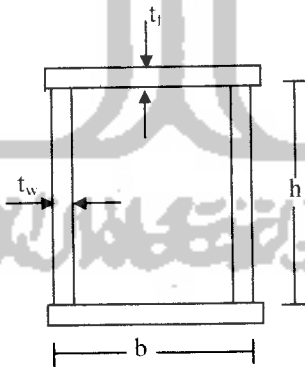


## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Gelagar Pelat

Menurut Salmon dan Johnson, 1996, gelagar pelat adalah balok yang dibentuk dari elemen-elemen untuk mencapai kekuatan beban yang lebih efisien dibanding dengan yang diperoleh dari balok profil I. Gelagar pelat cukup ekonomis bila bentangnya cukup panjang sehingga memungkinkan penghematan biaya dengan cara memproporsionalkan terhadap persyaratan-persyaratan tertentu. Gelagar pelat penampang kotak terbentuk dari pelat yang tersusun, dapat dilihat pada Gambar 3.1



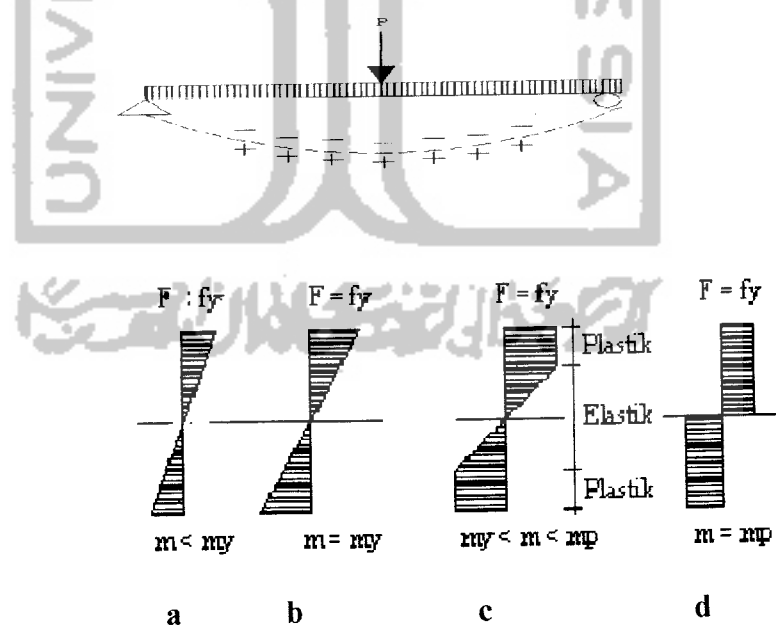
**Gambar 3.1** Potongan melintang gelagar pelat penampang kotak.

Ada dua elemen dasar gelagar pelat penampang kotak antara lain :

1. Sayap gelagar berupa pelat baja yang terdiri dua bagian yaitu sayap atas dan sayap bawah yang diletakkan pada posisi memanjang horizontal, pada kedua sisinya ditumpu sederhana secara menerus.

2. Badan berupa pelat baja yang diletakkan memanjang vertikal, umumnya pelat badan relatif tipis yang diperkaku dengan pelat sayap dan ditumpu sederhana secara menerus

Menurut **Salmon dan Johnson, 1992**, distribusi tegangan yang mengalami peningkatan momen lentur diperlihatkan dalam **Gambar 3.2**, kondisi ini hanya dapat diwakili bila balok tidak mengalami tekuk lokal maupun tekuk puntir lateral. Pada momen lentur dalam rentang beban layanan, penampang tersebut bersifat elastik seperti dalam **Gambar 3.2a** dan kondisi elastik akan terjadi sampai tegangan pada serat terluar mencapai tegangan leleh  $f_y$  **Gambar 3.2b**. Pada **Gambar 3.2c** terjadi setelah sebagian serat pada penampang balok mencapai tegangan leleh sebagian lagi masih elastis dan **Gambar 3.2d** terjadi jika seluruh serat pada penampang balok mencapai tegangan leleh atau plastis penuh.



**Gambar 3.2** Distribusi tegangan pada berbagai tahap pembebanan (**Salmon dan Johnson, 1992**)

### 3.2. Stabilitas Pelat.

Stabilitas pelat yang pendekatannya mengikuti uraian **Timoshenko (1959)** yang dimodifikasi oleh Gerste, disamping suku umum  $q$  yang menyatakan komponen beban transversal akibat lenturan pelat, komponen transversal dari gaya tekan  $N_x$  perlu ditinjau ketika pelat melendut ke posisi tertekuk. Persamaan differensial untuk lenturan pelat homogen yang diturunkan dari teori pelat oleh **Timoshenko (1959)** yang ditunjukkan pada Persamaan 3.1

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

dimana :  $w$  = lendutan lateral,  $q$  = komponen beban transversal akibat lenturan pelat,  $D$  = kekakuan lentur persatuan panjang pelat

Persamaan 3.1 bila ditulis untuk balok dengan lebar  $b$ , menjadi Persamaan deferensial untuk beban :

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = qb \quad (3.2)$$

dengan  $I = t^3 b / 12(1-\mu^2)$  dan  $qb$  merupakan beban panjang satuan di sepanjang bentang balok. Disamping suku umum  $q$  yang menyatakan komponen beban transversal akibat lenturan pelat, komponen transversal dari gaya tekan  $N_x$  ketika pelat melendut

$$q = -N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

kemudian Persamaan 3.3 disubstitusikan kedalam Persamaan 3.1 menjadi

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \frac{N_x \partial^2 w}{D \partial x^2} \quad (3.4)$$

yang merupakan persamaan differensial parsial dengan  $w$  sebagai fungsi dari  $x$  dan  $y$ . lendutan  $w$  dapat dinyatakan sebagai perkalian fungsi  $x$  ( $X$ ) dan fungsi  $y$  ( $Y$ ). juga, tekuk dapat dianggap menimbulkan lendutan yang berbentuk kurva sinus dalam arah  $x$ , jadi,

$$w = X(x) Y(y) \quad (3.5)$$

sehingga Persamaan 3.6 menjadi,

$$N_x = \frac{D \pi^2}{b^2} \left[ \frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \quad (3.6)$$

karena  $N_x = F_{cr} t$  dan  $D = Et^3 / [12(1-\mu^2)]$ , tegangan tekuk elastis dapat dituliskan sebagai,

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (3.7)$$

dimana  $k$  merupakan sebuah konstanta yang tergantung pada tipe regangan, kondisi tumpuan tepi, dan rasio panjang terhadap lebar ( rasio aspek ) dari pelat yang bersangkutan, modulus elastisitas  $E$ , rasio poisson  $\mu$ , dan rasio lebar terhadap tebal  $b/t$

### 3.3. Tekuk Pelat pada Sayap akibat Tekan.

Menurut **Salmon dan Johnson** sepertinya profil kotak tersusun dari elemen pelat, kekuatan kolom penampang tersebut yang didasarkan atas rasio kerampingan keseluruhan hanya dapat terpenuhi bila elemen pelat tidak mengalami lokal. Tekuk lokal pada elemen pelat dapat menyebabkan terjadinya kegagalan prematur pada keseluruhan penampang, atau setidaknya akan

menyebabkan tegangan tidak merata dan mengurangi kekuatan keseluruhan tegangan tekuk elastik pelat dapat dinyatakan sebagai berikut :

