

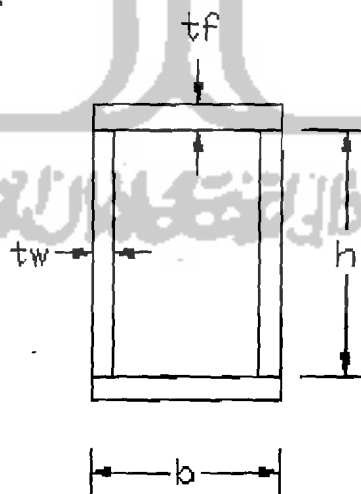
## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Gelagar Pelat

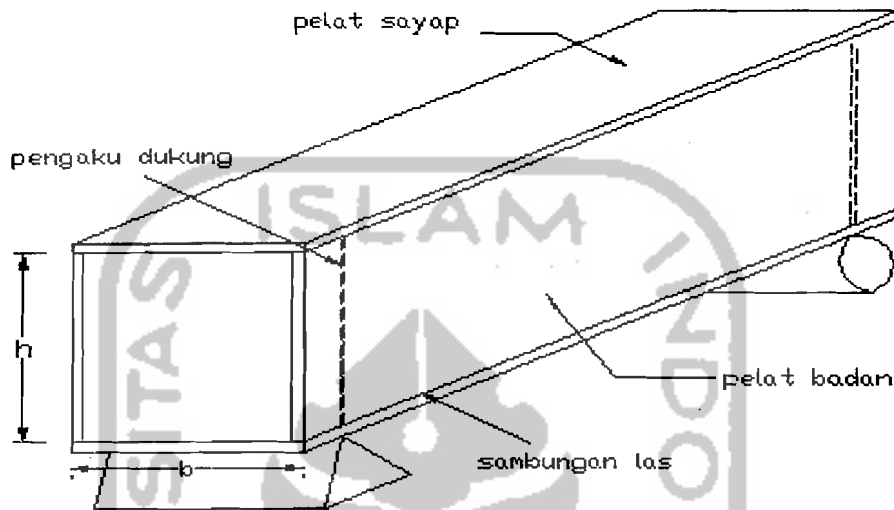
Kekuatan lentur dan geser pelat pada umumnya berkaitan dengan badan balok. Badan balok yang “ramping” dapat menyebabkan sejumlah persoalan tekuk yaitu : tekuk akibat lentur, tekuk vertikal pada sayap dan tekuk geser ( **Salmon dan Johnson, 1996**).

Gelagar pelat penampang kotak mempunyai komponen seperti Gambar 3.1



**Gambar 3.1** Potongan melintang gelagar pelat penampang kotak.

Keterangan Gambar 3.1 sebagai berikut ini,  $t_f$  = tebal sayap,  $t_w$  = tebal badan,  $b$  = lebar sayap dan  $h$  = tinggi badan.

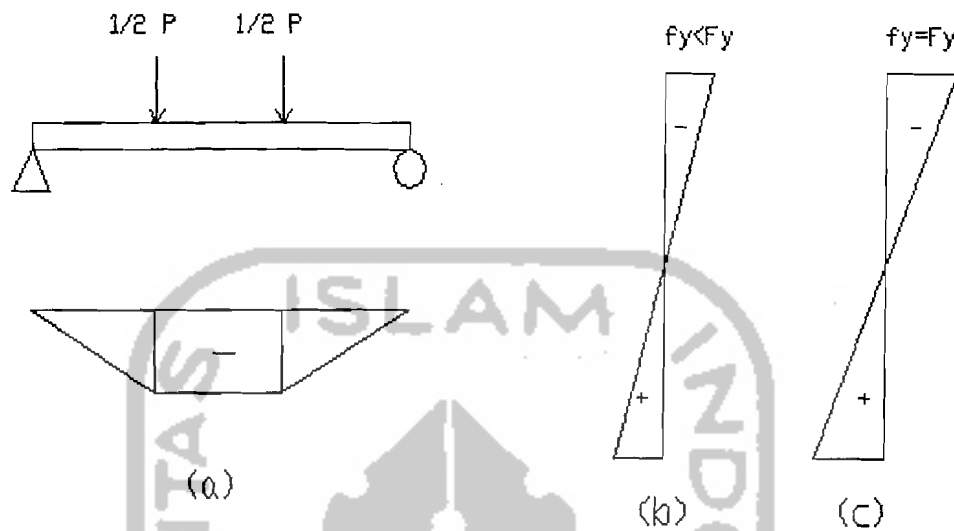


Gambar 3.2 Komponen gelagar penampang kotak

Penjelasan dari Gambar 3.2 sebagai berikut ini,

1. Badan gelagar berupa pelat baja yang diletakkan memanjang verikal, umumnya pelat badan relatif tipis yang diperkaku dengan pelat sayap dan pengaku tranfersal (Salmon dan Johnson,1996).
2. Sayap gelagar terdiri dari dua bagian, yaitu sayap atas dan sayap bawah yang diletakkan pada posisi memanjang horisontal, yang dilas pada bagian atas dan bagian bawah badan (Salmon dan Johnson,1996)
3. Pengaku umumnya dipergunakan bila pelat badan sangat tipis, rasio  $h/t_w$  besar dan tegangan geser badan relatif tinggi. Pengaku secara efektif akan menambah kapasitas geser terhadap tekukan geser badan. Pengaku hampir selalu digunakan

oleh spesifikasi dibawah beban yang terkonsentrasi pada reaksi gelagar pelat  
(Bowles, 1985).

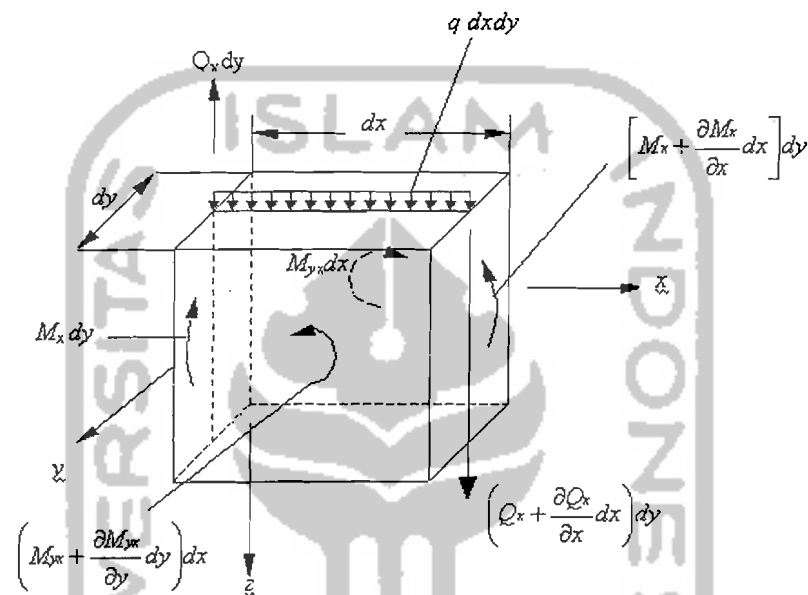


**Gambar 3.3** Model pembebanan dan distribusi tegangan

Gambar 3.3 (a) menunjukkan model pembebanan yang dilakukan pada saat pengujian sampel berupa beban terpusat dengan jarak  $1/3 L$  dan  $2/3 L$ . Gambar 3.3 (b) menunjukkan kondisi elastis yaitu suatu kondisi struktur masih dapat menahan pembebanan sampai kondisi batas tegangan yang diijinkan. Gambar 3.3 (c) menunjukkan struktur dalam keadaan leleh yaitu suatu kondisi awal struktur tidak menunjukkan kenaikan tegangan setelah kondisi elastis.

