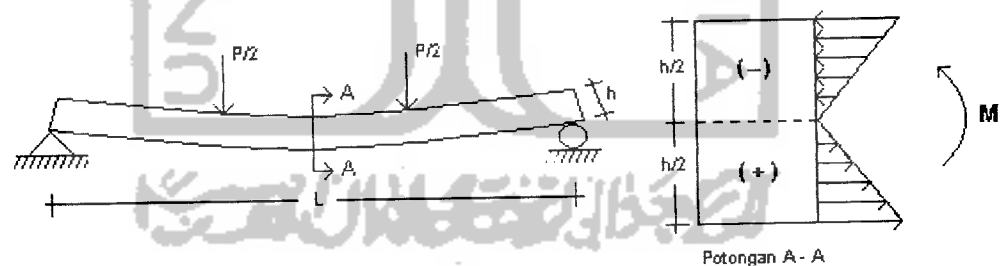


BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Distribusi Tegangan

Balok adalah elemen struktur yang menerima gaya transversal yang mengakibatkan tegangan-tegangan lentur pada penampang. Pada suatu balok elastis perletakan sederhana yang menerima momen lentur positif, tegangan tekan akan terjadi di bagian atas dan regangan tarik di bagian bawah penampang, distribusi tegangan ditunjukkan pada Gambar 3.1 (b). Tampak pada gambar bahwa tegangan memiliki nilai yang sebanding dengan jaraknya ke garis netral. Tetapi balok beton bukan merupakan material yang bersifat elastis penuh, sehingga distribusi tegangan linier hanya berlaku pada pembebanan kecil.

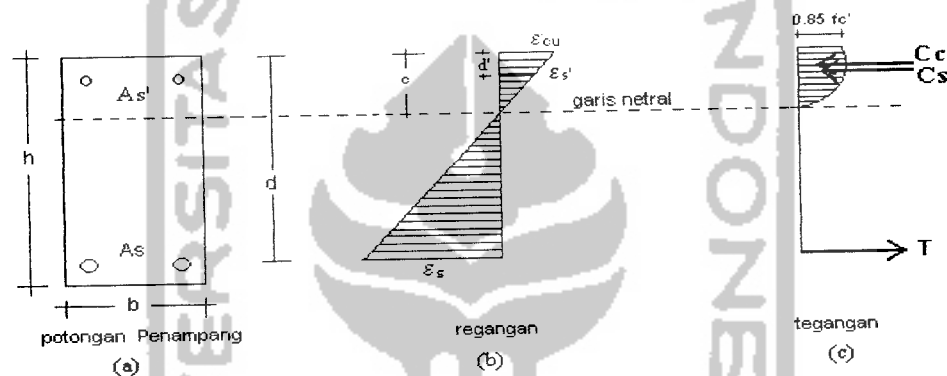


Gambar 3.1 Tegangan-tegangan yang terjadi pada tampang balok terlentur

3.1.1. Distribusi tegangan balok beton bertulang pada pembebanan ultimit

Pada tingkat pembebanan ultimit, nilai regangan serta tegangan tekan akan meningkat dan cenderung untuk tidak lagi sebanding antar keduanya. Dimana tegangan beton tekan akan membentuk kurva non-linier, dan kurva tegangan tekan

diatas garis netral akan berbentuk sama dengan kurva tegangan-regangan beton dengan regangan sebesar ϵ_{cu} . Bila distribusi regangan dan tegangan penampang sudah mencapai pada kondisi ini, tegangan dan regangan yang terjadi sudah berada atau dekat dengan keadaan ultimit, komponen struktur telah retak, terjadi lendutan yang besar dan tidak akan kembali ke panjang semula (Istimawan, 1999). Distribusi regangan-tegangan penampang beton pada keadaan ultimit ditunjukkan pada gambar 3.2.



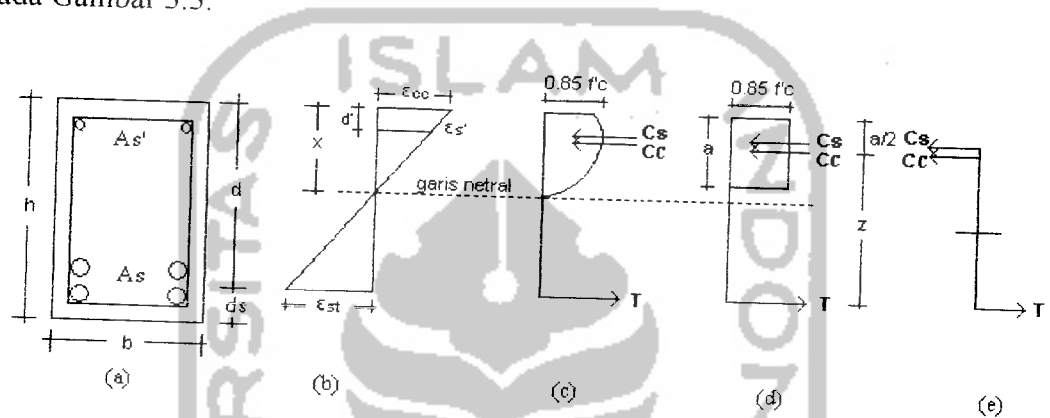
Gambar 3.2 Diagram tegangan-regangan penampang balok pada pembebanan ultimit

3.1.2. Blok tegangan ekuivalen Whitney

Untuk analisa tampang pada keadaan batas ultimit, dimana distribusi tegangan tekan yang terjadi membentuk sebuah blok tegangan kurva parabola, Whitney melakukan penyederhanaan menjadi distribusi blok tegangan ekuivalen yang memiliki tinggi (a) dan tegangan tekan rata-rata sebesar $0,85 f'c$. Dimana $a = \beta_1 C$, dengan $\beta_1 = 0,85$ untuk $f'c \leq 30$ MPa dan berkurang 0,008 untuk setiap kenaikan 1 MPa kuat tekan beton, dan nilai tersebut tidak boleh kurang dari 0,65. distribusi tegangan blok ekuivalen tersebut ditunjukkan pada gambar 3.3. (Istimawan, 1999).