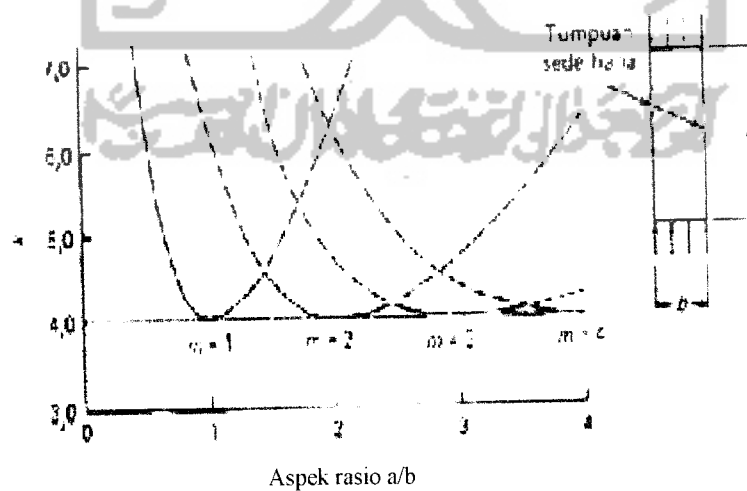
$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (3.7)$$

dari rumus tegangan tekuk elastis diatas dapat dilihat 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 Persamaan 3.7 adalah,

$$k = \left[ \frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \quad (3.8)$$

Koefisien  $k$  merupakan fungsi dari jenis tegangan, kondisi tepi dan rasio aspek  $a/b$  yang muncul secara langsung dalam persamaan tersebut. Bilangan  $m$  menunjukkan banyaknya separuh gelombang yang terjadi dalam arah  $x$  pada saat tekuk menurut (Salmon dan Johnson 1992)



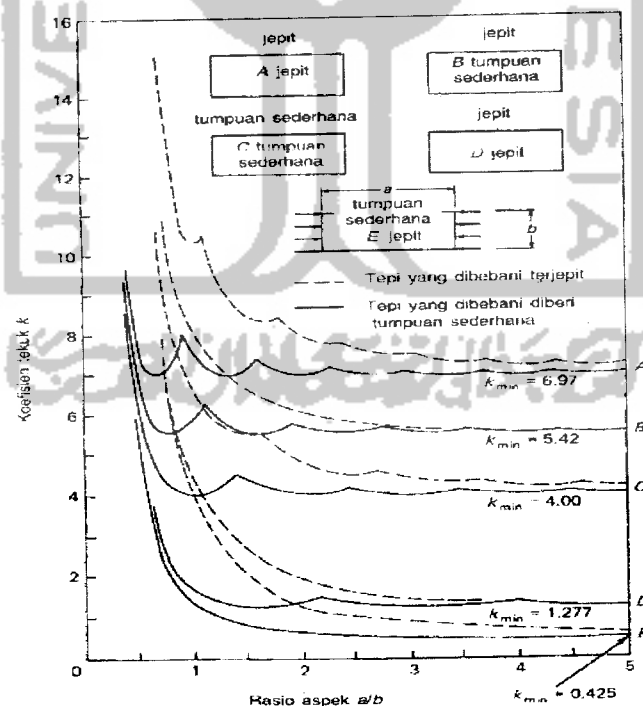
**Gambar 3.3** Koefisien tekuk untuk pelat yang ditekan secara merata-tepi longitudinal bertumpuan sederhana ( Salmon dan Johnson 1996 )

Dari **Gambar 3.3** dapat dilihat variasi nilai  $k$  terhadap aspek rasio  $a/b$  dari pelat yang ditekan secara merata tepi longitudinal bertumpuan sederhana dan menurut **Salmon dan Johnson** nilai  $k$  minimum = 4 untuk berbagai variasi nilai  $m$  ( $m = 1-4$ ) dengan disubstitusikan nilai  $k = 4$  ke Persamaan 3.9 diperoleh,

$$I'_{cr} = \frac{4\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left(\frac{b}{l}\right)^2} \quad (3.9)$$

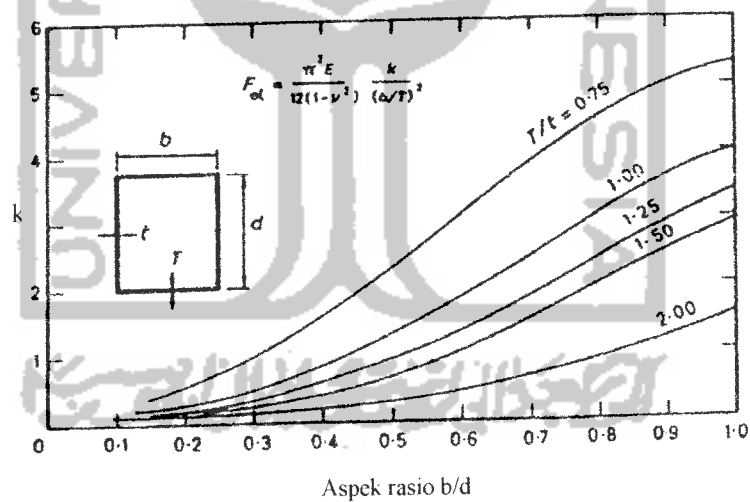
Secara umum elemen- elemen tekan pelat dapat dibedakan atas dua kategori

1. Elemen yang diperkuat yaitu elemen yang bertumpu pada dua tepi yang sejajar arah tegangan tekan
2. Elemen yang tidak diperkuat yaitu elemen yang bertumpu pada satu tepi dan bebas ditepi yang lain yang sejajar arah tegangan tekan



**Gambar 3.4** Koefisien tekuk elastis untuk tekanan merata pada pelat segi empat datar (Gerard G dan Becker H, 1957)

Dari **Gambar 3.4** menunjukkan variasi nilai  $k$  untuk kondisi tepi-tepi pelat ideal yakni jepit, tumpuan sederhana dan bebas dimana pelat ditekan secara merata. Tampak bahwa untuk pelat dengan kondisi jepit-jepit (A) nilai  $k_{\min} = 6,97$ . Untuk pelat dengan tumpuan sederhana-jepit (B) nilai  $k_{\min} = 5,42$  sedangkan pelat dengan tumpuan sederhana-sederhana (C) nilai  $k_{\min} = 4$ . Dan untuk pelat dengan tumpuan jepit-bebas (D)  $k_{\min} = 1,277$ , serta untuk pelat dengan tumpuan sederhana-bebas (E)  $k_{\min} = 0,425$ . Tekuk lokal pada elemen pelat dapat menyebabkan terjadinya kegagalan prematur pada keseluruhan penampang. Pada **Gambar 3.5** menunjukkan nilai koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang kotak yang dipengaruhi oleh rasio  $b/d$  (0-1) dan  $T/t$  (0.75;1.00;1.25;1.50;2.00) menurut (NS Trahair dan MA Bradford, 1988)



