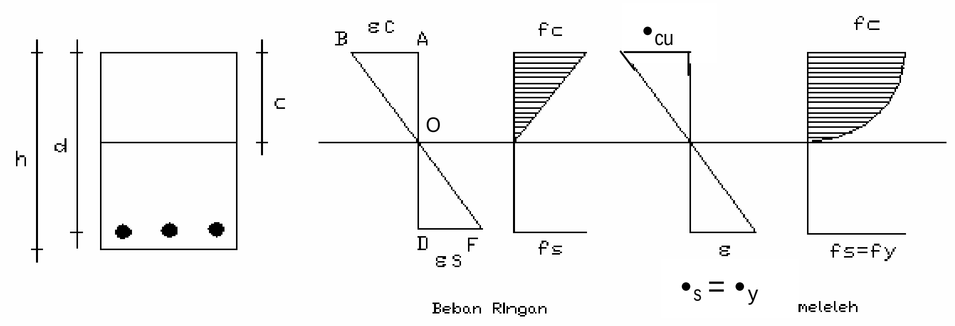
2.3.4. Analisis Panampang Balok

Kemampuan sebuah penampang beton bertulang akan ditentukan berdasar anggapan-anggapan tersebut di atas. Pada suatu konstruksi balok, momen terbesar (Mf) akan terjadi pada lokasi di mana gaya lintang Vf = 0, penampang ini disebut *penampang kritis*. Segera setelah tegangan tarik hancur beton tercapai pada serat balok yang tertarik, retak-retak rambut akan terbentuk diawali dari dasar balok dan menjalar sampai pada penampang netral. Setelah terjadinya keretakan, bagian dari penampang beton ini sebenarnya tidak lagi berfungsi memikul beban dan merupakan penambahan beban mati semata. Daerah di atas garis netral dalam keadaan tertekan, sehingga ikut memikul beban yang bekerja pada gelagar.

Potongan m-m membagi gelagar menjadi dua bagian, *Gambar 2.9* menunjukkan kesetimbangan gaya luar dan dalam yang terjadi pada potongan gelagar tersebut. Gaya normal yang bekerja pada penampang berupa tegangan tekan beton f_c di atas garis netral dan tegangan tarik tulangan f_y di bawah garis netral. Hal ini disebabkan karena tegangan tarik beton diabaikan, dan berdasarkan pengalaman pada saat hancur tulangan akan meleleh.



Gambar 2.9. Kesetimbangan Gaya-gaya pada Balok



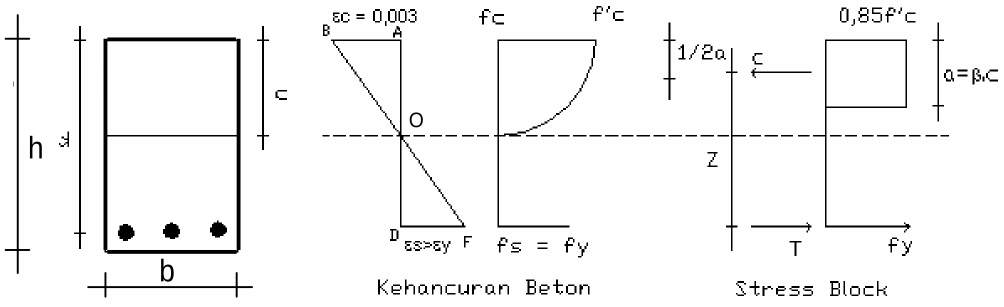
Gambar 2.10. Pola Tegangan-Regangan pada Penampang Balok

Gambar 2.10. menunjukkan pola tegangan dan regangan penampang yang "under-reinforced". Pada kondisi awal dengan pembebanan rendah, tegangan dan regangan yang terjadi baik dalam beton maupun tulangan kecil. Regangan beton AB = $\bullet_c$ « 0,003 dan regangan tulangan DF = $\bullet_s$ « $\bullet_y$. Garis OB menunjukkan regangan yang terjadi di setiap potongan penampang balok. Di titik O regangan = 0, dan ini merupakan lokasi garis netral panampang. Garis netral ini berjarak c dari serat teratas balok.

Distribusi tegangan pada penampang kemudian dapat digambarkan, berdasarkan diagram tegangan-regangan beton. Besarnya tegangan fc di setiap titik dapat dibaca sebagai fungsi dari regangan. Karena beban yang bekerja relatif rendah, distribusi tegangan penampang linier. Untuk daerah tertarik hanya terdapat tegangan tulangan, karena tegangan tarik dalam beton dapat diabaikan.