3.2. Momen Kapasitas

Pada suatu komposisi tertentu balok menahan beban sedemikian hingga regangan tekan lentur beton maksimal ($\epsilon_c \text{ max}$) mencapai 0,003 sedangkan tegangan tarik baja tulangan mencapai tegangan luluh (f_y). Gaya-gaya dalam dan distribusi tegangan dan regangan balok terlentur pada kondisi ultimit ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Distribusi regangan dan tegangan pada Penampang balok dengan tulangan tarik dan tulangan tekan

Menggunakan diagram tegangan seperti yang dikemukakan oleh Whitney, maka gaya-gaya dalam yang terjadi pada penampang adalah :

Gaya desak pada beton :

$$C = 0,85 f'c . b . a \dots\dots\dots(3.1)$$

Gaya tekan baja tulangan tekan :

$$Cs = As' . fs' \dots\dots\dots(3.2)$$

Dengan :

As' = luas tulangan baja tekan

fs' = tegangan tulangan baja tekan

Gaya tarik dalam keadaan tulangan baja tarik leleh :

$$T = A_s \cdot f_y \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

dengan :

A_s = luas tulangan baja tarik

f_y = tegangan leleh baja

Kesetimbangan gaya-gaya dalam harus terjadi sebagai lawan momen luar, dari Persamaan (3.1), (3.2) dan (3.3) persamaan kesetimbangan gaya-gaya dalam dapat ditulis :

$$C + C_s = T \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

$$0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a + A_s' \cdot f_s' = A_s \cdot f_y$$

bila baja tulangan tekan sudah leleh, didapat kedalaman blok tekan ekivalen

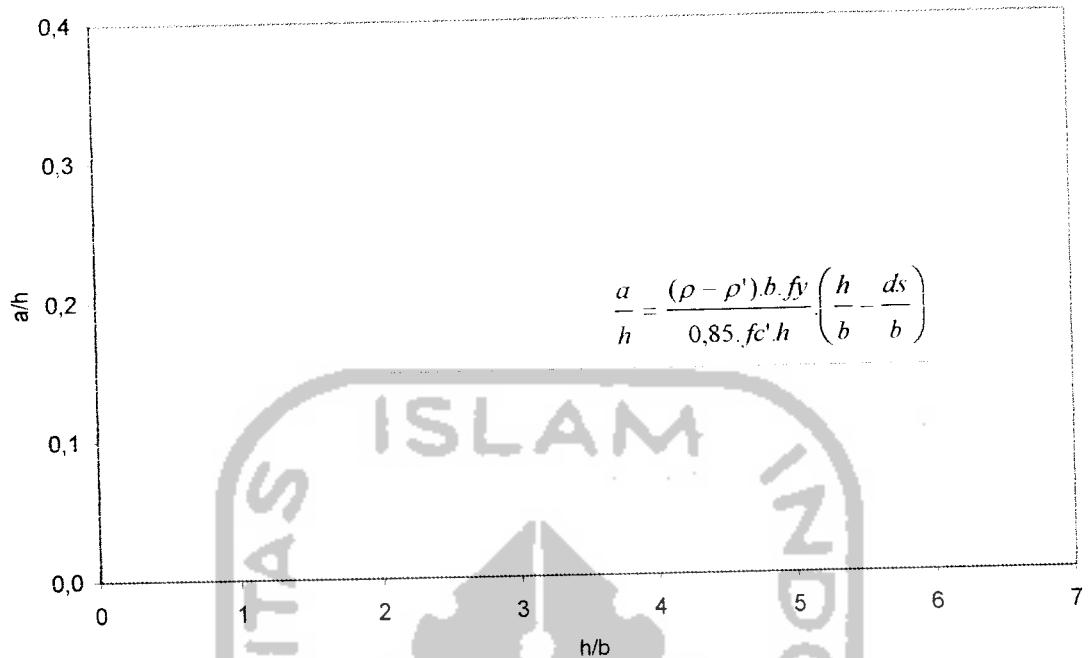
Whitney :

$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

dengan membagi a Persamaan (3.5) dengan h didapat :

$$\frac{a}{h} = \frac{(\rho - \rho') \cdot b \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot h} \left(\frac{h}{b} - \frac{d_s}{b} \right) \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

Dari Persamaan (3.5) dapat dilihat a merupakan fungsi b, hubungan nilai a pada A_s , A_s' , d_s , d' , dan f_y serta f'_c konstan dengan variasi h/b ditunjukkan dalam Gambar 3.4. Tampak pada gambar bahwa nilai a/h konstan pada variasi nilai h/b .



Gambar 3.4. Grafik non dimensional hubungan a/h dengan h/b

Menggunakan diagram regangan yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 untuk mengontrol apakah baja tulangan sudah leleh, maka didapat :

Baja tulangan tekan :

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$f_s' = f_y \quad \text{jika} \quad 0,003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \geq \frac{f_y}{E_s}$$

Baja tulangan tarik :

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$f_s = f_y \quad \text{jika} \quad 0,003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \geq \frac{f_y}{E_s}$$

Jika baja tulangan tekan leleh, maka momen nominal adalah :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \quad \dots \dots \dots (3.9)$$

subtitusi Persamaan (3.5) dengan Persamaan (3.9) didapat :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \left(\frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \right) \left(d - \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \cdot f_y}{1,7 \cdot f_c' \cdot b} \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')$$

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \cdot f_y \cdot \left(1 - 0,59 \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \frac{f_y}{f_c'}\right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')$$

Jika :

$$C_1 = \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)$$

$$C_2 = (d - d')$$

Maka Persamaan (3.9) menjadi :

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot C_1 \cdot f_y \cdot \left(1 - 0,59 \cdot \rho \cdot C_1 \cdot \frac{f_y}{f_c'}\right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot C_2 \quad \dots \dots \dots (3.10)$$

jika :

$$d = (h - ds) = \left(\frac{h - ds}{h} \cdot h \right)$$

maka :