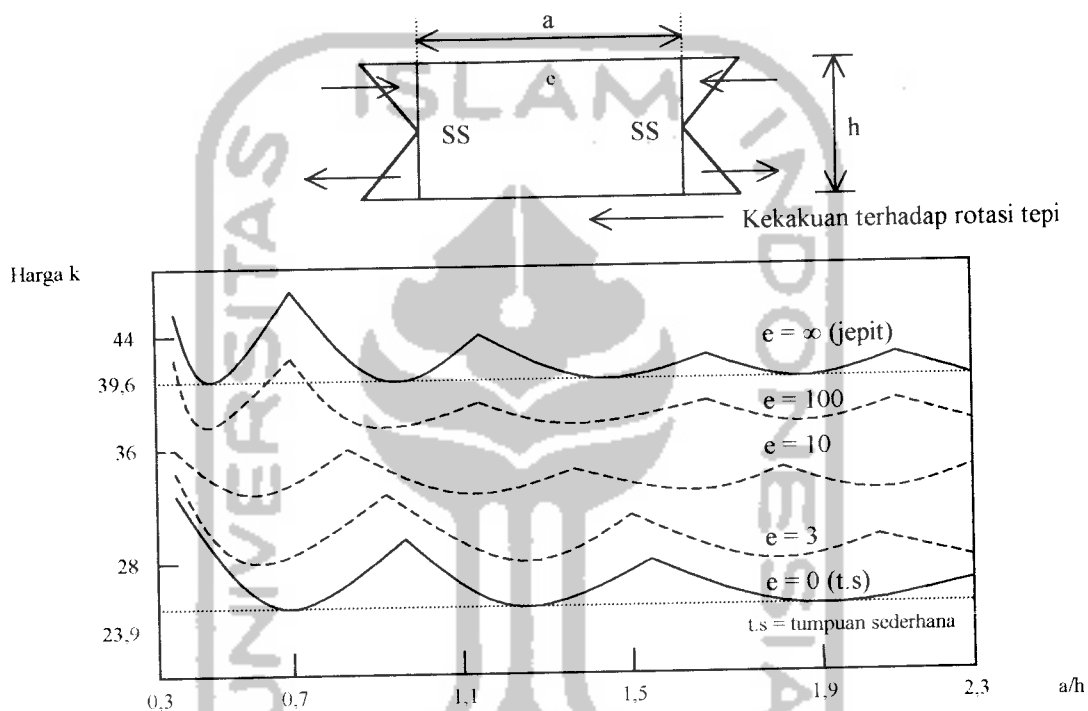
**Gambar 3.5.** Koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang kotak(NS Trahair dan MA. Bradford,1988)

Terlihat bahwa semakin besar rasio  $b/d$  nilai  $k$  semakin besar, semakin kecil rasio  $T/t$  nilai  $k$  semakin besar.

### 3.4. Lentur Pada Bidang Badan

Badan gelagar pelat biasanya memiliki rasio  $h/tw$  besar, tekuk mungkin terjadi akibat lentur pada bidang badan.

Penurunan harga  $k$  secara teoritis untuk lentur pada bidang pelat dijabarkan oleh Timoshenko dan Woinowski-Kriger (1959) seperti pada Gambar 3.5



Gambar 3.6 Koefisien tekuk untuk plat yang mengalami lentur murni

Pada Gambar 3.6 nilai  $k$  bervariasi menurut rasio  $a/h$ , jika pelat bisa dianggap jepit sempurna sepanjang tepi yang sejajar arah pembebanan maka harga  $k$  minimum untuk sembarang rasio  $a/h$  menjadi 39,6, sedangkan sayap dianggap tidak mengekang secara rotasi tepi maka harga  $k$  minimum menjadi 23,9. Tegangan lentur dan geser pada daerah tertentu sepanjang bentang gelagar biasanya bisa ditinjau secara terpisah, umumnya tegangan geser dan lentur mengakibatkan ketidaksetabilan elastis.



### 3.5 Kekuatan Lentur Batas pada Gelagar.

Kekuatan momen nominal ( $M_n$ ) dari gelagar pelat badan yang ramping dikontrol oleh keadaan batas tekuk pada sayap tekan, yang menurut Apendiks G1 LRFD adalah sebagai berikut:

$$M_n = F_{cr} S_{xc} R_{PG} \quad (3.10).$$

dengan:  $F_{cr}$  = tegangan tekuk pada sayap tekan, yang dikontrol oleh tekuk puntir lateral, tekuk lokal sayap, atau pelelehan,  $S_{xc}$  = modulus penampang yang diacukan ke sayap tekan,  $R_{PG}$  = Faktor yang digunakan untuk memperhitungkan efek lentur tekuk dari pelat badan yang ramping.

$$R_{PG} = 1 - 0,0005 a_r \left( \frac{h_c}{t_w} - \frac{970}{\sqrt{F_{cr}}} \right) \leq 1 \quad (3.11)$$

dengan  $a_r = A_w / A_f$ ,  $h_c$  = dua kali jarak dari sumbu netral ke muka dalam sayap minus radius sudut.

Rasio  $M_n / M_y$  untuk daerah dari titik B ke D ( **Gambar 3.7** ) adalah:

$$\frac{M_n}{M_y} = 1,0 - 0,0005 \frac{A_w}{A_f} \left( \frac{h}{t_w} - \frac{970}{\sqrt{F_y}} \right) \quad (3.12)$$

Bila keadaan batas yang menentukan mencegah tegangan sayap mencapai  $F_y$ , maka tegangan kritis dari keadaan batas menentukan  $F_{cr}$  harus menggantikan  $F_y$ , jika disubstitusikan kedalam Persamaan 3.12 maka secara umum

$$M_n = S_x \cdot F_{cr} \left[ 1,0 - 0,0005 \frac{A_w}{A_f} \left( \frac{h}{t_w} - \frac{970}{\sqrt{F_{cr}}} \right) \right] \quad (3.13)$$

Kapasitas momen batas gelagar tinggi merupakan fungsi dari :

$$M_u = f \left\{ \frac{h}{t}, \frac{L}{r_y}, \frac{b}{t_f}, \frac{A_w}{A_f} \right\}$$