### 3.2 Stabilitas Pelat

Persamaan Diferensial untuk Lenturan Pelat Homogen menurut **Timoshenko** (1953),



**Gambar 3.4** Gaya-gaya benda bebas yang terlibat dalam rotasi terhadap sumbu  $y$  (dari Salmon dan Johnson, 1992).

Mengacu kepada Gambar 3.4 diperoleh persamaan diferensial keseimbangan untuk lenturan pelat homogen, yaitu:

$$D \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q \quad (3.1)$$

$$\text{dengan } D = Et^3 / [12(1-\mu^2)] \quad (3.2)$$

Solusi selanjutnya Persamaan (3.1) menghasilkan persamaan tegangan tekuk elastis untuk elemen pelat, yaitu:

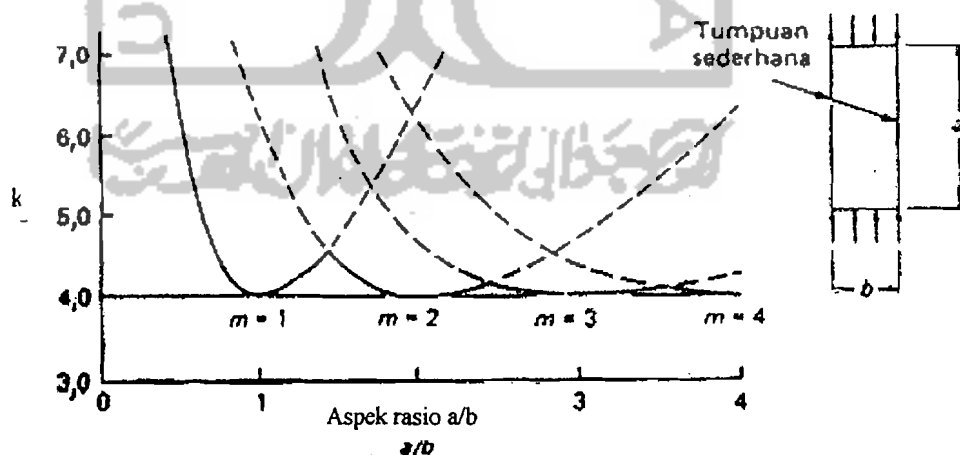
$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (3.3)$$

Tampak bahwa tegangan tekuk elastis diatas dipengaruhi oleh nilai  $k$  dan  $b/t$ . apabila nilai  $k$  besar maka akan diperoleh  $F_{cr}$  yang besar sedangkan bila  $b/t$  besar akan diperoleh  $F_{cr}$  yang kecil. Dengan kata lain nilai dari tegangan tekuk elastis dipengaruhi oleh nilai ( $k$ ) dan rasio  $b/t$ .

Nilai  $k$  untuk kasus tekuk elastis sebagai mana yang ditulis oleh **Salmon dan Johnson (1996)** adalah,

$$k = \left[ \frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \quad (3.4)$$

Koefisien  $k$  merupakan fungsi dari jenis tegangan dan kondisi tepi disamping rasio aspek  $a/b$  yang muncul secara langsung dalam persamaan tersebut. Bilangan  $m$  menunjukkan banyak pengaruh gelombang yang terjadi dalam arah  $x$  pada saat tekuk.



**Gambar 3.5** Koefisien tekuk untuk pelat yang ditekan secara merata-tepi longitudinal bertumpuan sederhana (Persamaan (3.4)) (dari Salmon dan Johnson, 1992).

Dari Gambar 3.5 dapat dilihat variasi nilai  $k$  terhadap aspek rasio  $a/b$  dari pelat yang ditekan secara merata tepi longitudinal bertumpuan sederhana, dengan nilai  $k$  minimum = 4 untuk berbagai variasi nilai  $m$  ( $m = 1-4$ ) dengan memasukkan nilai  $k = 4$  ke Persamaan (3.3) diperoleh,

$$F_{cr} = \frac{4\pi^2 E}{12(1-\mu^2)\left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.5)$$

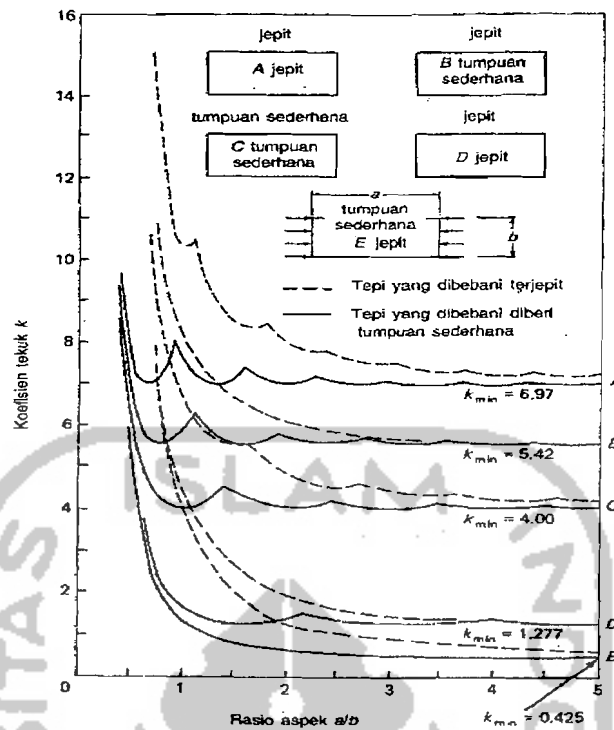
### 3.3 Tekuk pada Sayap

Balok memiliki stabilitas lateral yang cukup pada sayap tekannya, satu-satunya keadaan batas yang mungkin membatasi kekuatan momen adalah tekuk lokal pada tekan sayap dan atau elemen pelat yang membentuk penampang lintang balok. Tekuk lokal dipengaruhi oleh nilai rasio lebar terhadap tebal pelat sayap ( $b/t$ ). Bila nilai rasio  $b/t$  rendah, pengerasan regangan dapat tercapai tanpa mengalami tekuk; sedang untuk harga rasio  $b/t$  menengah, tegangan sisa dan ketidaksempurnaan menyebabkan tekuk tak elastik atau masa transisi; dan untuk rasio  $b/t$  besar maka akan melampaui kekuatan tekuk yakni pelat itu akan menunjukkan terjadinya kekuatan pasca tekuk (Salmon dan Johnson,1996).

Persyaratan untuk mencapai tegangan leleh tanpa tekuk lokal adalah :

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)\left(\frac{b}{t}\right)^2} \geq F_y \quad (3.6)$$

dengan  $k$  adalah konstanta tekuk merupakan fungsi distribusi tegangan dan kondisi di tepi pelat. Nilai  $k$  ini dapat dilihat pada Gambar 3.6.