Apabila beban ditingkatkan regangan yang terjadi akan menigkat juga, sampai pada saat tulangan meleleh ($\bullet_s$ = $\bullet_y$). Retak-retak di daerah tertarik akan meningkat cepat, sebagai akibat melelehnya tulangan. Kehancuran beton telah memasuki tahapan awal, distribusi tegangan dan regangan penampang tampak pada *(Gambar 2.11)*. Kehancuran gelagar terjadi karena :

1. Regangan beton di serat atas (serat tertekan) mencapai nilai maksimum 0,003.
2. Regangan tulangan $\bullet_s$ sama dengan atau lebih besar dari $\bullet_y$ dan tegangan tulangan f_s sama dengan tegangan leleh f_y.



Gambar 2.11. Pola Kehancuran Beton

Gambar 2.11 menunjukkan keadaan dimana regangan beton AB = $\bullet_c$ mencapai 0,003, dan regangan tulangan DF = $\bullet_s$ » $\bullet_y$. Distribusi tegangan beton akan menyerupai diagram tegangan-regangan beton yang sebenarnya, dan tidak linier. Sesaat setelah mencapai 0,003, beton akan hancur pada serat-serat teratas, tepat pada penampang kritis gelagar. Tegangan spesifik f'_c tidak terjadi pada serat balok teratas, sedangkan sedikit di bawahnya seperti tampak dalam gambar. Berdasarkan anggapan bahwa tulangan telah meleleh terlebih dahulu, maka beban pada kondisi inilah yang merupakan beban terbesar yang dapat dipikul gelagar, dan penampang dikatakan telah mencapai "kekuatan batas" nya.

Letak garis netral "c" tidak diketahui dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kesetimbangan gaya dalam : **T = C**

Bila dianggap tulangan telah meleleh maka T = As. fy, sedangkan gaya tekan di dalam beton dapat dihitung dengan menggunakan integral luasan diagram tegangan.

$$C = \int_A^0 fc.dA = \int_0^c b.fc.dy \text{ atau } b \int_0^c fc.dy$$

Penyelesaian integral selain rumit juga membutuhkan waktu yang lama, sehingga dalam praktek sering digunakan suatu penyederhanaan distribusi tegangan berupa "stres block". $\int fc.dy$ adalah luas diagram tegangan yang digantikan oleh stress block dengan tegangan merata sebesar **0,85.f'c** serta kedalaman **a** dari serat balok teratas. Nilai a merupakan fungsi dari jarak garis netral yang sebenarnya.

$$\mathbf{a = \bullet_1.c} \quad \text{dimana } 0 < \bullet_1 < 1$$

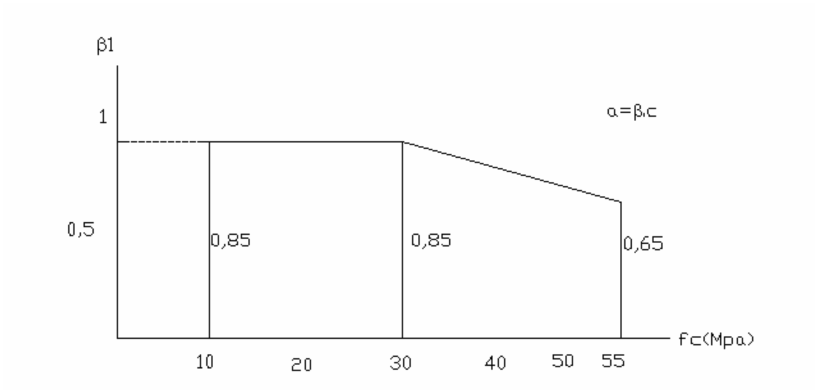
Koefisien $\bullet_1$ ini diperoleh dengan mempersamakan luas *stress block* dengan luas diagram tegangan yang sebenarnya. Gaya tekan beton C pun dapat dihitung :

$$\int fc.dy = a.(0{,}85\ f'c) = \bullet_1.c.(0{,}85\ f'c)$$

$$C = b.\int fc.dy = a.b.(0{,}85f'c)$$

atau $C = \bullet_1.bc.(0{,}85\ f'c)$

Letak titk tangkap gaya tekan C pada diagram yang sebenarnya merupakan titik tangkap gaya tekan pada *stress block*, dan berjarak ½.a = ½.$\bullet_1$.c dari serat teratas. Agar persyaratan ini dipenuhi, titik berat kedua area harus berimpitan dan k.c = ½.$\bullet_1$.c atau $\bullet_1$ = 2.k..



