

BAB III

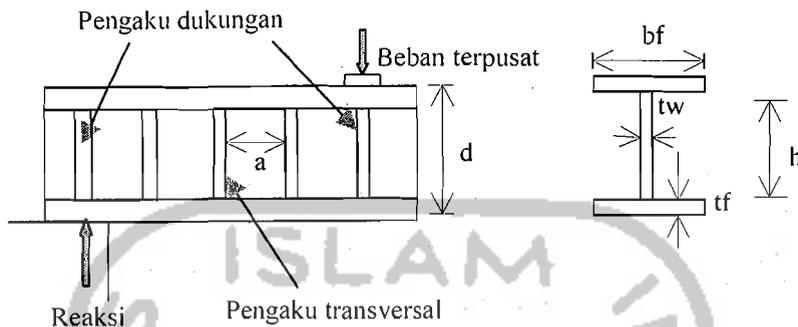
LANDASAN TEORI

3.1 Gelagar Pelat

Menurut Salmon dan Johnson, 1996, gelagar pelat mempunyai bentuk yang mirip dengan profil I yang bukan bentukan hanya saja perilaku pada gelagar pelat sangat berbeda dengan profil I yang bukan bentukan. Sebagian besar profil I termasuk penampang kompak karena memenuhi persyaratan $\frac{b}{2t_f} \leq \frac{65}{\sqrt{F_y(ksi)}}$ atau $\frac{b}{2t_f} \leq \frac{171}{\sqrt{F_y(Mpa)}}$. Sedangkan pada gelagar pelat mempunyai badan yang sangat tipis sehingga menyebabkan profil tersebut tidak kompak. Karena tidak kompak inilah maka instabilitas menjadi persoalan yang utama pada gelagar pelat.

Bila perencana bebas untuk mencapai pemikulan beban yang paling efisien, maka jelaslah bahwa untuk momen lentur hampir seluruhnya dipikul oleh sayap, penampang yang tinggi lebih disukai. Badan diperlukan agar sayap-sayap bekerja sebagai satu kesatuan dan untuk memikul gaya geser, tetapi tebal badan yang berlebihan menambah berat gelagar. Bila ditinjau dari sudut bahan, badan yang tipis dengan pengaku akan menghasilkan gelagar yang paling ringan. Dengan demikian instabilitas pelat badan yang tipis menjadi masalah utama (Salmon dan Johnson, 1986).

Secara umum elemen-elemen gelagar pelat dapat digambarkan sebagai berikut (Bowles,1985).



Gambar 3.1 Komponen tipikal gelagar pelat (Bowles, 1985)

dari gambar tersebut menerangkan bahwa bf = lebar sayap, tf = tebal sayap, tw = tebal badan, h = tinggi badan, d = tinggi gelagar, a = jarak antar pengaku.

Ada tiga elemen dasar gelagar pelat antara lain :

1. Badan

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

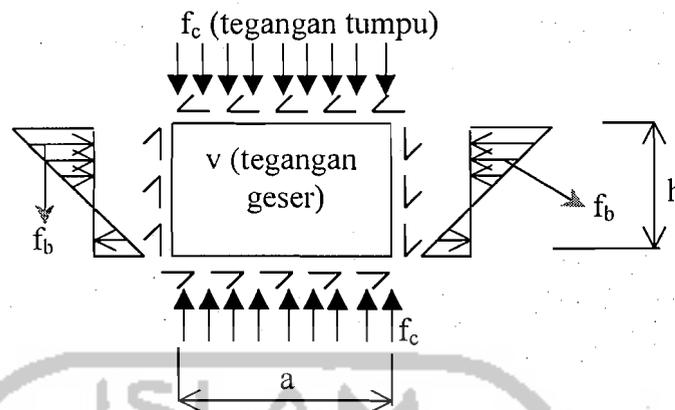
Pelat baja ini terdiri dari dua bagian yang diletakkan pada posisi memanjang horisontal, yang dibaut pada bagian atas dan bagian bawah badan (Salmon dan Johson,1996)

3. Pengaku

Pengaku umumnya dipergunakan bila pelat badan sangat tipis, rasio h/tw besar dan tegangan geser badan relatif tinggi. Pengaku secara efektif akan menambah kapasitas geser terhadap tekukan geser badan. Pengaku hampir selalu dipergunakan oleh spesifikasi dibawah beban yang terkonsentrasi dan pada reaksi gelagar pelat (Boeles, 1985).