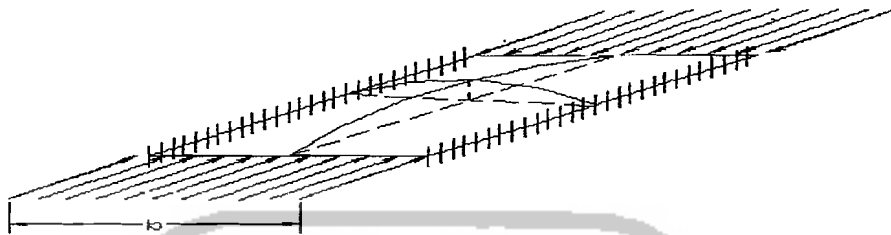


**Gambar 3.6** Koefisien tekuk elastis pada pelat segi empat datar (Diadaptasi dari Gerard dan Becker [6.69])(Salmon dan Johnson, 1992)

Gambar 3.6 menunjukkan variasi nilai koefisien tekuk  $k$  terhadap rasio aspek  $a/b$  pada berbagai jenis tumpuan pelat segi empat datar. Untuk tumpuan jepit-jepit (grafik A)  $k_{\min} = 6,97$  ; untuk jepit sendi (grafik B)  $k_{\min} = 5,42$  ; untuk sendi-sendi (grafik C)  $k_{\min} = 4,00$  ; untuk jepit bebas (grafik D)  $k_{\min} = 1,277$  ; untuk sendi bebas (grafik E)  $k_{\min} = 0,425$ . dari data diatas dapat disimpulkan bahwa nilai  $k$  untuk tiap macam tumpuan masih bisa bertambah besar

Gambar 3.7 merupakan elemen pelat yang diperkuat, yang bertumpu sepanjang dua tepi yang sejajar pembebanan. dari rumus tegangan tekuk elastis pada Persamaan (3.3) dimana menunjukkan batasan dasar untuk mencegah tekuk, dengan  $\mu = 0.3$  untuk baja dan  $E = 200,000$  Mpa dan  $F_y$  dalam Mpa (AISC-1.9,Lampiran C) didapatkan,

$$\frac{b}{t} = 425 \sqrt{\frac{k}{F_y(\text{MPa})}} \quad (3.7)$$



**Gambar 3.7.** Defleksi tekuk pelat pada sayap (jepit-jepit).  
(dari Salmon dan Johnson, 1992)

Untuk pelat dengan kondisi tumpuan tepi jepit-jepit, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7 harga  $\lambda_e = 0,58$  (Gambar 3.11) dengan nilai  $k = 4$  (Gambar 3.6). Batasan tekuk setempat untuk menghasilkan kekuatan plastis menurut (AISC-1.9, Lampiran C) adalah,

$$\frac{b}{t} \leq \frac{500}{\sqrt{F_y} (\text{Mpa})} \quad (3.8)$$

Batas maksimum pada kerampingan badan balok  $h/t$  akan didasarkan pada kekakuan yang dibutuhkan dalam bidang badan balok untuk mencegah terjadinya flens tekan mengalami tekuk secara vertikal.

$$f_c = \frac{\sigma_f A_f d \theta}{t_w dx} = \frac{2 \sigma_f A_f e r}{t_w h} \quad (3.9)$$

Dengan mengacu pada persamaan tegangan tekuk elastis untuk suatu pelat, bila tegangan yang dikenakan, Persamaan (3.9) disamakan dengan tegangan tekuk elastis akan diperoleh hasil,



$$\frac{h}{tw} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{24(1-\mu^2)} \left(\frac{A_w}{A_f}\right) \left(\frac{1}{\sigma_f \varepsilon_f}\right)} \quad (3.10)$$

$h/tw$  dipengaruhi oleh luas badan ( $A_w$ ), luas sayap ( $A_f$ ), tegangan sayap ( $\sigma_f$ ), regangan sayap ( $\varepsilon_f$ ). Apabila  $A_f$ ,  $\sigma_f$ ,  $\varepsilon_f$  kecil, maka akan diperoleh  $h/tw$  besar. Sedangkan bila  $A_w$  besar maka akan diperoleh  $h/tw$  besar (pelat badan ramping).

Persyaratan kekompakan menurut **LRFD Table B5.1 (1999)** persyaratan rasio lebar terhadap tebal ( $b/t$ ) pelat adalah,

Untuk beban merata,

$$\frac{b}{t} \leq 1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{kompak}(\lambda_p)) \quad (3.11)$$

$$\frac{b}{t} \leq 1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{tidak kompak}(\lambda_r)) \quad (3.12)$$

Untuk analisis plastis,

$$\frac{b}{t} \leq 0,939 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{kompak}(\lambda_p)) \quad (3.13)$$

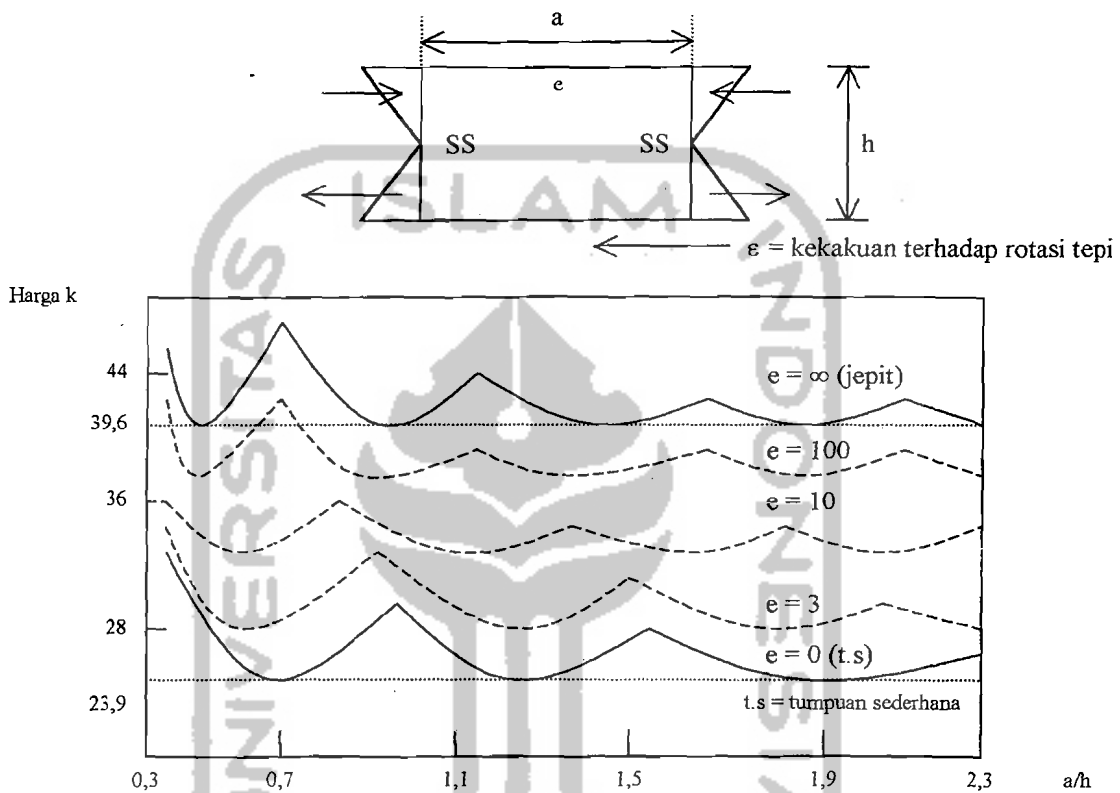
### 3.4 Lentur pada Bidang Badan

Badan gelagar pelat biasanya memiliki rasio sebesar  $h/tw$ , tekuk mungkin terjadi akibat lentur pada bidang badan tipikal untuk situasi stabilitas pelat tegangan tekuk elastis diwakili oleh Persamaan (3.3) dimana untuk kasus ini  $b = h$ .