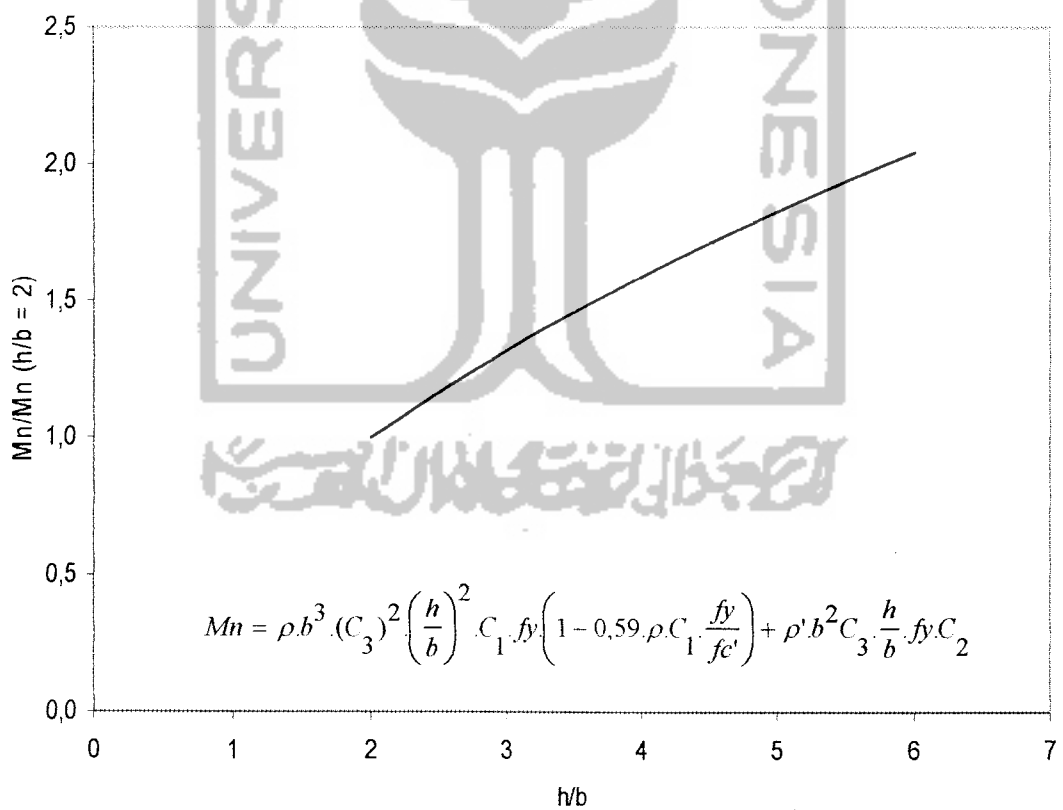
$$C_3 = \frac{h - ds}{h}$$

$$Mn = \rho.b^3.(C_3)^2.\left(\frac{h}{b}\right)^2.C_1.fy.\left(1-0,59.\rho.C_1.\frac{fy}{fc'}\right) + \rho'.b^2.C_3.\frac{h}{b}.fy.C_2 \dots\dots\dots(3.11)$$

Jika ρ , ρ' , ds , d' , dan fc' serta fy konstan, maka momen nominal merupakan fungsi dari rasio tinggi terhadap lebar penampang (h/b) dan momen akan bertambah besar jika rasio h/b penampang besar.

Hubungan h/b dengan kapasitas lentur nominal (Mn) pada fc' , fy , dan As serta As' konstan dengan menganggap distribusi tegangan Whitney masih berlaku pada rasio h/b besar serta tidak ada pengaruh momen lateral ditunjukkan oleh

Gambar 3.5



Gambar 3.5 Grafik non dimensional hubungan h/b dengan Mn/Mn , ($h/b=2$)

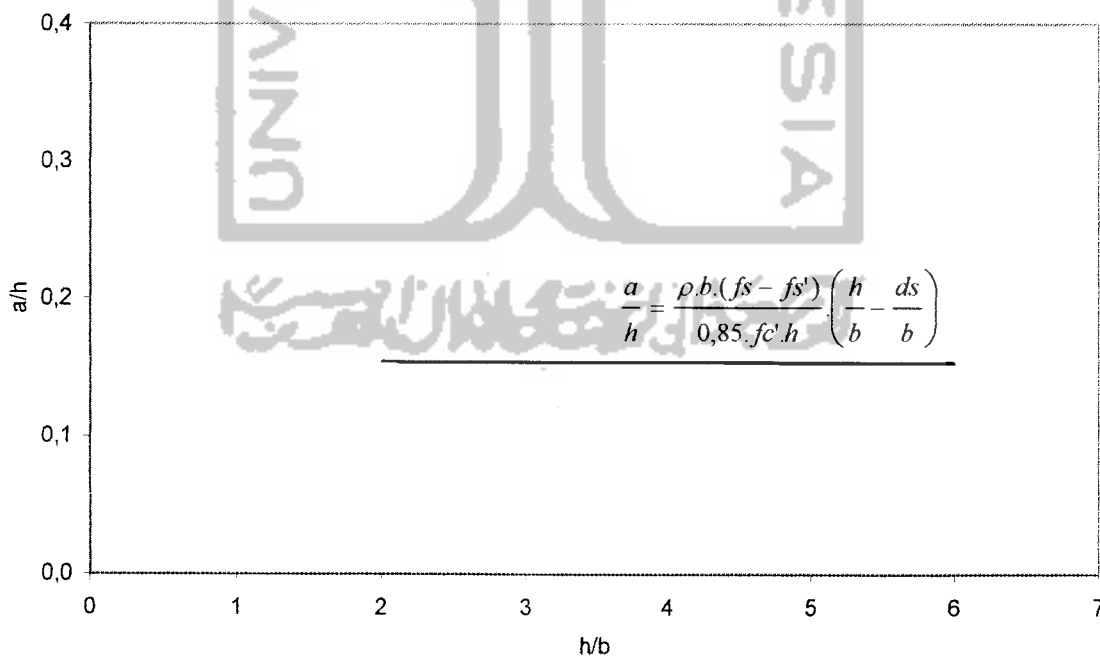
Jika ternyata baja tulangan tekan belum leleh, maka kedalaman blok tekan ekuivalen dihitung dengan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots\dots\dots(3.12)$$

dengan membagi a Persamaan (3.12) dengan h didapat :

$$\frac{a}{h} = \frac{\rho \cdot b \cdot (f_s - f_s')}{0,85 \cdot f_c' \cdot h} \cdot \left(\frac{h}{b} - \frac{d_s}{b} \right) \dots\dots\dots(3.13)$$

Dari persamaan (3.12) dapat dilihat a merupakan fungsi b, hubungan nilai a/h pada A_s , f_y , f_c' dan d_s , serta d' konstan dengan variasi h/b ditunjukkan dalam Gambar 3.6. Tampak pada gambar bahwa nilai a/h konstan terhadap meningkatnya nilai h/b.