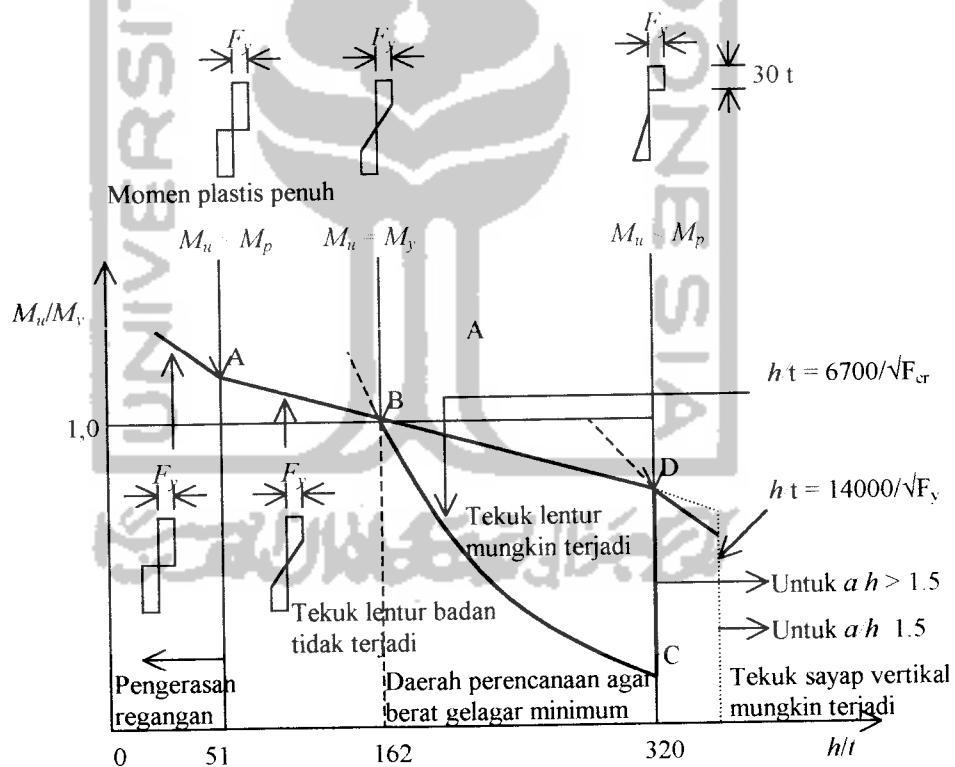
$h/t$  = menentukan ketidak stabilan badan (tekuk lentur)

$L/r_y$  = menentukan ketidak stabilan lateral pada sayap (tekuk puntir lateral)

$b/t_f$  = menentukan tekuk setempat atau tekuk puntir pada sayap

$A_w/A_f$  = menentukan pengaruh purna tekuk pada sayap

Tekuk badan tidak akan mengakhiri kemanfaatan gelagar. **Gambar 3.7** memperlihatkan hubungan antara kekuatan momen nominal  $M_n$  vs  $h/t_w$  dimana kondisi tekuk puntir lateral tidak terjadi.



**Gambar 3.7** Kekuatan lentur gelagar yang dipengaruhi oleh tegangan lentur pada plat badan baja A36 (Salmon dan Johnson)

**Gambar 3.7** menunjukkan grafik hubungan rasio momen nominal terhadap momen leleh  $M_n / M_y$  dengan rasio tinggi terhadap tebal  $h / t$  pelat badan. Untuk  $h / t$  antara 0-162 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.

### 3.6. Tekuk Akibat Geser

#### 3.6.1. Tekuk Elastis Akibat Geser Murni

Menurut **Salmon dan Johnson, 1986**, tegangan tekuk elastis untuk satu pelat ditentukan oleh Persamaan 3.7 sebagai

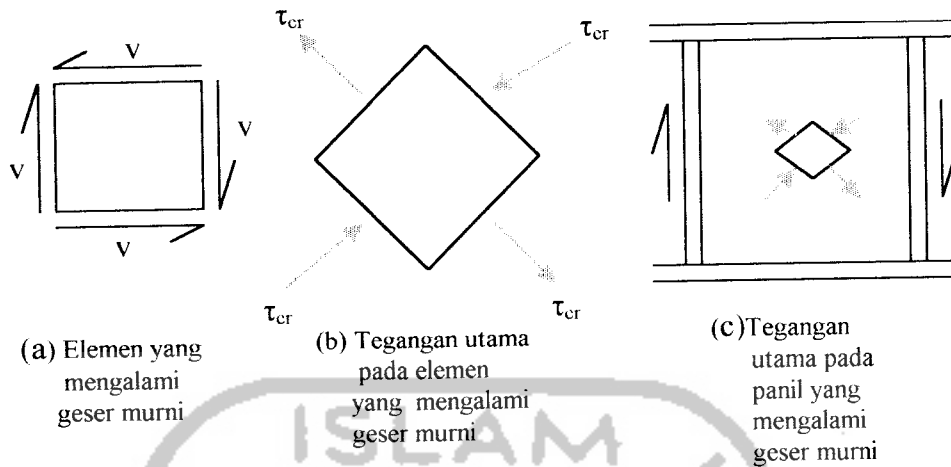
$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (3.7)$$

Untuk kasus geser murni lihat Gambar 3.7 Persamaan 3.7 bisa dituliskan sebagai (dengan mengganti  $F$  dengan  $\tau$  untuk tegangan geser)

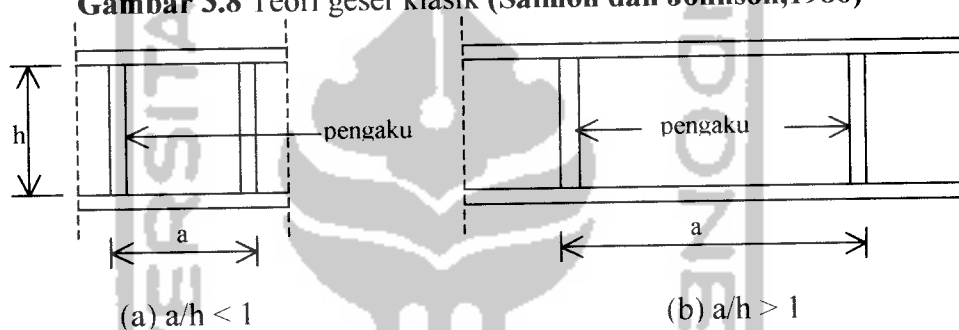
$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left( \frac{\text{sisipendek}}{t} \right)^2} \quad (3.14)$$

untuk kasus tepi bertumpuan sederhana (yakni perpindahan dicegah tetapi rotasi terhadap tepi tidak dikekang),

$$k = 5,34 + 4,0 \left( \frac{\text{sisipendek}}{\text{sisipanjang}} \right)^2 \quad (3.15)$$



**Gambar 3.8** Teori geser klasik (Salmon dan Johnson, 1986)



**Gambar 3.9** Dua keadaan dari jarak pengaku (Salmon dan Johnson, 1986)

Untuk perencanaan, Persamaan 3.14 dan 3.15 biasanya dinyatakan dalam  $h$  (tinggi badan tanpa sokongan) dan  $a$  (jarak antara pengaku). Bila hal ini dilakukan maka ada dua kasus yang harus ditinjau :

a. Jika  $a/h \leq 1$  (lihat Gambar 3.8a), maka Persamaan 3.14 menjadi :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E [5,34 + 4,0(a/h)^2] (h/a)^2}{12(1 - \mu^2)(a/t)^2 (h/a)^2} \quad (3.16)$$

b. Jika  $a/h \geq 1$  (lihat Gambar 3.8b), maka Persamaan 3.14 menjadi :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E [5,34 + 4,0(h/a)^2]}{12(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad (3.17)$$

Jelaslah dari Persamaan 3.16 dan 3.17 bahwa jika kita hendak memakai  $h/t$  sebagai rasio stabilitas pada penyebut, maka dua persamaan untuk  $k$  diperlukan.