**Timoshenko dan Woinowski-Kriger (1959)**, menjabarkan variasi nilai  $k$  terhadap rasio  $a/h$  yang ditunjukkan pada Gambar 3.8. Tegangan tekuk elastis (dengan  $E = 200.000$  MPa) bisa dikatakan terletak antara :

$$F_{cr} = \frac{4320000}{(h/t_w)^2} MPa \text{ untuk } k = 23,9 \text{ (tumpuan sederhana di sayap)} \quad (3.14)$$

$$F_{cr} = \frac{7120000}{(h/t_w)^2} MPa \text{ untuk } k = 39,6 \text{ (jepit sempurna di sayap)} \quad (3.15)$$



**Gambar 3.8** Koefisien tekuk untuk plat yang mengalami lentur murni (dari Handbook of Structural Stability, Vol. 1 [6.69](p. 92))

Gambar 3.8 menunjukkan harga koefisien lentur ( $k$ ) terhadap rasio jarak antar pengaku terhadap tinggi badan ( $a/h$ ) dimana bila pelat tersebut dianggap terjepit penuh disepanjang tepi yang paralel dengan arah pembebanan harga  $k$  minimum adalah 39,6 untuk sembarang rasio  $a/h$  ( $e = \infty$ , jepit). bila flens-flens itu diasumsikan tidak memberikan resistansi sama sekali terhadap rotasi pinggir (tumpuan sederhana), harga  $k$  minimum adalah 23,9 untuk sembarang rasio  $a/h$  ( $e = 0$ , s.s)



Gambar 3.9 menunjukkan grafik hubungan rasio momen nominal terhadap momen leleh ( $M_n/M_y$ ) dengan rasio tinggi terhadap tebal ( $h/t$ ) pelat badan. Untuk  $h/t$  antar 51-162 harga  $M_n/M_y \geq 1$  (penurunan grafik linier), pada  $h/t = 162$  rasio  $M_n/M_y = 1$ . Untuk kondisi grafik dari B-D pada gelagar dengan pengaku dengan  $h/t$  162-320 menunjukkan penurunan harga rasio  $M_n/M_y < 1$  (penurunan grafik linier), pada gelagar tanpa pengaku terjadi penurunan grafik secara drastis ini berarti tekuk lentur mungkin terjadi. Daerah perencanaan agar berat gelagar minimum pada daerah B-D, bila perencanaan pada area A-B akan diperoleh gelagar yang kuat terhadap tekuk lentur badan (biaya mahal)

Bila keadaan batas yang menentukan mencegah tegangan flens mencapai  $F_y$ , maka tegangan dari keadaan batas yang menentukan  $F_{cr}$  harus menggantikan  $F_y$ . Maka secara umum kekuatan nominal tereduksi  $M_n$  menurut **Salmon dan Johnson (1996)**,

$$M_n = \frac{F_y I_e}{(1-k)h} \quad (3.19)$$

dengan persamaan untuk  $k$  adalah,

$$k = \sqrt{\frac{192}{1024} + \frac{38}{16\rho} + \frac{4}{\rho^2} - \left(\frac{3}{32} + \frac{2}{\rho}\right)} \quad (3.20)$$

persamaan untuk nilai  $I_e$ ,

$$I_e = A_f (k.h)^2 + \frac{2}{3} t_w (k.h)^3 + A_f (1-k)^2 h^2 + \frac{6.t_w.h}{32} \left(\frac{61}{64}h - k.h\right)^2 \quad (3.21)$$

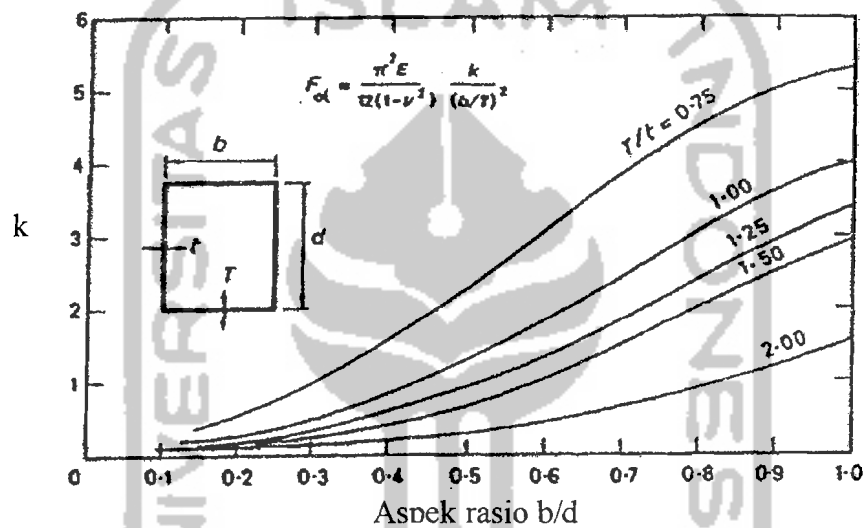
nilai  $\rho$  adalah,

$$\rho = \frac{A_w}{A_f} = \frac{t_w.h}{t_f.b_f} \quad (3.22)$$

persamaan untuk momen leleh adalah,

$$My = F_y \cdot Af \cdot h \left( 1 + \frac{\rho}{6} \right) \quad (3.23)$$

Pada Gambar 3.10 menunjukkan nilai koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang kotak yang dipengaruhi oleh rasio lebar terhadap tinggi ( $b/d$ ) dan rasio tebal pelat sayap terhadap badan ( $T/t$ ).

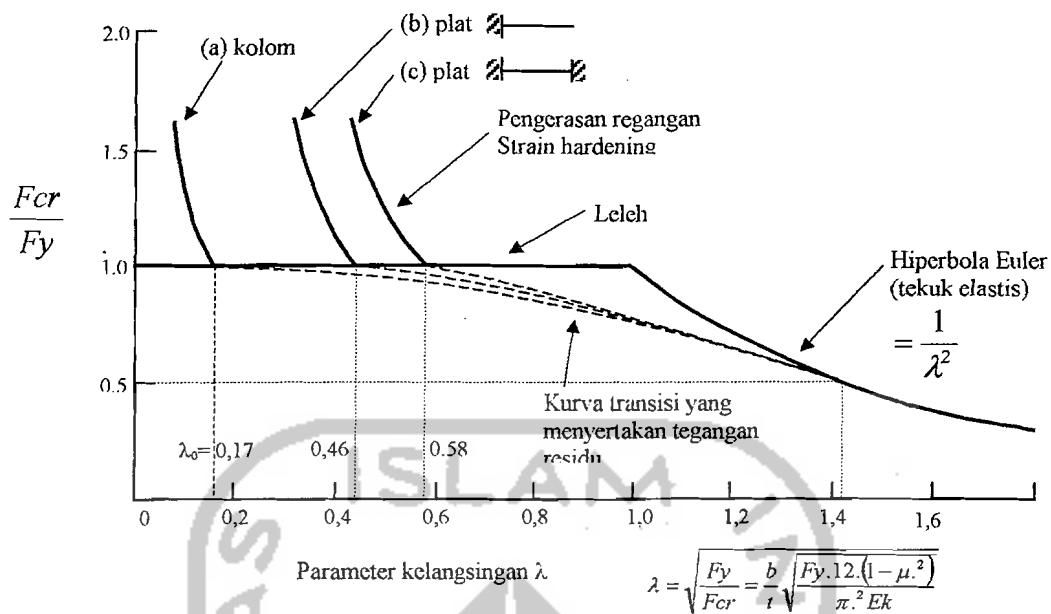


**Gambar 3.10** Koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang kotak (dari NS. Trahair dan MA. Bradford (1988))

Dari Gambar 3.10 terlihat nilai koefisien tekuk pelat tekuk lokal pada pelat tipis penampang kotak dipengaruhi oleh rasio  $b/d$  dan  $T/t$ . Terlihat bahwa semakin besar rasio  $b/d$  nilai  $k$  semakin besar, semakin kecil rasio  $T/t$  nilai  $k$  semakin besar.