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).

Pada Gambar 3.1, dengan a sebagai jarak antara pengaku-pengaku antara dan h sebagai tinggi bersih antara tumpuan-tumpuan pelat memanjang (yakni antara sayap-sayap, sayap dan pengaku memanjang/longitudinal, atau antara pengku-pengaku memanjang). Secara umum segmen plat ini memikul tegangan geser v sepanjang tepinya, tegangan formal f_b dengan variasi linier sepanjang tinggi h , dan tegangan tekan f_c akibat beban yang bertumpu langsung pada gelagar sepanjang jarak a .



Gambar 3.2 Tegangan pada pelat badan (Salmon dan Johnson, 1986)

Gambar 3.2 menunjukkan pelat badan dibebani oleh geser (v), lentur (f_b) dan tekanan merata (f_c).

3.1.1 Tekuk Akibat Geser

1. Tekuk Elastis Akibat Geser Murni

Menurut **Salmon dan Johnson, 1986**, tegangan tekuk elastis untuk satu pelat ditentukan oleh Persamaan 3.1 sebagai

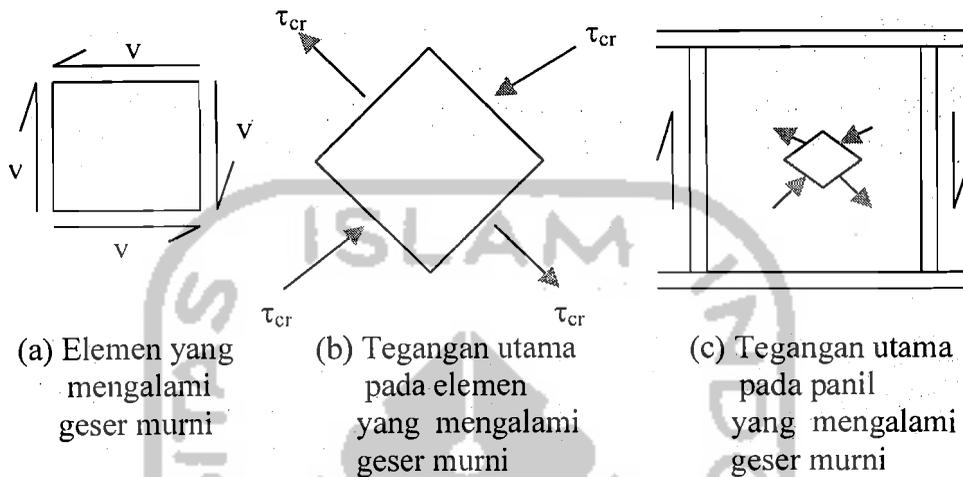
$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (3.1)$$

Untuk kasus geser murni lihat Gambar 3.3 Persamaan 3.1 bisa dituliskan sebagai (dengan mengganti F dengan τ untuk tegangan geser)

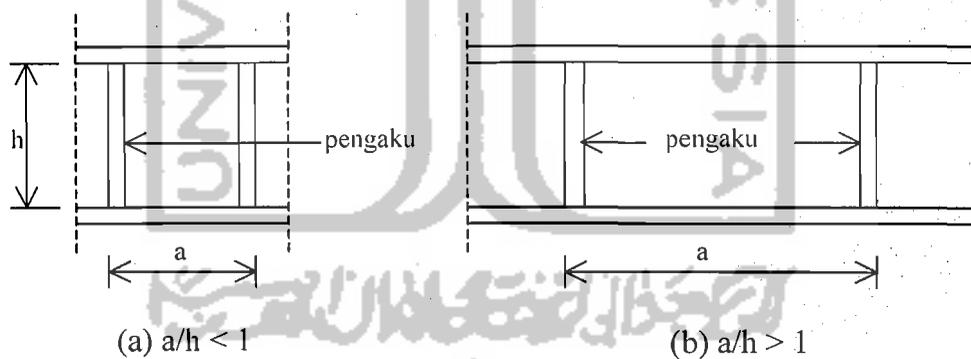
$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left(\frac{\text{sisipendek}}{t} \right)^2} \quad (3.2)$$

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

$$k = 5,34 + 4,0 \left(\frac{\text{sisipendek}}{\text{sisipanjang}} \right)^2 \quad (3.3)$$



Gambar 3.3 Teori geser klasik (Salmon dan Johnson, 1986)