Untuk semua harga  $a/h$ , Persamaan 3.16 dan 3.17 bisa dituliskan sebagai :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 Ek}{12(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.18)$$

dengan :

$$k = 4,0 + 5,34/(a/h)^2, \text{ untuk } a/h \leq 1 \quad (3.19)$$

$$k = 4,0/(a/h)^2 + 5,34, \text{ untuk } a/h \geq 1 \quad (3.20)$$

tampak pada Persamaan 3.19 dan 3.20 bila  $a/h$  semakin kecil maka nilai  $k$  akan semakin besar.

Persamaan 3.18 ditulis dalam bentuk tanpa dimensi, dengan mendefinisikan koefisien  $C_v$  sebagai rasio tegangan geser kritis terhadap tegangan leleh geser,

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 Ek}{\tau_y (12)(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.21)$$

tampak bahwa  $C_v$  merupakan stabilitas elastis.

Substitusi nilai  $E = 200000 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0,3$ ,  $\tau_y = 0,6 F_{yw}$  ke Persamaan 3.21

menjadi :

$$C_v = \frac{303000k}{(h/t)^2 F_{yw}(\text{Mpa})} \quad (3.22)$$

### 3.6.2. Tekuk Inelastis Akibat Geser Murni

Sebagaimana dalam situasi stabilitas, tegangan sisa dan ketidaksempurnaan (*imperfection*) mengakibatkan tekuk tak elastik pada saat tegangan kritis mendekati tegangan leleh.

$$\tau_{cr} = \sqrt{\tau_{\text{batas proporsional}} \tau_{cr(\text{elastikidal})}} \quad (3.23)$$

Batas proporsional diambil sebagai  $0,8 \tau_y$ , yang lebih besar daripada untuk tekan dalam flens, karena efek tegangan sisa lebih sedikit. Pembagian Persamaan 3.23 dengan  $\tau_y$  untuk mendapatkan  $C_v$  dan tegangan menggunakan Persamaan 3.22 memberikan

$$C_v = \frac{491}{h/t_w} \sqrt{\frac{k}{F_{yw}}} \quad (3.24)$$

### 3.6.3. Kekuatan Geser

#### a. Geser Nominal

Menurut **Salmon dan Johnson, 1996**, kekuatan geser nominal  $V_n$  dari suatu gelagar berdasarkan tekuk tak-elstik atau elastik badan dapat dinyatakan

$$V_n = \tau_{cr} A_w \quad (3.25)$$

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

$$V_n = C_v \tau_y A_w \quad (3.26)$$

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

$$V_n = (0.6F_y) A_w \quad (3.27)$$

#### b. Kekuatan Geser dalam Rentang Beban Layanan

$$\left( \frac{V_n}{\gamma/\phi} = \frac{V_n}{FS} \right) \geq V \quad (3.28)$$

dimana :  $\gamma/\phi$  = faktor-faktor kelebihan beban dibagi oleh faktor resistansi

$FS = 1.67$  = faktor keamanan nominal dalam desain balok

$V$  = geser beban layanan

Untuk tegangan geser diuliskan sebagai berikut

$$\left( f_v = \frac{V}{A_w} \right) \leq \left( F_v = \frac{V_n}{(FS)A_w} \right) \quad (3.29)$$

dimana tegangan ijin  $F_v$  dapat diperoleh dengan menempatkan Persamaan 3.26 kedalam Persamaan 3.29 maka persamaan 3.30 menjadi

$$F_v = \frac{C_v \tau_v A_w}{(FS)A_w} = \frac{C_v \tau_v}{FS} \quad (3.30)$$

Dengan menggunakan  $\tau_v = F_y \sqrt{3}$  sebagai ganti dari  $0.6F_y$  sebagaimana digunakan dalam LRFD, diambil  $FS = 1.67$  dengan mengingat batas atas tradisional sebesar  $0.40F_y$  untuk  $F_v$

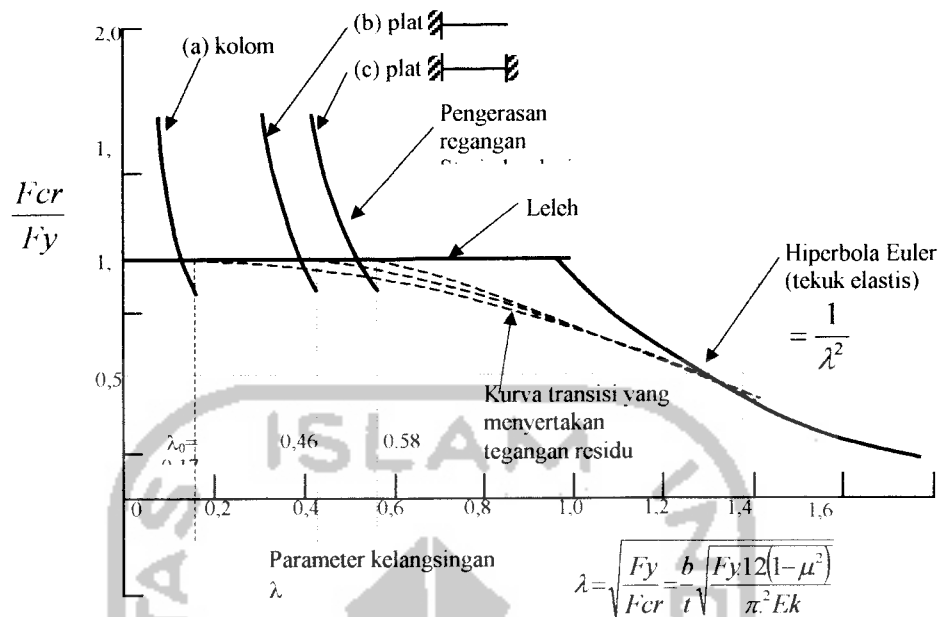
$$F_v = \frac{F_y \cdot C_v}{2,89} \leq 0,4 F_y \quad (3.31)$$

Gelagar pelat tersebut kompak jika :

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \geq F_y \quad (3.32)$$

Bila  $F_{cr} / F_y$  didefinisikan sebagai  $1/\lambda_c^2$ , Persamaan 3.32 untuk pelat menjadi :

$$\lambda_c = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y(12)(1-\mu^2)}{\pi^2 E k}} \quad (3.33)$$



**Gambar 3.10** Perbandingan antara tekuk pelat dengan tekuk kolom (Salmon dan Johnson,1996)

Faktor penting yang menentukan  $\lambda_0$  ialah jumlah tepi tumpuan elemen pelat yang sejajar pembebanan ( yaitu satu atau dua tepi sehingga  $\lambda_0 = 0$  menjamin terjadinya tegangan leleh bisa mencapai awal dari strain hardening

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Fy 12 (1 - \mu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2}{k \pi^2 E}} \quad (3.34)$$

dari persamaan 3.34 didapatkan:

$$\frac{b}{t} = \sqrt{\frac{\lambda_0 \pi^2 k E}{Fy 12 (1 - \mu^2)}} \quad (3.35)$$

Dengan menggunakan  $\mu = 0.3$  untuk baja dan  $E = 200,000$  Mpa dan  $Fy$  dalam Mpa menurut Salmon dan Johnson,1992 :



$\lambda_c$  harus dibatasi agar tercapai pengerasan regangan tanpa adanya tekuk pelat.