Gambar 3.6. Grafik non dimensional hubungan a/h dengan h/b

Menggunakan diagram regangan pada Gambar 3.3 maka didapat :

Tegangan baja tulangan tekan :

$$f_s' = \varepsilon_s' \cdot E_s = 0,003 \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d'}{a} \cdot E_s \quad \dots\dots\dots(3.14)$$

Tegangan baja tulangan tarik :

$$f_s = \varepsilon_s \cdot E_s = 0,003 \cdot \frac{\beta_1 \cdot d - a}{a} \cdot E_s \quad \dots\dots\dots(3.15)$$

Pada kondisi baja tekan belum leleh, momen nominal didapat dengan :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d') \quad \dots\dots\dots(3.16)$$

Substitusi Persamaan (3.12) dengan Persamaan (3.16) didapat momen nominal :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \left(\frac{A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \right) \left(d - \frac{(A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s')}{1,7 \cdot f_c' \cdot b} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d')$$

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d \left(f_s - \frac{\rho'}{\rho} f_s' \right) \left(d - \frac{\rho \cdot b \cdot d \left(f_s - \frac{\rho'}{\rho} f_s' \right)}{1,7 \cdot f_c' \cdot b} \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_s' \cdot (d - d')$$

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d^2 (f_s - C_4 \cdot f_s') \left(1 - 0,59 \cdot \rho \left(\frac{f_s - C_4 \cdot f_s'}{f_c'} \right) \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot C_2$$

jika :

$$C_4 = \frac{\rho'}{\rho} \quad \text{dan bernilai konstan, dan } f_s = f_y$$

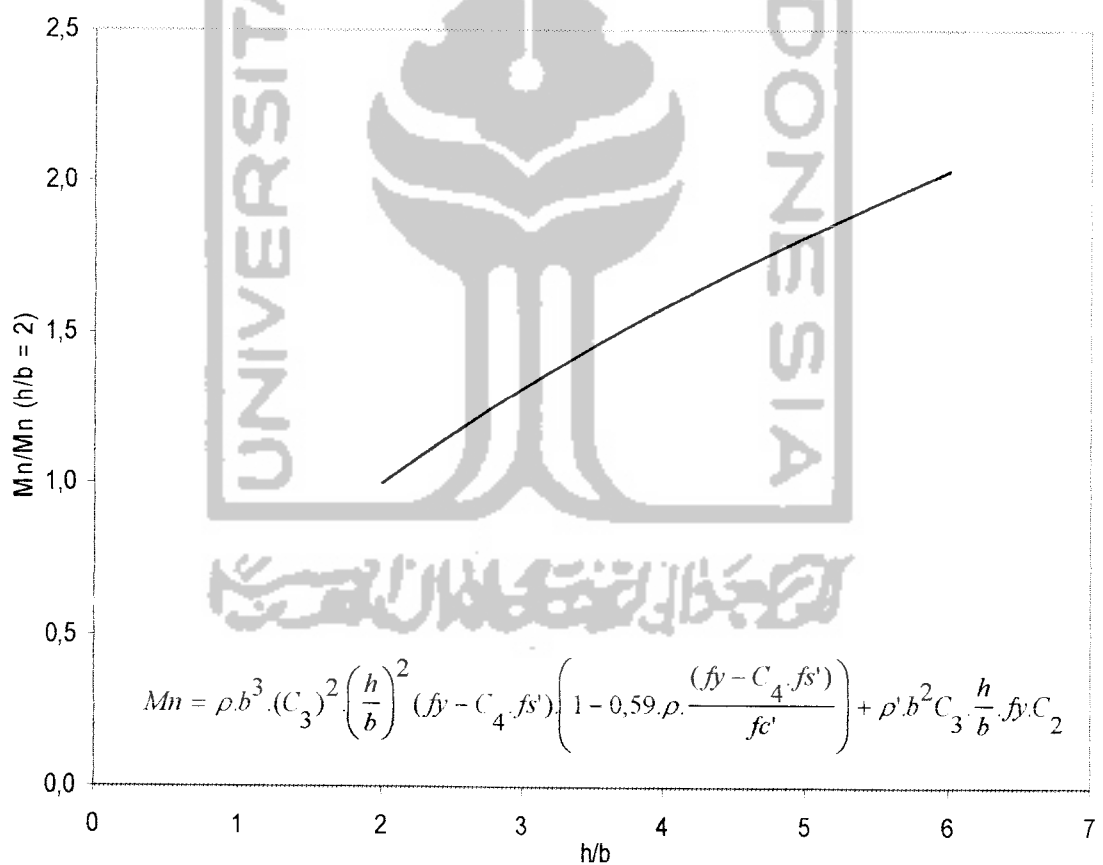
Maka :

$$Mn = \rho \cdot b^3 \cdot (C_3)^2 \left(\frac{h}{b} \right)^2 \cdot (f_y - C_4 \cdot f_s') \left(1 - 0,59 \cdot \rho \frac{(f_y - C_4 \cdot f_s')}{f_c'} \right) +$$

$$\rho' \cdot b^2 \cdot C_3 \frac{h}{b} \cdot f_s' \cdot C_2 \quad \dots\dots\dots(3.17)$$

Jika ρ , ρ' , d_s , d' , dan f_c' serta f_y konstan, maka momen nominal merupakan fungsi dari rasio tinggi terhadap lebar penampang (h/b) dan momen akan bertambah besar jika rasio h/b penampang besar.

Hubungan h/b dengan kapasitas lentur nominal (M_n) pada f_c' , f_y , dan A_s , A_s' , d_s , serta d' konstan dengan menganggap distribusi tegangan Whitney masih berlaku pada rasio h/b besar dan tidak dipengaruhi dengan momen arah lateral ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Grafik non dimensional h/b dengan M_n/M_n , ($h/b=2$)

3.3. Ketidakstabilan Balok Arah Lateral (*lateral instability of beams*)

Pada balok berpenampang langsing, kekakuan lentur (*flexural stiffness*) penampang sangat besar jika dibandingkan dengan kekakuan lentur arah lateralnya (*lateral stiffness*). Sehingga kapasitas lentur nominal balok tidak tercapai karena penampang akan mengalami kegagalan lentur arah lateral, kondisi seperti ini dinamakan ketidakstabilan arah lateral (*lateral instability*).

Momen kegagalan tekuk arah leteral (M_{cr}) pada penampang balok yang elastis linier, homogen, isotropis prismatic, diberikan dalam persamaan berikut (Park dan Paulay, 1975) :

$$M_{cr} = \frac{\lambda}{l} \sqrt{\frac{E_c I_x E_c I_y G J}{E_c I_x - E_c I_y}} \left[1 - 1.74 \frac{y_w}{l} \sqrt{\frac{E_c I_y}{G J}} \right] \dots \dots \dots (3.18)$$

Dimana :

λ = Koefisien pola pembebanan, yang memiliki nilai :

- a) π untuk momen seragam sepanjang bentang.
- b) 3,53 untuk beban terdistribusi merata.
- c) 4.24 untuk beban titik sentrik.