Gambar 2.12. Hubungan β_1 dengan Mutu Beton

Nilai koefisien β_1 ini tergantung bentuk kurva diagram tegangan-regangan beton dan dapat digambarkan sebagai fungsi mutu beton, seperti tampak dalam *(Gambar 2.12)*. Hasil percobaan menunjukkan bahwa β_1 dapat pula dihitung dengan rumus empiris :

$$\beta_1 = 0{,}85 - 0{,}008.(f'c - 30)$$

Tinggi stress block “a” dapat dihitung dengan menggunkana kesetimbangan gaya C = T $\rightarrow$ 0,85.f’c.ab = fy.As

$$\text{atau} \quad a = \frac{T}{0{,}85.f'c.b} = \frac{fy.As}{0{,}85.f'c.b}$$

Letak garis netral kemudian dapat dihitung : $c = \dfrac{a}{b_1}$

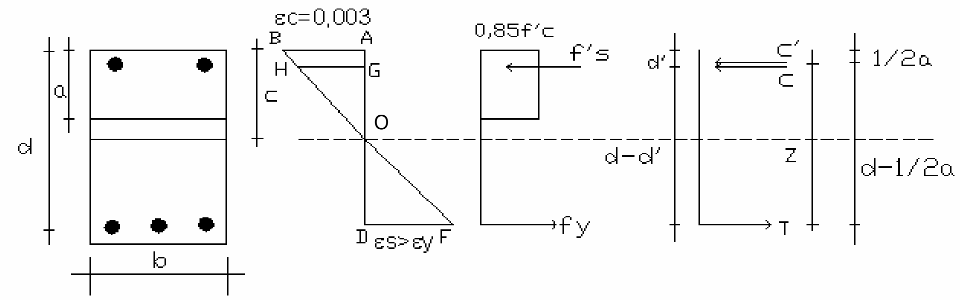
Setelah letak garis netral didapatkan, regangan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan segitiga diagram tegangan.

$$\frac{AB}{OA} = \frac{DF}{OD} \quad \text{dan} \quad \frac{e_c}{c} = \frac{e_s}{d - c}, \text{dan } \varepsilon_s = \varepsilon_c.\left(\frac{d}{c} - 1\right)$$

Apabila beton dalam keadaan *under-reinforced*, maka ε_s yang diperoleh dari hasil perhitungan akan jauh lebih besar dari regangan leleh $\varepsilon_y = \dfrac{fy}{Es}$.

2.3.5. Analisis Penampang Balok dengan Tulangan Rangkap

Dengan menggunakan tulangan rangkap, luas tulangan tarik As dapat ditingkatkan, tetapi kehancuran balok tetap diawali dengan melelehnya tulangan tarik tersebut.



Gambar 2.13. Diagram Tegangan-Regangan pada Penampang dengan Tulangan Rangkap

Penampang di atas memiliki tulangan rangkap dengan luas tulangan A's bertitik tangkap d' dari serat teratas, sehingga d' = selimut beton + ½.Ø.

Rasio pembesian tekan menjadi : A's = •'.b.d

Letak garis netral c belum diketahui dan akan ditentukan berdasarkan diagram regangan pada *Gambar 2.13* di atas dengan $•_c$ = 0,003 dan $•_s > •_y$. Regangan tulangan tekan diumpamakan sebagai HG = $•'_s$ *yang belum diketahui* besarnya.

Bila **tulangan tekan telah meleleh** dan $•'_s$ • $•_y$, maka tegangan tulangan f's tekan dapat dihitung dengan rumus : f's = fy

Bila **tulangan tekan belum meleleh** dan $•'_s < •_y$, maka besarnya regangan $•'_s$ harus dicari dari persamaan segitiga OAB dan OGH di dalam diagram regangan sebagai berikut :

$$\frac{e'_s}{e_c} = \frac{c - d'}{c} \text{, sehingga } •'_s = •_c.\left(1 - \frac{d'}{c}\right) = 0{,}003.\left(1 - \frac{d'}{c}\right)$$

Bila harga $•'_s$ *lebih kecil* dari $•_y$ maka dapat diambil kesimpulan bahwa *tulangan tekan belum meleleh*, dan tegangan tulangan tekan f's < fy. Harga f's ini dapat dihitung :

$$f's = E_s.•'_s = 200000.(0{,}003).\left(1 - \frac{d'}{c}\right) = 600.\left(1 - \frac{d'}{c}\right)$$