Bila harga  $\lambda_c = 0,46$  dimasukkan kedalam persamaan 3.35 akan :

$$\frac{b}{t} = \left( \frac{(0,46)^2 \pi^2 2 \cdot 10^5}{12 F_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5} \quad (3.36)$$

$$\frac{b}{t} = 195,6 \sqrt{\frac{k}{F_y (Mpa)}} \quad (3.37)$$

Batas rasio  $b/t$  pada sayap untuk menghindari tekuk adalah :

$$\frac{b}{t} \leq \frac{171}{\sqrt{F_y (Mpa)}} \quad (3.38)$$

Bila harga  $\lambda_c = 0,58$  dimasukkan ke dalam persamaan 3.37 maka

$$\frac{b}{t} = \left( \frac{(0,58)^2 \pi^2 2 \cdot 10^5}{12 F_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5} \quad (3.39)$$

$$\frac{b}{t} = 246,5 \sqrt{\frac{k}{F_y (Mpa)}} \quad (3.40)$$

batas rasio  $h/t$  pada badan untuk menghindari tekuk adalah:

$$\frac{h}{t} \leq \frac{500}{\sqrt{F_y (Mpa)}} \quad (3.41)$$

### 3.7. Pengaku Dukung / Landasan

Pengaku dukungan diperlukan secara berpasangan dan diletakan 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  $0.75h$ . Rasio kelangsingan dihitung sebagai

$$\frac{KL}{r} = 0.75 \frac{h}{r} \quad (3.42)$$

dengan  $h$  = kedalaman pelat badan

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

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

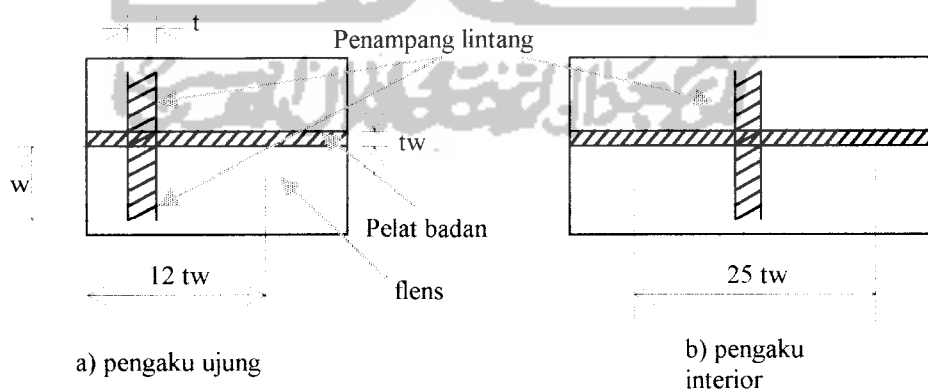
Persyaratan menurut LRFD adalah

$$\phi_c P_n \geq P_u \quad (3.43)$$

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

$$A_{e\text{perlu}} = \frac{P_u}{\phi_c F_{cr}} \quad (3.44)$$



**Gambar 3.11** Penampang Lintang Efektif Pengaku Tumpu (Salmon dan Johnson, 1992)

Persyaratan tumpu yang harus dipenuhi oleh LRFD adalah

$$\phi_c R_n \geq P_u \quad (3.45)$$

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

Persyaratan tegangan ijin adalah

$$f_a \leq F_a \quad (3.46)$$

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

$$F_a = \frac{\left[ 1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{SF} \quad (3.47)$$

$$SF = \frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3} \quad (3.48)$$

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

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad (3.49)$$

dengan  $C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (3.50)$

### 3.8. Hubungan Beban-Lendutan

Apabila suatu beban menyebabkan timbulnya lentur, maka balok pasti mengalami lendutan. Meskipun sudah dicek aman terhadap lentur dan geser, suatu balok bisa tidak layak apabila balok terlalu fleksibel. Defleksi yang terlalu berlebihan harus dihindari karena defleksi yang terlihat dengan mata dapat mengurangi keyakinan terhadap kekuatan struktur.

Hubungan beban-lendutan untuk tipe pembebanan seperti **Gambar 3.12** dapat dicari dengan menggunakan metode *integrasi ganda* sehingga Persamaan 3.51

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad (3.51)$$

Integral pertama dari Persamaan 3.51 didapat Persamaan 3.52

$$EI \frac{dy}{dx} = \int M dx + C_1 \quad (3.52)$$

Integral kedua dari Persamaan 3.51 adalah Persamaan 3.53

$$EI y = \iint M dx dx + C_1 x + C_2 \quad (3.53)$$

sehingga dari Persamaan 3.53 didapat persamaan umum lendutan:

$$y = \Delta = \frac{1}{EI} \iint M dx dx + C_1 x + C_2 \quad (3.54)$$

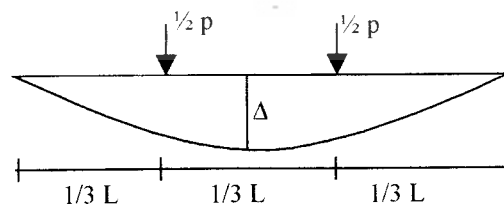
untuk besarnya defleksi tengah bentang dari Persamaan 3.54 adalah:

$$\Delta = \frac{23 PL^3}{648 EI} \quad (3.55)$$

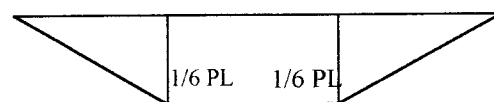
dengan :

$\Delta$  = defleksi balok;  $P$  = beban balok;  $E$  = modulus elastis bahan;

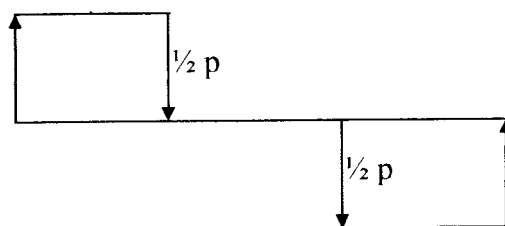
$L$  = panjang bentang balok;  $I$  = momen inersia penampang



**Gambar 3.12** Lendutan balok

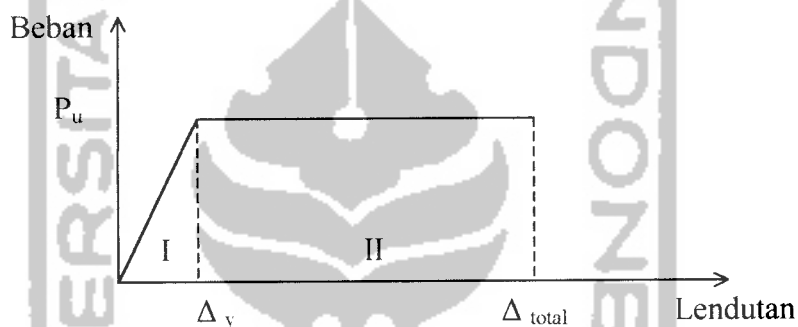


**Gambar 3.13** Diagram momen



**Gambar 3.14** Diagram geser

Hubungan beban-lendutan pada balok yang dibebani lentur dapat disederhanakan menjadi bentuk bi-linier seperti pada **Gambar 3.14**.