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

G = Modulus Geser Beton (MPa)

I_x, I_y = Momen Inersia arah sumbu kuat dan lemah (m^4)

J = Momen Inersia Polar (m^4)

l = Panjang bentang (m)

y_w = Jarak dari titik pembebanan ke titik berat Penampang (m)

Tampak pada persamaan (3.18) bahwa momen kegagalan tekuk arah lateral (M_{cr}) akan dipengaruhi oleh panjang bentang (l), dimana semakin panjang bentang maka momen kegagalan tekuk arah lateral akan semakin kecil dan kegagalan tekuk arah lateral akan terjadi pada rasio h/b penampang yang semakin rendah. Pada kuat tekan beton (f_c') yang semakin besar, kegagalan tekuk arah lateral akan semakin besar, karena f_c' yang semakin besar akan memberikan nilai modulus elastis beton yang semakin besar. Geometri penampang juga memberikan pengaruh pada nilai momen kegagalan arah lateral, dimana semakin besar rasio h/b maka momen kegagalan arah lateral akan semakin kecil, padahal momen lentur nominal balok akan semakin besar, hingga pada nilai rasio h/b tertentu maka momen kegagalan tekuk arah lateral akan menguasai tipe kegagalan balok.

Karena penampang yang sensitif terhadap tekuk lateral paling kecil memiliki rasio h/b sama dengan 2, sehingga rasio I_y/I_x menjadi kecil, sehingga Persamaan (3.18) dapat disederhanakan menjadi :

$$M_{cr} = \frac{\lambda}{l} \sqrt{E_c I_y G J} \left(1 - 1.74 \left(\frac{y_w}{l} \right) \sqrt{\frac{E_c I_y}{G J}} \right) \dots \dots \dots (3.19)$$

Untuk terjadinya suatu kegagalan instabilitas lateral, kapasitas lentur balok (M_u) akan lebih besar dari momen kritis (M_{cr}).

British code CP 110 membatasi parameter-parameter geometri untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan lateral, sebagai berikut (Park and Paulay, 1975) :

1. Untuk balok dengan dukungan sederhana atau kontinyu, jarak minimum antar dukungan lateral (l_b) adalah :

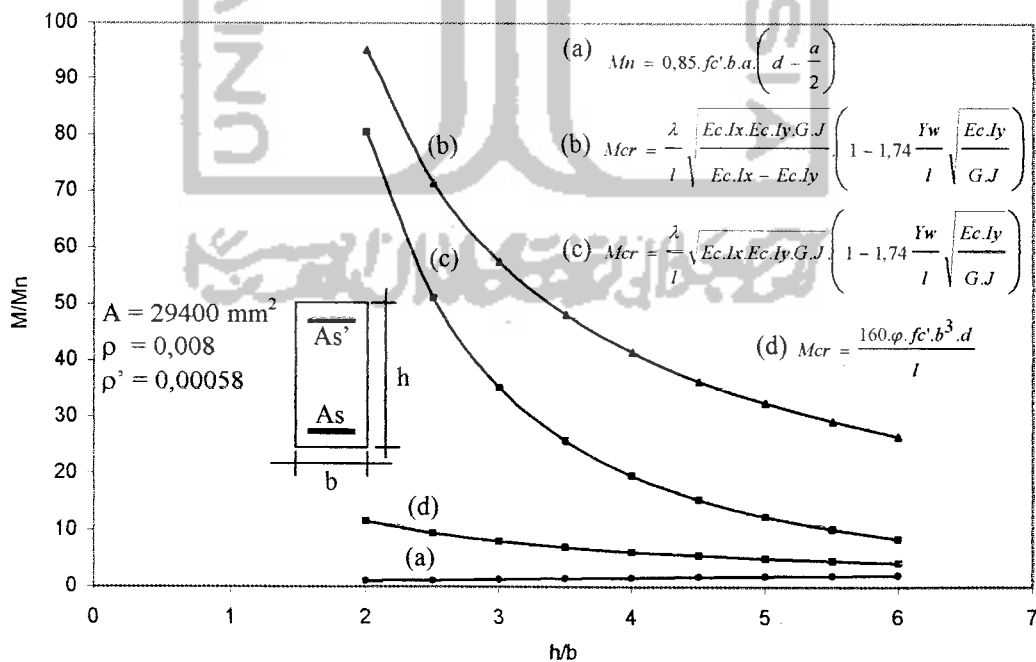
$$\frac{l}{b} < 60 \text{ dan } \frac{ld}{b^2} < 250 \dots\dots\dots(3.20)$$

Jika batasan ini berlebihan, momen kritis akan mengendalikan kekuatan balok. Marshall memberikan perkiraan nilai M_{cr} sebagai berikut (Park and Paulay, 1975) :

$$M_{cr} = \frac{160 \cdot \phi \cdot f_c' \cdot b^3 \cdot d}{l} \dots\dots\dots(3.21)$$

Dimana $\phi = 0,5$ diambil sebagai faktor reduksi kapasitas (*capacity reduction factor*)

Hipotesa kegagalan momen arah lateral dengan menggunakan Persamaan (3.18), (3.19), dan (3.21) ditunjukkan pada Gambar 3.8.

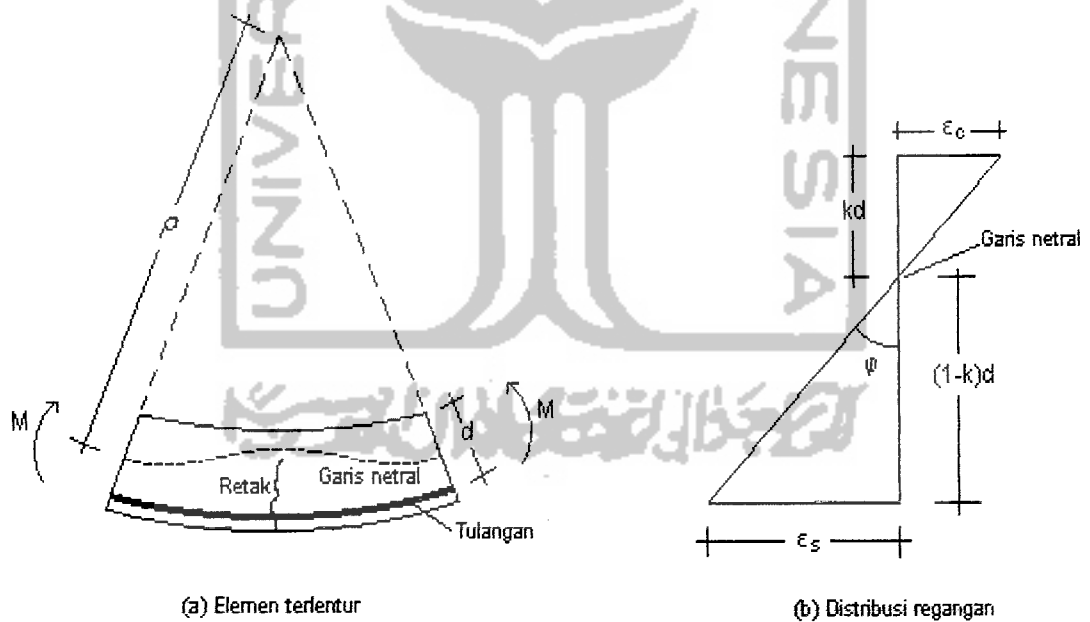


Gambar 3.8 Pengaruh momen lateral terhadap kapasitas lentur pada berbagai rasio h/b penampang