Gaya tekan di dalam tulangan disebut C' dan besarnya **:**

C' = A's.f's

Harga f's adalah : f's = fy • bila *tulangan tekan meleleh* dan $\bullet'_s \bullet \bullet_y$

f's = $E_s.\bullet'_s$ • bila *tulangan tekan belum meleleh* dan $\bullet'_s < \bullet_y$

<u>Gaya tekan di dalam beton</u> disebut C dan dapat dihitung :

C = 0,85.f'c.a.b (luas beton yang terdesak beton diabaikan)

<u>Gaya tekan total</u> menjadi :

C' + C = A's.f's + 0,85.f'c.a.b

Sedangkan gaya dalam tulangan tarik T adalah :

T = fy.As

Letak garis netral c kemudian dapat dihitung dengan menggunakan kesetimbangan gaya-gaya :

C' + C = T • A's.f's + 0,85 f'c.a.b = fy. As

a = $\bullet_1$.c

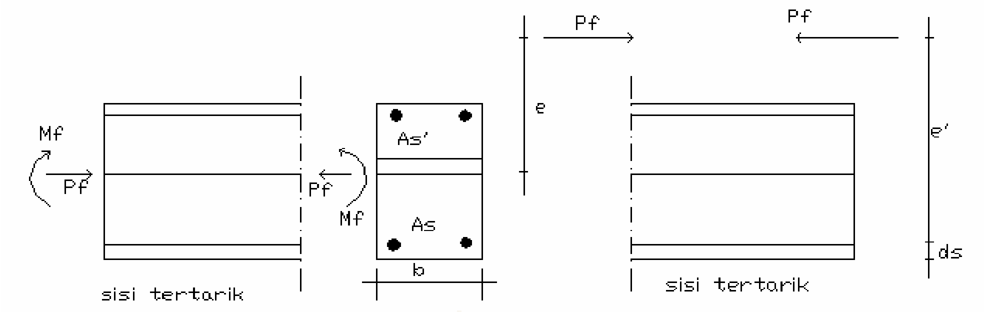
Tahapan analisis penampang dengan tulangan rangkap :

1. Dimisalkan bahwa tulangan tarik dan tekan telah meleleh, sehingga $\bullet'_s \bullet \bullet_y$ dan $\bullet_s \bullet \bullet_y$, juga f's =fy dan fs=fy.
2. Dengan menggunakan kesetimbangan gaya-gaya C' + C = T tinggi stress block a = $\bullet_1$c dan letak garis netral c ditemukan.
3. Dari perbandingan segitiga sebanding regangan $\bullet'_s$ dan $\bullet_s$ dihitung.
4. Bila $\bullet'_s \bullet \bullet_y$, maka *tulangan tekan meleleh*, dan perhitungan telah **benar**.
5. Bila $\bullet'_s < \bullet_y$, maka tulangan tekan belum meleleh, dan harga f's harus dihitung kembali dengan rumus f's = Es.$\bullet'_s$.
6. Letak garis netral c harus ditentukan kembali, menggunakan f's = Es.$\bullet'_s$.
7. Momen yang dapat dipikul gelagar dapat dihitung sebagai :
8. M = C'.(d-d') + C.(d-½ .a)

2.3.6. Analisis Penampang Kolom

Dalam menghitung kolom, pengaruh letak gaya normal yang diukur dari garis netral kolom (nilai eksentrisitas "e") sangat menentukan. Secara matematis sebuah gaya normal eksentris dapat digantikan dengan sebuah gaya normal sentris dan sebuah momen sedemikian rupa sehingga :

$$Pf.e = Mf \qquad \text{dan} \qquad e = \frac{Mf}{Pf}$$



Gambar 2.14. Kerangka Beben pada Kolom

Eksentrisitas e tersebut dapat jatuh di dalam maupun di luar kolom. Apabila titik tangkap gaya normal eksentris terletak di dalam penampang kolom dapat kita bedakan dimana gaya tersebut bertitik tangkap *didalam inti*, mengakibatkan seluruh penampang dalam keadaan *tertekan*, atau diluar inti. *Gambar 2.14* menunjukkan kerangka beban pada sebuah kolom. Apabila e' adalah jarak lengan gaya terhadap titik berat tulangan tarik dan d_s jarak permukaan beton ke titik berat tulangan, maka :

$e = e' + d_s + ½.h$

Untuk lebih memahami perencanaan sebuah kolom maka terlebih dulu akan dijelaskan tahapan analisa sebuah kolom yang telah diketahui baik dimensi maupun penulangannya. Bila karakteristik baik dari beton dan tulangan diketahui, maka kita dapat menentukan besarnya gaya normal tekan Pf dan momen Mf yang dapat dipikul penampang tersebut. Agar Mf dapat ditentukan maka besarnya eksentrisitas gaya normal e harus ditentukan terlebih dahulu.