Rumus untuk parameter kelangsingan ( $\lambda_c$ ) dengan memasukkan  $F_{cr}/F_y$  yang didefinisikan sebagai  $1/\lambda_c^2$  ke Persamaan (3.3) didapatkan,

$$\lambda_c = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y (12)(1-\mu^2)}{\pi^2 E k}} \quad (3.24)$$



**Gambar 3.11.** Perbandingan antara tekuk plat dengan tekuk kolom (dari Salmon dan Johnson, 1996)

Dari Gambar 3.11 diperoleh perbandingan harga  $F_{cr}/F_y$  dengan  $\lambda$ , pada pelat dengan satu tumpuan mempunyai  $\lambda = 0,46$  dan untuk pelat dengan dua tumpuan harga  $\lambda = 0,58$  untuk kondisi  $F_{cr}/F_y = 1$ . sehingga dari uraian tersebut maka pelat dengan dua tumpuan memiliki kekuatan untuk mencapai kondisi strain hardening ( $F_{cr}/F_y > 1$ ).

### 3.5 Tekuk Akibat Geser

Tekuk akibat geser dapat diuraikan menjadi tekuk elastis dan tekuk inelastis. Adapun penjabaran dari tekuk elastis dan tekuk inelastis adalah sebagai berikut ini.

#### 3.5.1 Tekuk elastis akibat geser murni

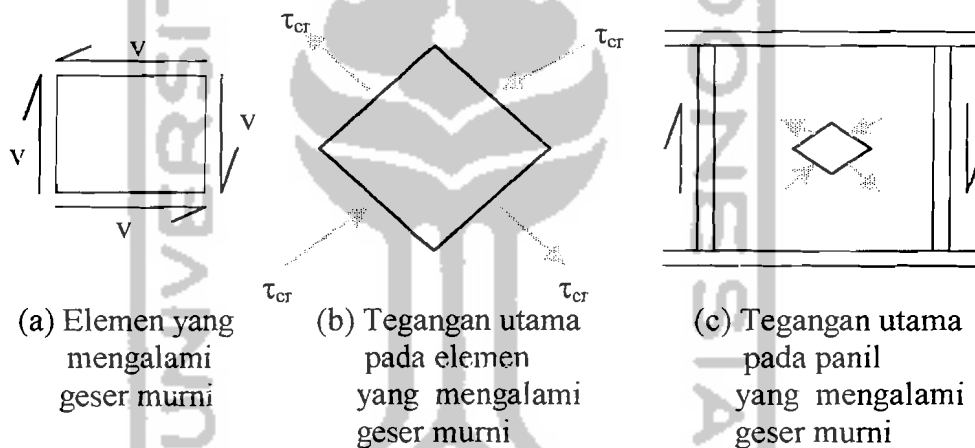
Untuk kasus geser murni lihat Gambar 3.12, Persamaan (3.3) bisa dituliskan sebagai (dengan mengganti  $F$  dengan  $\tau$  untuk tegangan geser)

$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left( \frac{\text{sisipendek}}{t} \right)^2} \quad (3.25)$$

Untuk kasus tepi bertumpuan sederhana (yaitu perpindahan dicegah tetapi rotasi terhadap tepi tidak dikekang),

$$k = 5,34 + 4,0 \left( \frac{\text{sisipendek}}{\text{sisipanjang}} \right)^2 \quad (3.26)$$

penurunan persamaan ini dijabarkan oleh, Timoshenko dan Woinowski-Kriger (1959).



Gambar 3.12 Teori geser klasik (dari Salmon dan Johnson, 1996)

Dalam AISC-1.10.5, Persamaan (3.5) ditulis dalam bentuk tanpa dimensi, dengan mendefinisikan koefisien  $C_v$  sebagai rasio tegangan geser kritis terhadap tegangan leleh geser,

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 Ek}{\tau_y (12)(1 - \mu^2)(h/t_w)^2} \quad (3.27)$$

tampak bahwa  $C_v$  merupakan stabilitas elastis.

Substitusi nilai  $E = 200000 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0,3$ ,  $\tau_y = 0,6 F_{yw}$  ke Persamaan (3.27) menjadi

$$C_v = \frac{303000k}{(h/t_w)^2 F_{yw} (\text{Mpa})} \quad (3.28)$$

### 3.5.2 Tekuk inelastis akibat geser murni

Sebagaimana dalam situasi stabilitas, tegangan sisa dan ketaksempurnaan (*imperfection*) mengakibatkan tekuk tak elastik pada saat tegangan tekuk elastis mendekati tegangan leleh. Berdasarkan hasil percobaan dari Lyse dan Godfrey (1935), yang telah diturunkan oleh Basler (1961), pada daerah transisi antara tekuk elastis dan daerah leleh,

$$\tau_{cr} = \sqrt{\tau_{\text{batas proporsional}} \tau_{cr(\text{elastikideal})}} \quad (3.29)$$

Batas proporsional diambil sebagai  $0,8\tau_y$ , yang lebih besar dari pada untuk tekan dalam flens, karena efek tegangan sisa lebih sedikit. Pembagian Persamaan (3.29) dengan  $\tau_y$  untuk mendapatkan  $C_v$  dan tegangan menggunakan Persamaan (3.28) memberikan,

$$C_v = \frac{491}{h/t_w} \sqrt{\frac{k}{F_{yw}}} \quad (3.30)$$

### 3.6 Kekuatan Geser

Salmon dan Johnson (1996), mengemukakan kekuatan geser nominal  $V_n$  dari suatu gelagar berdasarkan tekuk tak-elastik atau elastik badan dapat dinyatakan,

$$V_n = \tau_{cr} A_w \quad (3.31)$$

atau dengan menggunakan  $C_v = \tau_{cr} / \tau_y$  maka,



$$V_n = C_v \tau_y A_w \quad (3.32)$$

jika  $\tau_y = 0.6F_y$  dan  $C_v = 1$  maka

$$V_n = (0.6F_y)A_w \quad (3.33)$$

Persamaan untuk tegangan geser ijin  $F_v$  adalah

$$F_v = \frac{F_y C_v}{2.89} \leq 0.40F_y \quad (3.34)$$

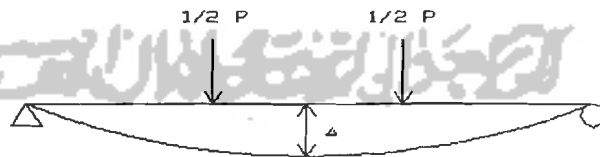
nilai  $k$  adalah

$$k = 4.0 + 5.34/(a/h)^2 \quad \text{untuk } a/h \leq 1$$

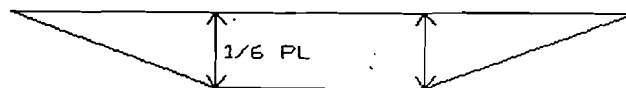
$$k = 4.0 / (a/h)^2 + 5.34 \quad \text{untuk } a/h \geq 1$$

### 3.7 Hubungan Beban Lendutan

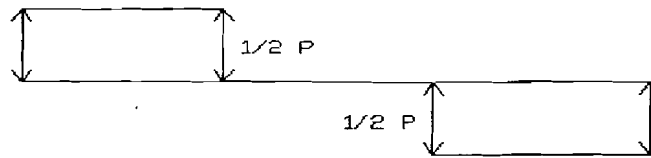
Lynn S. Beedle (1958) menyimpulkan bahwa balok dukungan sederhana yang diberi beban memiliki satu titik yang momennya maksimum. Makin besar beban yang diberikan makin besar pula momennya, material akan terdeformasi semakin cepat dan defleksinya semakin besar.