3.4. Momen dan Kelengkungan Balok

3.4.1. Kelengkungan balok

Menurut Park dan Paulay (1975), kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti Gambar 3.9. Jari-jari kelengkungan ρ diukur dari garis netral. Adanya retak-retak pada beton akibat terjadi penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (ρ), tinggi garis netral (kd), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s). Berdasar teori tersebut, retak beton akan bertambah jika dilakukan penambahan pembebanan.



Gambar 3.9 Kelengkungan balok, (Park and Paulay, 1975)

Menurut Popov (1983), kelengkungan suatu garis dalam koordinat Cartesian dinyatakan dengan persamaan :

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \Phi = \frac{d^2 y / dx^2}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(3.22)$$

Jika $\frac{dy}{dx}$ kecil, maka $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \approx 0$ sehingga Persamaan (3.22) akan menjadi :

$$\Phi = \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots(3.23)$$

Dengan menganggap sebuah elemen kecil panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 3.9 maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen diberikan oleh :

$$\frac{dx}{\rho} = \frac{\epsilon_c dx}{kd} = \frac{\epsilon_s dx}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.24)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.25)$$

dengan $\frac{1}{\rho} = \phi$

dari Gambar 3.9 (b) jika regangan dijumlahkan diperoleh :

$$\Phi = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \dots\dots\dots(3.25)$$

dengan :

Φ = Kelengkungan

ϵ_c = Regangan beton

ϵ_s = Regangan baja

d = Tinggi efektif penampang

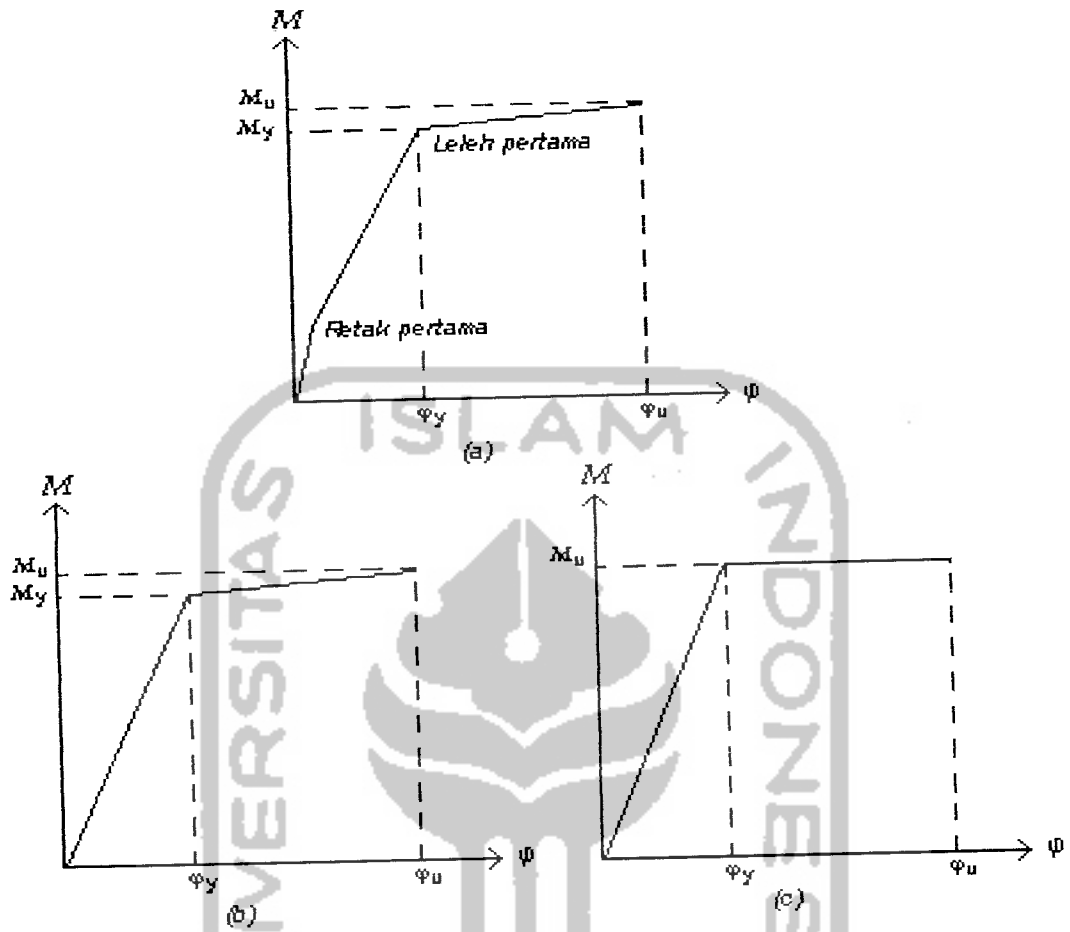
Persamaan (3.23) dapat diselesaikan dengan pendekatan *central difference*, menjadi :

$$\Phi = \frac{y(i+1) - 2yi + y(i-1)}{2\Delta x} \dots\dots\dots(3.26)$$

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan ϕ adalah gradien dari regangan dari elemen seperti dalam Gambar 3.9. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen adalah kecil dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan Persamaan (3.25). Dua grafik yang diperoleh dari penghitungan balok bertulangan rangkap adalah lurus/linear diawal dan hubungan antara momen dan kelengkungan diberikan persamaan :