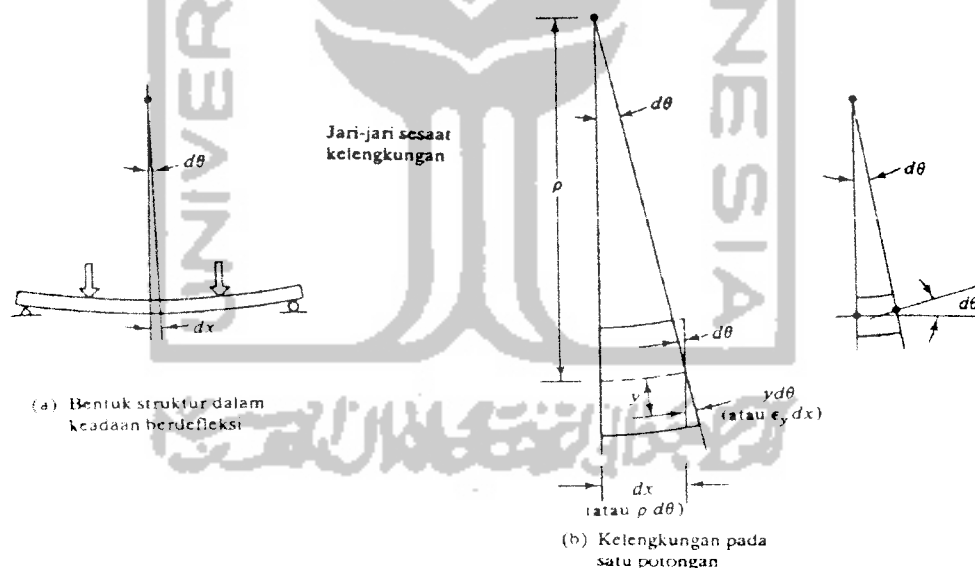
**Gambar 3.15** Hubungan Beban dan Lendutan pada Balok

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.

### 3.9. Hubungan Momen-Kelengkungan

Menurut Schodek 1991 hubungan yang ada diantara momen di suatu titik dan kelengkungan elemen struktur pada titik yang sama. Momen menyebabkan terjadinya lenturan pada struktur. Semakin besar momen tersebut, akan semakin besar pula lenturan yang di akibatkannya. Potongan kecil dari suatu balok yang mengalami lentur **Gambar 3.16**. Anggap bahwa bidang yang semula datar pada balok akan tetap datar pada saat melentur. Dengan demikian, dua bidang yang berdekatan ( mempunyai jarak sebesar  $d\sigma$  ) pada saat balok melentur akan mengalami rotasi relatif sebesar  $d\theta$ .



**Gambar 3.16** Hubungan momen kelengkungan ( Schodek, 1991 )

Serat-serat dibagian atas akan memendek, sedangkan yang dibagian bawah akan memanjang. Perpanjangan serat yang terletak sejauh  $y$  dari bidang netral ( bidang horizontal yang mempunyai deformasi 0 ) dapat diperoleh dengan

meninjau lokasi semula kedua bidang. Perpanjangan ini adalah busur lingkaran yang mempunyai jari-jari  $y$  dan dibatasi sudut  $d\theta$ . Jadi, perpanjangannya adalah  $y\theta$ . Apabila panjang elemen sebelum deformasi adalah  $dx$  dan regangan (deformasi per satuan panjang) pada  $y$  adalah  $\epsilon_y$ , maka  $y d\theta = \epsilon_y dx$ , atau  $\epsilon_y = d\theta/dx$ , atau  $(d\theta/dx) = \epsilon_y/y$ .

Dari Gambar 3.16 jelaslah bahwa jari-jari kelengkungan  $\rho$  dan  $dx$  pada penampang tengah adalah busur lingkaran yang berjari-jari  $\rho$  dan dibatasi sudut  $d\theta$ , hubungan ini dapat ditulis dalam bentuk  $(d\theta/dx) = 1/\rho$ . Dengan menyamakan kedua ekspresi untuk  $d\theta/dx$ , kita peroleh :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_y}{y} \text{ atau } \epsilon_y = \frac{y}{\rho} \quad (3.56)$$

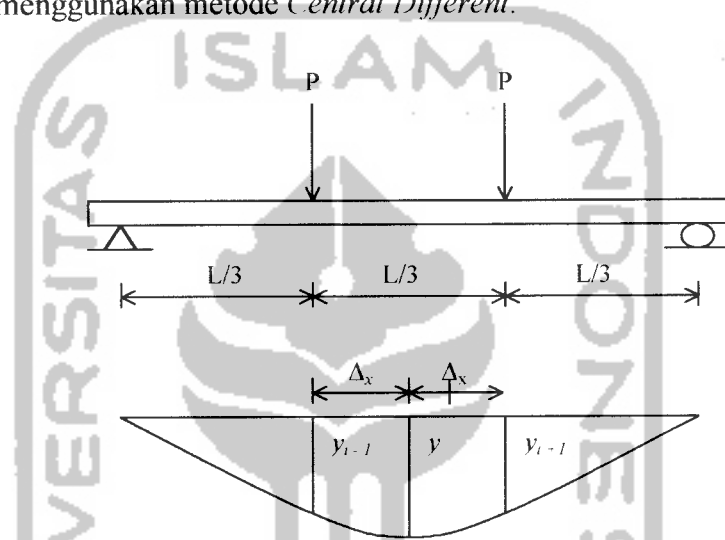
Hubungan antara tegangan dan regangan untuk material elastis homogen berbentuk  $E = f_y/\epsilon_y$  dimana  $E$  adalah modulus elastisitas material dan  $f_y$  adalah tegangan di suatu titik. Hubungan tersebut dapat pula ditulis dalam bentuk  $\epsilon_y = (1/E) f_y$ . Jika tegangan lentur  $f_y = My/I$ . Dengan demikian,  $\epsilon_y = (1/E) (My/I)$  atau  $y/\rho = (1/E) (My/I)$

$$\Phi = K = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (3.57)$$

Ini adalah hubungan momen-kelengkungan. Kelengkungan ( $\Phi$ ) berbanding lurus dengan momen ( $M$ ) pada elemen struktur dan berbanding terbalik dengan hasil kali modulus elastisitas ( $E$ ) dan momen inersia ( $I$ ) elemen struktur. Apabila  $M=0$ , maka :

$\rho \rightarrow \infty$ , yang berarti elemen tersebut lurus ( seperti memang seharusnya terjadi pada pada elemen struktur yang momennya = 0). Apabila momennya semakin besar, maka jari-jari kelengkungan menjadi lebih kecil, yang berarti bahwa elemen struktur semakin lengkung pada saat dibebani.