**Gambar 3.13** Lendutan balok



**Gambar 3.14** Diagram momen



Gambar 3.15 Diagram geser

Hubungan beban-lendutan untuk tipe pembebanan seperti Gambar 3.13 seperti yang ditulis oleh James M. Gere dan Stephen P. Timoshenko (1972), Lampiran D ditunjukkan,

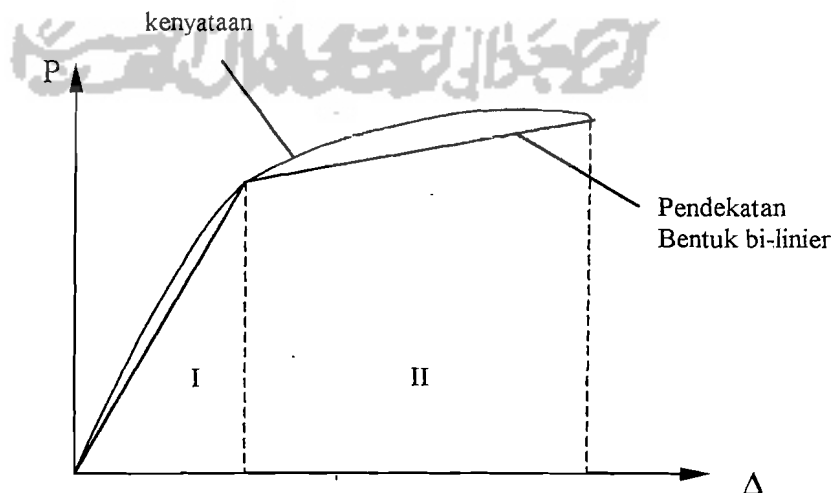
$$\Delta = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (3.35)$$

persamaan sudut rotasi ditunjukkan,

$$\theta_A = \theta_B = \frac{Pa(L-a)}{2EI} \quad (3.36)$$

$\Delta$  = defleksi balok,  $P$  = beban balok,  $E$  = modulus elastis bahan,  $L$  = panjang bentang balok,  $I$  = momen inersia penampang,  $\theta$  = sudut rotasi.

Hubungan beban-lendutan pada balok yang dibebani lentur seperti pada Gambar 3.16.



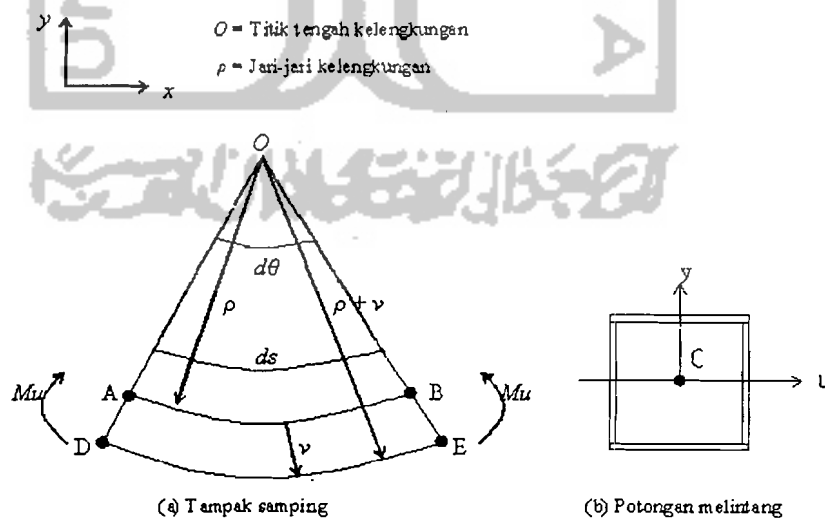
Gambar 3.16 Hubungan Beban dan Lendutan pada Balok

Pada daerah I yaitu pada daerah praretak, balok masih bersifat elastis penuh, tegangan tarik maksimal yang terjadi pada baja masih lebih kecil dari kuat tarik lentur baja, kekakuan lentur  $EI$  balok masih mengikuti modulus elastisitas ( $E_c$ ) baja dan momen inersia penampang balok baja.

Pada daerah II atau daerah pasca layan, dimana tegangan pada daerah ini sudah mencapai tegangan maksimum, pada daerah ini diagram lendutan lebih landai dari pada daerah-daerah sebelumnya. Hal ini karena semakin berkurangnya kekakuan lentur akibat bertambahnya jumlah dan lebar retak di sepanjang bentang.

### 3.8 Hubungan Momen dengan Kelengkungan

Perilaku struktur yang mengalami lentur dapat diketahui dari hubungan momen-kelengkungan yang menggambarkan perilaku balok pada berbagai kondisi, yaitu saat kondisi elastis, leleh, elastis-plastis dan plastis.



Gambar 3.17 Deformasi segmen balok dalam lenturan

Elemen differensial balok untuk lentur murni ditunjukkan pada Gambar 3.17. Sumbu  $u$  dan  $v$  pada potongan melintang, adalah sumbu utama yang ditunjukkan pada Gambar 3.17 (b). AB adalah garis netral, pada garis netral ini garis tidak memendek ataupun memanjang. Seperti yang dikemukakan oleh **James M. Gere dan Sthepen P. Timoshenko (1972)**, regangan pada garis netral didapatkan dari persamaan :

$$\varepsilon_x = \frac{\text{panjang akhir} - \text{panjang awal}}{\text{panjang awal}} \quad (3.37)$$

Dengan substitusi didapat :

$$\varepsilon_x = \frac{(\rho + v)d\theta - \rho.d\theta}{\rho.d\theta} = \frac{v}{\rho} \quad (3.38)$$

Hubungan dasar antara kurva elastis dengan regangan linier, didapat :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = \kappa = \frac{-\varepsilon_x}{v} \quad (3.39)$$

Karena sifat beban tidak diperhitungkan maka hubungan ini digunakan untuk masalah-masalah elastis maupun tidak.

$$\sigma_x = E.\varepsilon_x \quad (3.40)$$

Sehingga,

$$\varepsilon_x = \frac{Mu_v}{EI_u} \quad (3.41)$$

Substitusi Persamaan (3.39) ke Persamaan (3.40) akan diperoleh,

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = \kappa = \frac{Mu_v}{EI_u} \quad (3.42)$$

dalam koordinat kartesian kurva kelengkungan didefinisikan,

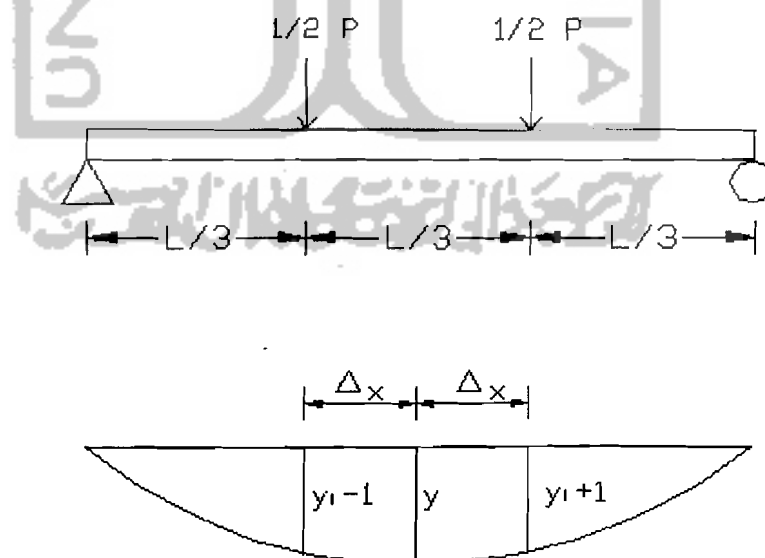
$$\Phi = \frac{1}{\rho} = \kappa = \frac{\pm d^2v/dx^2}{[1+(dv/dx)^2]^{3/2}} \quad (3.43)$$

karena kemiringan  $dv/dx$  dari kurva elastis adalah sangat kecil, maka kwadratnya diabaikan dan dianggap 1 dari sini diperoleh,

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI_u} \quad (3.44)$$

$$EI_u = \frac{M}{(d^2v/dx^2)} \quad (3.45)$$

Dari hasil pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik pembebanan. Dikarenakan terbatasnya peralatan maka persamaan untuk regangan di atas tidak dapat digunakan selanjutnya untuk menghitung nilai kekakuan lentur ( $EI$ ) digunakan lendutan dengan melalui pendekatan kemiringan menggunakan metode *Central Difference*. Dengan mengacu Gambar 3.18, didekati Persamaan (3.46).