$$EI = MR = \frac{M}{\phi} \dots\dots\dots(3.27)$$

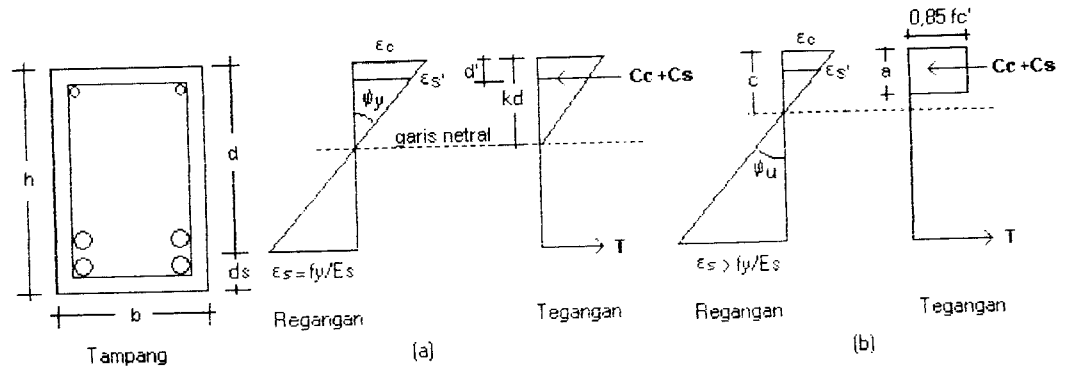
Dimana EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan peningkatan momen, retak pada beton akan mengurangi faktor kekakuan (EI) penampang, keadaan ini ditunjukkan pada Gambar 3.10 a. Perilaku dari penampang setelah retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah peningkatan kurva $M-\phi$ yang linear diatas titik leleh baja (Gambar 3.10 b). dengan menganggap peningkatan momen yang konstan ketika baja sudah leleh, maka dapat digambarkan hubungan $M-\phi$ seperti ditunjukkan pada (Gambar 3.10 c).



Gambar 3.10 Grafik momen kelengkungan

3.4.2. Leleh dan ultimit Momen-Kelengkungan

Gambar 3.11 menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi bertulangan rangkap pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton. Kelengkungan pada leleh pertama dari baja tulangan ϕ_y didapat dari Persamaan (3.25) dalam istilah regangan baja saat leleh.



Gambar 3.11 Diagram tegangan-regangan penampang bertulangan rangkap terlentur (a) pada saat leleh (b) pada saat kekuatan lentur ultimit

Momen-Kelengkungan pada saat leleh pertama dapat dicari dengan persamaan :

$$M_y = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{kd}{3} \right) \dots \dots \dots (3.28)$$

$$M_y = \rho \cdot b^3 \cdot (C_3)^2 \left(\frac{h}{b} \right)^2 \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{k}{3} \right) \dots \dots \dots (3.29)$$

dimana :

$$k = \sqrt{(\rho + \rho')^2 n^2 + 2n \left(\rho + \frac{\rho' \cdot d'}{d} \right)} - (\rho + \rho') \cdot n \dots \dots \dots (3.30)$$

Kelengkungan pada leleh pertama adalah :

$$\phi_y = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{f_y/E_s}{(h-ds)(1-k)} \dots \dots \dots (3.31)$$

dimana :

k = Faktor tinggi garis netral

M_y = Momen leleh pertama

ϕ_y = Kelengkungan leleh pertama

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

Pada nilai f_c' dan f_y serta A_s konstan, nilai $\rho = A_s/bd$ akan dipengaruhi oleh rasio h/b . Pada Persamaan (3.31) kelengkungan merupakan fungsi nilai k , nilai k semakin besar maka kelengkungan akan semakin besar dan nilai kelengkungan leleh pertama (ϕ_y) juga akan semakin besar.

Kelengkungan ultimit dan momen dari penampang bertulangan rangkap (Gambar 3.11) dapat dicari dengan persamaan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots\dots\dots(3.32)$$

$$M_u = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots(3.33)$$

substitusi Persamaan (3.32) dan (3.33) menghasilkan :

$$M_u = \rho \cdot b \cdot (h - d_s)^2 \cdot f_y \left(1 - \frac{\rho'}{\rho} \right) \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y \left(1 - \frac{\rho'}{\rho} \right)}{1,7 \cdot f_c'} \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')$$

$$M_u = \rho \cdot b^3 \cdot (C_3)^2 \cdot \left(\frac{h}{b} \right)^2 \cdot f_y \cdot C_1 \left(1 - 0,59 \frac{\rho \cdot f_y \cdot C_1}{f_c'} \right) + \rho' \cdot b^2 \cdot C_3 \cdot \frac{h}{b} \cdot f_y \cdot C_2 \dots\dots(3.34)$$

kelengkungan ultimit :

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_c \cdot \beta_1}{a} \dots\dots\dots(3.35)$$

dari Persamaan (3.32), nilai a dipengaruhi oleh lebar tampang (b). Jika ρ , ρ' , f_c' , f_y , d_s , dan d' konstan, nilai a akan membesar dengan mengecilnya nilai b . Maka Persamaan (3.35) memberikan hubungan kelengkungan ultimit (φ_u) akan kecil dengan membesarnya rasio h/b .

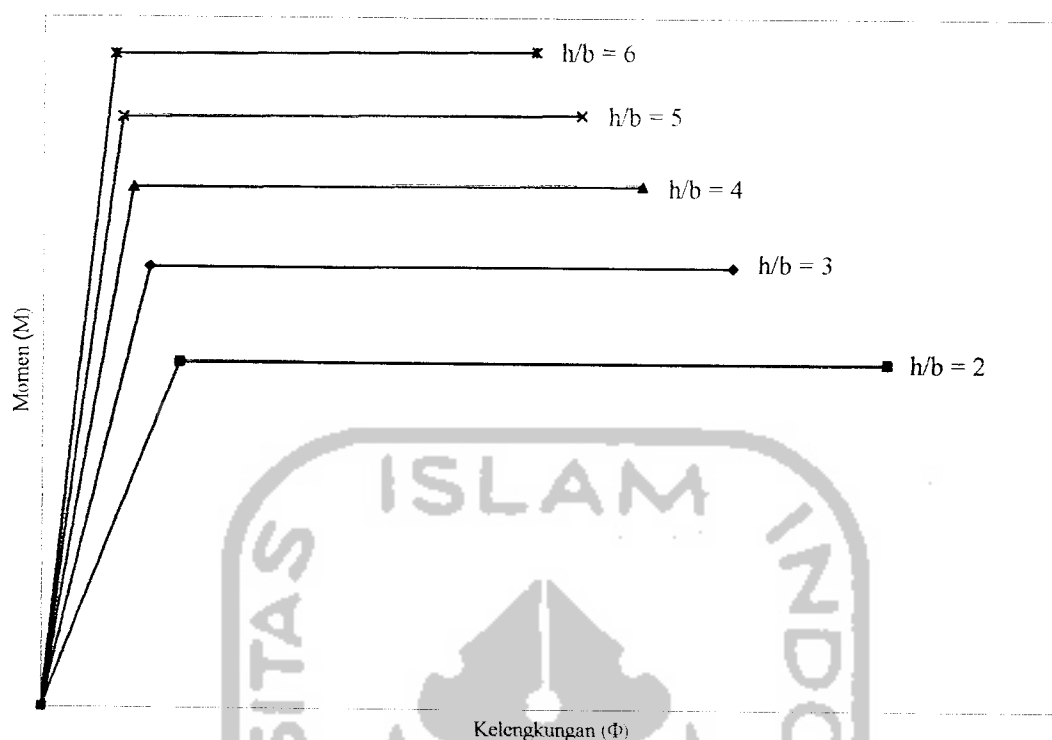
Ukuran peningkatan momen lentur setelah leleh dikenal dengan M_u/M_y . Rasio ini ditentukan dari Persamaan (3.29) dan (3.34), menghasilkan :