Dari pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik distrik. Pendekatan kemiringan menggunakan metode *Central Different*.



**Gambar 3.17** Momen-kelengkungan

Mengacu pada **Gambar 3.17**  $dy/dx$  dicari dengan Persamaan 3.58:

$$\frac{d_y}{d_x} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.58)$$

turunan kedua dari Persamaan 3.58 adalah Persamaan 3.59:

$$\frac{d^2_y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x) \frac{d}{dx} (y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1}) \frac{d_y}{d_x} (2\Delta x)}{(2\Delta x)} \quad (3.59)$$

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

$$\frac{d}{d_x} (2\Delta x) = 0 \quad (3.60)$$



sehingga Persamaan 3.60 menjadi Persamaan 3.61:

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{(2\Delta x) \frac{d}{d_x} (y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta x)^2} \quad (3.61)$$

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{(2\Delta x)^2} \quad (3.62)$$

Kemudian Persamaan 3.62 disederhanakan menjadi :

$$\frac{d^2_y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta_x)^2} \quad (3.63)$$

Persamaan 3.63 merupakan persamaan kelengkungan, dimana Kelengkungan ( $d^2 y/dx^2$ ) pada suatu titik dapat diukur dengan lendutan yang terjadi pada 3 titik yang berurutan ( $y_{i-1}; y_i; y_{i+1}$ ) yang masing2 berjarak sama ( $\Delta_x$ ). Persamaan 3.63 digunakan dalam penelitian ini karena lebih sederhana dan tidak memerlukan peralatan khusus.

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \Phi = \frac{M}{EI} \quad (3.64)$$

Mengacu kepada **Gambar 3.17** didapat momen ( $M$ ):

$$M = \frac{1}{6} p l^2 \quad (3.65)$$

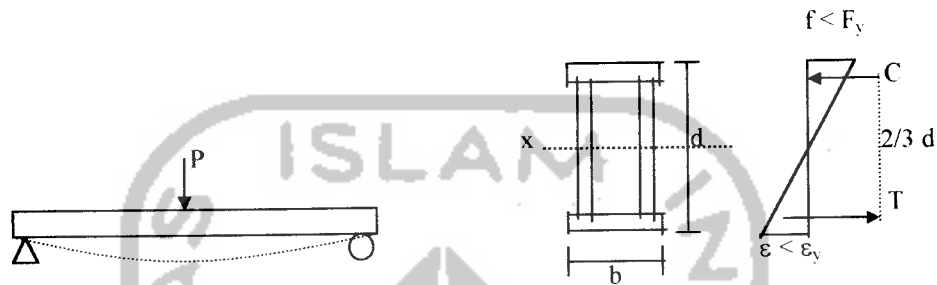
Sehingga dapat disimpulkan besar  $EI$  dengan rumus :

$$EI = \frac{M}{\Phi} \quad (3.66)$$

$$M = EI \cdot \Phi \quad (3.67)$$

$$M = EI \frac{d^2_y}{d_x^2} \quad (3.68)$$

Mengacu pada **Gambar 3.17** maka dapat diketahui kelengkungan teoritis, dimana nilai kelengkungan dipengaruhi regangan yang terjadi pada penampang. Pada **Gambar 3.17** dapat regangan dan tegangan yang terjadi penampang apabila balok tidak kompak.



**Gambar 3.18** Distribusi tegangan dan regangan elastis pada pembebanan tegak lurus balok.

Pada **Gambar 3.18** dapat dilihat apabila balok dibebani (P) melentur dan tegangan yang terjadi pada penampang balok bersifat elastis dimana serat terluar lebih kecil dari tegangan leleh :

$$T = C = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \left[ \frac{d}{2} \right] b \quad (3.69)$$

karena jarak pusat gaya tarik ke pusat gaya desak  $\frac{2}{3}d$  sehingga momen internal dalam keadaan penampang masih elastis

$$M = C \cdot \frac{2}{3} \cdot d \quad (3.70)$$

substitusi Persamaan 3.69 kedalam Persamaan 3.70 menjadi Persamaan 3.71 :

$$M = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \left( \frac{d}{2} \right) b \cdot \left( \frac{2}{3} d \right)$$

$$M = f \cdot \left( \frac{1}{6} \cdot b \cdot d^2 \right) = f \cdot Sx_{profil} \quad (3.71)$$

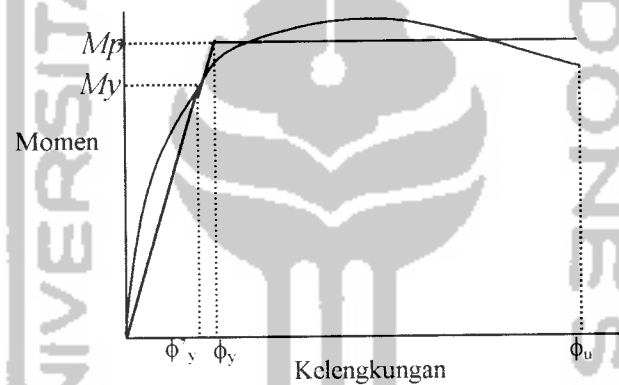
dari persamaan 3.71 maka regangan ( $\varepsilon$ ) yang pada penampang dapat diketahui, jika  $f = (\sigma)$  maka Persamaan 3.72 adalah

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.72)$$

dari Persamaan 3.72 kelengkungan teoritis dapat diketahui

$$\phi = \frac{\varepsilon}{h/2} \quad (3.73)$$

Hubungan Momen ( $M$ ) dengan kelengkungan ( $\Phi$ ) ditunjukkan pada **Gambar 3.23**



**Gambar 3.19** Grafik momen kelengkungan

**Gambar 3.19** menurut Paulay dan Priestley, 1992 memperlihatkan ketika momen lentur diperbesar hingga melampaui harga beban kerja sudut regangan  $\phi$  akan elastis seluruhnya ( $M_y$ ) 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 dikontinuitas anguler  $\phi_u$  ditengah bentang.

### 3.10. Daktilitas

Paulay dan Priestley M.J.N, 1992 daktilitas suatu bahan dapat didefinisikan sebagai banyaknya regangan permanen (*permanent strain*). Daktilitas mengizinkan 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 perubahan yang mendadak pada bentuk batang.

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 :

$$Daktilitas = \frac{\epsilon_{tot}}{\epsilon_y} \quad (3.74)$$

dengan :

$\epsilon_{tot}$  = regangan total

$\epsilon_y$  = regangan pada saat leleh pertama

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

$$\mu_{simpangan} = \frac{\Delta_{tot}}{\Delta_y} \quad (3.75)$$

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 :

$$\mu_{kelengkungan} = \frac{\Phi_{tot}}{\Phi_y} \quad (3.76)$$

dengan :

$\mu_{kelengkungan}$  = daktilitas kelengkungan

$\Phi_{tot}$  = kelengkungan total

$\Phi_y$  = kelengkungan pada momen maksimum

### 3.11. 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