**Gambar 3.18** Momen kelengkungan

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.46)$$

turunan kedua Persamaan (3.46) adalah :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x) \frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1}) \frac{d}{dx}(2\Delta x)}{(2\Delta x)^2} \quad (3.47)$$

karena  $(2\Delta x)$  adalah konstanta maka,

$$\frac{d}{dx}(2\Delta x) = 0 \quad (3.48)$$

sehingga Persamaan (3.47) menjadi,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x) \frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta x)^2} \quad (3.49)$$

selanjutnya dari Persamaan (3.49) didapatkan,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{(2\Delta x)^2} \quad (3.50)$$

kemudian Persamaan (3.50) disederhanakan menjadi,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (3.51)$$

Persamaan (3.51) merupakan persamaan kelengkungan, dimana kelengkungan

$\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)$  pada suatu titik dapat diukur dengan lendutan yang terjadi pada 3 titik yang

berurutan  $(y_{i-1}; y_i; y_{i+1})$  yang masing-masing berjarak sama  $(\Delta x)$ . Persamaan (3.51)

digunakan dalam penelitian ini karena lebih sederhana dan tidak membutuhkan

peralatan khusus.

Hubungan momen dengan kelengkungan menurut **Ferdinand L. Singer, Andrew Pytal (1995)** ditunjukkan dalam persamaan berikut,

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \phi = \frac{M}{EI} \quad (3.52)$$

sehingga persamaan momen ( $M$ ) menjadi,

$$M = EI \cdot \phi \quad (3.53)$$

atau,

$$M = EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3.54)$$

Persamaan untuk kekakuan lentur ( $EI$ ) ditunjukkan,

$$EI = \frac{M}{\frac{d^2 y}{dx^2}} \quad (3.55)$$

Persamaan (3.55) menunjukkan hubungan antara faktor kekakuan lentur ( $EI$ ), momen ( $M$ ) dan kelengkungan  $\left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)$ . Terlihat bahwa hubungan  $EI$  dengan  $M$  adalah

berbanding lurus, sedangkan  $EI$  dengan  $\frac{d^2 y}{dx^2}$  berbanding terbalik. Nilai  $M$  dapat

dihitung dengan Persamaan (3.56) dan nilai  $\frac{d^2 y}{dx^2}$  dapat dihitung dengan Persamaan

(3.51), dengan demikian nilai  $EI$  dapat diketahui.

Mengacu pada Gambar 3.14 didapat momen ( $M$ ) :

$$M = \frac{1}{6} PL \quad (3.56)$$

Untuk menghitung momen dan kelengkungan teoritis digunakan persamaan berikut ini,

persamaan momen untuk kondisi elastis pada penampang persegi pejal adalah,

$$M = f \left[ \frac{bh^2}{6} \right] \quad (3.57)$$

persamaan untuk kondisi leleh pada penampang persegi pejal adalah,

$$M = f_y \left[ \frac{bh^2}{6} \right] \quad (3.58)$$

persamaan regangan adalah

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.59)$$

persamaan untuk kelengkungan adalah,

$$\phi = \frac{\varepsilon}{h/2} \quad (3.60)$$

Dari Persamaan (3.60) bahwa kelengkungan dipengaruhi oleh nilai regangan dan tinggi gelagar. Semakin besar nilai regangan dan semakin kecil tinggi gelagar maka nilai kelengkungan semakin besar.

**Salmon dan Johnson, (1996)**, mengemukakan dengan menganggap stabilitas lateral sayap tekan mamadai, perencanaan balok didasarkan pada pencapaian kekuatan lentur penampang maksimum. Distribusi tegangan pada profil sayap lebar tipikal yang mengalami momen lentur yang semakin besar diperlihatkan pada Gambar 3.14. Kekakuan ini didasarkan pada bahan yang tetap elastis sampai titik leleh tercapai, setelah itu tambahan regangan tidak menimbulkan kenaikan tegangan. Pada saat tegangan leleh ( $F_y$ ) tercapai diserat terluar ( $S_x$ ) kapasitas momennya disebut momen leleh ( $M_y$ ) dan dapat dihitung sebagai :

$$M_y = F_y \cdot S_x \quad (3.61)$$



Bila penampang berada dalam kondisi plastis, regangan pada setiap serat sama dengan atau lebih besar dari  $\varepsilon_y = F_y/E_y$ , dengan kata lain serat berada pada daerah plastis. Besarnya momen plastis yaitu dimana seluruh serat berada pada daerah plastis. Kapasitas momen disebut momen plastis ( $M_p$ ) dan besarnya :

$$M_p = f_b \int y.dA \quad (3.62)$$

Dengan  $z = \int y.dA$  maka :

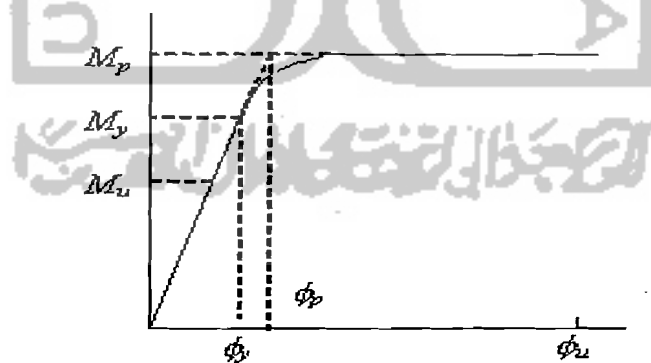
$$M_p = f_b \cdot z \quad (3.63)$$

Dimana  $z$  = modulus plastis.

Terlihat bahwa rasio  $M_p/M_y$  adalah sifat bentuk penampang lintang dan tidak bergantung pada sifat bahan. Rasio ini disebut faktor bentuk  $f$ .

$$f = \frac{M_p}{M_y} = \frac{z}{S} \quad (3.64)$$

Hubungan Momen ( $M$ ) dengan kelengkungan ( $\phi$ ) ditunjukkan pada Gambar 3.19.



**Gambar 3.19** Grafik momen kelengkungan

Gambar 3.19 memperlihatkan ketika momen lentur diperbesar hingga melampaui harga beban kerja sudut regangan  $\phi$  akan elastis seluruhnya (sampai  $M_y$ ) atau plastis sebagian ( $M_y$  ke  $M_p$ ) sampai  $M_p$  tercapai. Setelah itu, keadaan tak stabil atau

mekanisme terjadi sehingga lendutan bertambah. Pada keadaan runtuh, struktur dapat dianalisa sebagai dua benda tegar dengan diskontinuitas anguler  $\phi_u$  ditengah bentang.