$$\frac{M_u}{M_y} = \frac{\left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)}{1,7 \cdot f_c'}\right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')}{\left(1 - \frac{k}{3}\right)} \dots\dots\dots(3.36)$$

Rasio φ_u/φ_y dapat ditulis :

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\varepsilon_c \cdot \beta_1 \cdot E_s \cdot (1 - k)}{a \cdot f_y} \cdot (h - d_s) \dots\dots\dots(3.37)$$

Rasio h/b yang tinggi akan memiliki momen yang besar dan kelengkungan yang kecil. Hubungan momen dengan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 3.12 dalam variasi h/b .



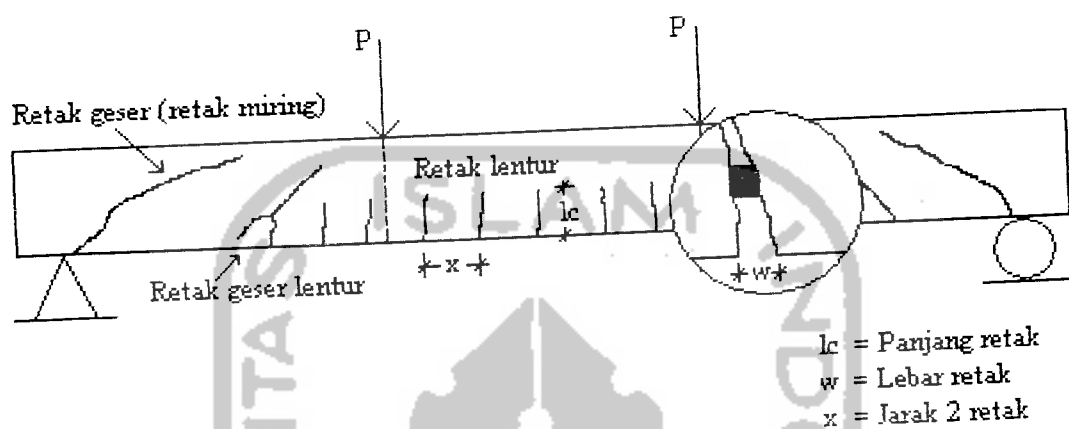
Gambar 3.12 Hubungan momen dengan kelengkungan dengan berbagai rasio h/b

3.5. Ragam Retak

Beton merupakan bahan yang lemah terhadap tegangan tarik, dengan hanya memiliki kekuatan tarik kira-kira 8% hingga 15% dari kekuatan tekannya. Pada balok tertentu, dimana tegangan tarik akan terjadi pada satu bagian bawah yang dibatasi oleh garis netral penampang, dan jika tegangan yang terjadi sudah melebihi dari tegangan tarik beton, maka retak lentur akan terjadi.

Pada balok dengan perletakan sederhana yang seperti diperlihatkan di dalam Gambar 3.13, ditunjukkan jenis-jenis retak yang mungkin terjadi. Retak lentur cenderung terjadi merambat hampir vertikal ke dalam balok, retak ini menimbulkan pengurangan tegangan sampai timbulnya suatu kombinasi yang

kritis dari tegangan lentur dan geser di dekat daerah dalam garis salah satu retak. Retak miring kemudian terbentuk, retak miring terjadi karena penambahan beban yang mengakibatkan tegangan geser yang tinggi (Wang dan Salmon, 1993).



Gambar 3.13 Jenis-jenis dan ukuran retak

Untuk mengetahui sampai sejauh mana pengaruh peningkatan nilai rasio h/b penampang balok terhadap pola retak yang terjadi, maka perlu dilakukan pengukuran dan identifikasi retak yang terjadi pada setiap momen, sehingga didapat hubungan pola retak yang terjadi dengan peningkatan nilai rasio h/b penampang balok.

3.6. Perhitungan Momen Retak

Momen retak secara teoritis menurut Istimawan (1999), dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{Y_t} \dots \dots \dots (3.38)$$

dimana :

M_{cr} = Momen retak

f_r = Modulus retak beton = $0,7 \cdot \sqrt{f'_c}$

I_g = Inersia balok = $\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$

Y_t = Jarak garis netral ke serat tepi tertarik

Inersia balok masing-masing Penampang sebagai akibat dari variasi h/b tampang balok akan sangat mempengaruhi besar momen retak balok.

3.5. Defleksi Balok

Defleksi batang-batang struktural merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan, atau kondisi-kondisi tumpuannya, jenis pembebanan, dan kekakuan lentur (EI) dari elemen (Edward G. Nawy, 1990).

Persamaan umum defleksi maksimum (Δ_{maks}) pada balok elastis adalah :

$$\Delta_{maks} = K \frac{P \cdot L_n^3}{48 \cdot E_c \cdot I_c} \dots \dots \dots (3.39)$$

dimana :

P = Beban total pada bentang

L_n = Panjang bentang bersih

E_c = Modulus elastisitas beton

I_c = Momen inersia Penampang

K = Faktor yang bergantung pada derajat kekakuan tumpuan

Persamaan (3.39) dapat dinyatakan dalam momen lentur sehingga defleksi pada suatu titik pada balok adalah :

$$\Delta_{\text{maks}} = K \frac{MI^2}{E_c I_e} \dots\dots\dots(3.40)$$

dimana :

- K = Suatu faktor yang bergantung pada kekakuan tumpuan dan kondisi pembebanan
- M = Momen yang bekerja pada penampang
- I_e = Momen Inersia efektif