Dengan menggunakan tulangan simetris, maka :A's = As = ½ • .b.h = ½.As_t

Rasio pembesian : • = Ast / Ag, dimana Ag = b.h = luas total penampang beton

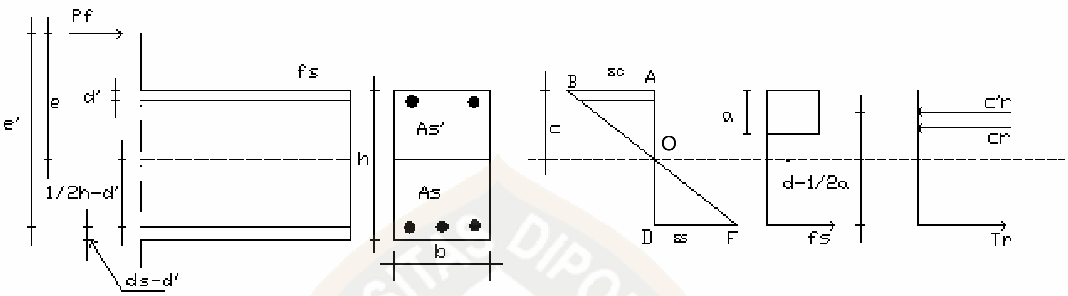
Gambar 2.15 menunjukkan gaya yang bekerja pada penampang, faktor yang harus ditentukan adalah *letak garis netral c*. Pada saat hancur regangan beton Ec = 0,003 dan dimisalkan bahwa tulangan tarik dan tekan *telah meleleh* sehingga :

$•'_s = •_s • •_y$ dan f's = fs = fy

Regangan yang terjadi dapat dihitung dari diagram regangan, seperti telah diulas terdahulu dengan memandanag perbandingan segitiga OAB dan ODF.

$$•'_s = 0{,}003.\left(\frac{c - d'}{c}\right) = 0{,}003.\left(1 - \frac{d'}{c}\right)$$

$$•_s = 0{,}003.\left(\frac{d - c}{c}\right) = 0{,}003.\left(\frac{d}{c} - 1\right)$$



Gambar 2.15. Gaya-gaya pada Penampang Kolom

Apabila dari hasil perhitungan kemudian ternyata salah satu dari tulangan tersebut belum meleleh sehingga $•'_s$ atau $•_s < •_y$, maka perlu diadakan koreksi dan tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan rumus :

$$•'_s < •_y \text{ maka } f's = •'_s\, Es = 0{,}003.\left(1 - \frac{d'}{c}\right)Es \qquad \text{dan,}$$

$$•_s < •_y \text{ maka } fs = •_s\, Es = 0{,}003.\left(\frac{d}{c} - 1\right)Es$$

Besarnya regangan tulangan merupakan fungsi dari letak garis netral c yang dpat dihitung dari *kesetimbangan gaya dan momen* sebagai berikut :

Pf = (Cr + C’r – Tr)

Dimana : Cr = 0,85.f’c.ab = gaya tekan yang terjadi di dalam beton

C’r = f’s.A’s = gaya tekan dalam tulangan tekan

Tr = fs.As = gaya tarik dalam tulangan tarik

Kesetimbangan momen memberikan persamaan :

Pf.e’ = Cr.(d - ½.a) + C’r.(d – d’)

Substitusi kedua persamaan kesetimbangan tersebut akan menghasilkan persamaan kuadrat atau pangkat tiga dalam c atau a. Dengan cara coba-coba persamaan pangkat tiga tersebut dapat diselesaikan sehingga nilai garis netral c atau tinggi stress-block a dapat diketahui. Besarnya gaya normal tekan Pf kemudian dapat ditentukan.

Perhitungan yang telah diuraikan menjadi tidak sederhana karena keadaan tulangan tarik dan tekan pada saat hancur tidak diketahui dan terlebih dahulu dianggap bahwa keduanya telah meleleh. Dengan demikian terdapat kemungkinan bahwa proses perhitungan harus diulang beberapa kali untuk dapat diperoleh hasil yang benar. Apabila pada penampang yang memikul momen lengkung murni kondisi over atau under-reinforced dapat ditentukan dari besarnya rasio pembesian, maka untuk kolom, meleleh atau tidaknya tulangan pada saat kehancuran tidak bisa direncanakan. Akan tetapi kondisi over dan under-reinforced unutk kolom tergantung dari besarnya eksentrisitas gaya normal tekan.