### 3.9 Nilai Koefisien Tekuk Pelat

Nilai koefisien tekuk pelat ( $k$ ) merupakan sebuah konstanta yang tergantung pada tipe tegangan, kondisi tumpuan tepi, dan rasio panjang terhadap lebar (rasio aspek) dari pelat yang bersangkutan, modulus elastis ( $E$ ), rasio Poisson ( $\mu$ ), dan rasio lebar terhadap tebal ( $b/t$ ), Salmon dan Johnson,(1992). Nilai  $k$  pada pelat tipis penampang kotak dengan berbagai aspek  $h/d$  dan  $T/t$  lebih besar dibandingkan dengan penampang I yang telah dibuktikan oleh NS. Trahair dan MA. Bradford (1988). Nilai  $k$  dapat diperoleh dari persamaan tegangan tekuk elastis  $F_{cr}$  (Persamaan 3.3) dengan memasukkan nilai rasio ( $h/t$ ) dan  $F_{cr}$ . Nilai  $F_{cr}$  diperoleh dari persamaan,

$$F_{cr} = \frac{M}{S} \quad (3.65)$$

dengan persamaan  $M_{cr}$  adalah,

$$M = \frac{1}{6} PL \quad (3.66)$$

persamaan untuk  $S$  adalah,

$$S = \frac{I}{y} = \frac{\sum \left( \frac{1}{12} . b . h^3 + A_i . y_i^2 \right)}{y} \quad (3.67)$$

$M$  = momen kritis,  $S$  = momen kelembaman,  $y$  = titik berat penampang,  $b$  = lebar penampang,  $h$  = tinggi penampang,  $A$  = luas penampang.

### 3.10 Pengaku Dukung/Landasan

Pengaku dukungan diperlukan secara berpasangan dan diletakkan diatas reaksi-reaksi. Pengaku dukungan juga diperlukan dibawah beban terkonsentrasi yang diangkut oleh gelagar pelat (Salmon dan Johnson,1996).

Pengaku tumpu yang mentransmisikan beban tekan didesain sebagai kolom. Panjang efektif KL menurut **LRFD** harus diambil sama dengan  $0.75 h$ . Rasio kelangsingan dihitung sebagai,

$$\frac{KL}{r} = 0.75 \frac{h}{r} \quad (3.68)$$

dengan  $h$  = kedalaman pelat badan

$$r = \text{jari-jari girasi} = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

luas efektif  $A_e$  yang dihitung dengan menggunakan kekuatan kolom  $P_n$ .

Persyaratan menurut **LRFD** adalah,

$$\phi_c P_n \geq P_u \quad (3.69)$$

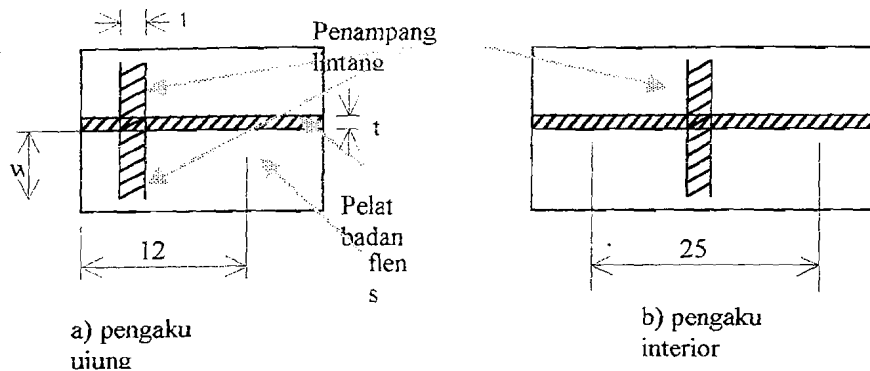
dengan  $\phi$  = faktor resistansi = 0.85,  $P_n = F_{cr} A_e$ ,  $P_u$  = beban tekan terpusat terfaktor,

$F_{cr}$  = tegangan tekuk kolom,  $A_e$  = luas kolom yaitu mencakup luas pelat pengaku dan

luas pelat badan daerah pengaruhnya.

Menurut **Salmon dan Johnson (1996)**, luas efektif yang diperlukan adalah,

$$A_{e\text{perlu}} = \frac{P_u}{\phi_c F_{cr}} \quad (3.70)$$



**Gambar 3.20** Penampang Lintang Efektif Pengaku Tumpu (Salmon dan Johson, 1992)

Persyaratan tumpu yang harus dipenuhi oleh LRFD adalah,

$$\phi_c R_n \geq P_u \quad (3.71)$$

dengan  $\phi = 0.75$ ,  $R_n =$  kekuatan tumpu nominal  $= 2.0F_y A_{pb}$ ,  $A_{pb} =$  luas kontak pengaku yang menumpu pada sayap.

Persyaratan tegangan ijin adalah,

$$f_a \leq F_a \quad (3.72)$$

dengan  $f_a = P/A_e$ ,  $P =$  beban terpusat layanan,  $A_e =$  luas kolom yaitu mencakup luas pelat pengaku dan luas pelat badan daerah pengaruhnya,  $F_a =$  tegangan kolom ijin.

untuk  $\frac{KL}{r} < C_c$

$$F_a = \frac{\left[ 1 - \frac{\left( \frac{KL}{r} \right)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{SF} \quad (3.73)$$

$$SF = \frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3} \quad (3.74)$$

untuk  $\frac{KL}{r} \geq C_c$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL_r)^2} \quad (3.75)$$

dimana

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (3.76)$$

### 3.11 Daktilitas

Daktilitas suatu bahan dapat didefinisikan sebagai banyaknya regangan permanen (*permanent strain*). Daktilitas mengijinkan konsentrasi tegangan (*locally stress*) untuk didistribusikan. Prosedur dari suatu perencanaan biasanya selalu didasarkan pada kekuatan ultimit yang membutuhkan kesatuan daktilitas yang besar, terutama untuk memperbaiki tegangan-tegangan dekat lubang atau perubahan yang mendadak pada bentuk batang, seperti misalnya dalam perencanaan sambungan.

Kelakuan inelastis yang daktil bisa meningkatkan beban yang mampu dipikul batang dibanding dengan beban yang ditahan jika suatu struktur tetap dalam keadaan elastis. Bila seluruh tinggi balok meleleh, diperoleh batas atas dari kekuatan momen yang disebut kekuatan plastis. Proses pembebanan diluar daerah elastis akan menyebabkan perubahan pada daktilitasnya. Sedangkan daktilitas itu sendiri dirumuskan,

$$Daktilitas = \frac{\varepsilon_{tot}}{\varepsilon_y} \quad (3.77)$$

dengan :

$\varepsilon_{tot}$  = regangan total

$\varepsilon_y$  = regangan pada saat leleh pertama

Dalam penelitian, setelah didapat besarnya lendutan dari hubungan beban lendutan, maka daktilitas simpangan dapat dicari dengan :

$$\mu_{simpangan} = \frac{\Delta_{tot}}{\Delta_y} \quad (3.78)$$

dengan :

$\mu_{simpangan}$  = daktilitas simpangan

$\Delta_{tot}$  = lendutan total

$\Delta_y$  = lendutan pada beban maksimum

Sedangkan daktilitas kelengkungan diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan, yaitu perbandingan antara  $\Phi_{tot}$  dan  $\Phi_y$ , yang dirumuskan :

$$\mu_{kelengkungan} = \frac{\Phi_{tot}}{\Phi_y} \quad (3.79)$$

dengan :

$\mu_{kelengkungan}$  = daktilitas kelengkungan

$\Phi_{tot}$  = kelengkungan total

$\Phi_y$  = kelengkungan pada momen maksimum

### 3.12 Pengelompokan Baja Berdasarkan tegangan Leleh

Berdasarkan besar tegangan leleh, PADOSBAJAYO,(1992), membagi baja dalam empat kelompok, dengan kisaran tegangan leleh sebagai berikut :

- a. Carbon Steels, tegangan leleh 210-280 MPa
- b. High-Strength Low-Alloy Steels, tegangan leleh 280-490 MPa
- c. Heat-Treated Carbon and High-Strength Low-Alloy Steels, tegangan leleh 322-700 MPa.
- d. Heat-Treated Constructional Alloy Steels, tegangan leleh 630-700 MPa.