Gambar 3.4 Dua keadaan dari jarak pengaku antara (Salmon dan Johnson, 1986)

Untuk perencanaan, Persamaan 3.2 dan 3.3 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 3.4a), maka Persamaan 3.2 menjadi :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E [5,34 + 4,0(a/h)^2] (h/a)^2}{12(1 - \mu^2)(a/t)^2 (h/a)^2} \quad (3.4)$$

b. Jika $a/h \geq 1$ (lihat Gambar 3.4b), maka Persamaan 3.2 menjadi :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E [5,34 + 4,0(h/a)^2]}{12(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad (3.5)$$

Jelaslah dari Persamaan 3.4 dan 3.5 bahwa jika kita hendak memakai h/t sebagai rasio stabilitas pada penyebut, maka dua persamaan untuk k diperlukan. Untuk semua harga a/h , Persamaan 3.4 dan 3.5 bisa dituliskan sebagai :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 Ek}{12(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad (3.6)$$

dengan :

$$k = 4,0 + 5,34/(a/h)^2, \text{ untuk } a/h \leq 1 \quad (3.7)$$

$$k = 4,0/(a/h)^2 + 5,34, \text{ untuk } a/h \geq 1 \quad (3.8)$$

tampak pada Persamaan 3.7 dan 3.8 bila a/h semakin kecil maka nilai k akan semakin besar.

Dalam AISC-1.10.5, Persamaan 3.6 ditulis dalam bentuk tanpa dimensi, dengan mendefinisikan koefisien C_v sebagai rasio tegangan geser kritis terhadap tegangan leleh geser,

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 Ek}{\tau_y (12)(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad (3.9)$$

tampak bahwa C_v merupakan stabilitas elastis.

Substitusi nilai $E = 200000 \text{ MPa}$, $\mu = 0,3$, $\tau_y = 0,6 F_{yw}$ ke Persamaan 3.9 menjadi :

$$C_v = \frac{303000k}{(h/t)^2 F_{yw} (\text{Mpa})} \quad (3.10)$$

Nilai C_v dipengaruhi oleh nilai k . dan h/t diketahui 200 mm dengan $F_y = 240 \text{ Mpa}$ dan nilai $C_v = 1$ maka dengan menggunakan Persamaan 3.10 akan diperoleh nilai $k = 31,683$ dan disubstitusikan pada Persamaan 3.7 maka akan diperoleh nilai $(a/h) = 0,193$.

2. Tekuk Inelastis Akibat Geser Murni

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

$$\tau_{cr} = \sqrt{\tau_{\text{batas proporsional}} \tau_{cr(\text{elastikideal})}} \quad (3.11)$$

Batas proporsional diambil sebagai $0,8\tau_y$, yang lebih besar daripada untuk tekan dalam flens, karena efek tegangan sisa lebih sedikit. Pembagian Persamaan 3.11 dengan τ_y untuk mendapatkan C_v dan tegangan menggunakan Persamaan 3.10 memberikan

$$C_v = \frac{491}{h/t_w} \sqrt{\frac{k}{F_{yw}}} \quad (3.12)$$

3. Kekutan Geser

a. Geser Nominal

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

$$V_n = \tau_{cr} A_w \quad (3.13)$$

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

$$V_n = C_v \tau_y A_w \quad (3.14)$$

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

$$V_n = (0.6F_y) A_w \quad (3.15)$$

b. Kekutan Geser dalam Rentang Beban Layanan

$$\left(\frac{V_n}{\gamma / \phi} = \frac{V_n}{FS} \right) \geq V \quad (3.16)$$

dimana : γ / ϕ = faktor-faktor kelebihan beban dibagi oleh faktor resistansi

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

V = geser beban layanan

Untuk tegangan geser diuliskan sebagai berikut

$$\left(f_v = \frac{V}{A_w} \right) \leq \left(F_v = \frac{V_n}{(FS)A_w} \right) \quad (3.17)$$

dimana tegangan ijin F_v dapat diperoleh dengan menempatkan Persamaan 3.14

kedalam Persamaan 3.17 dan $\tau_y = F_y / \sqrt{3}$ 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

$$F_v = \frac{C_v \tau_y A_w}{(FS)A_w} = \frac{C_v \tau_y}{FS} \quad (3.18)$$

dimana untuk tekuk elastik $C_v \leq 0.8$

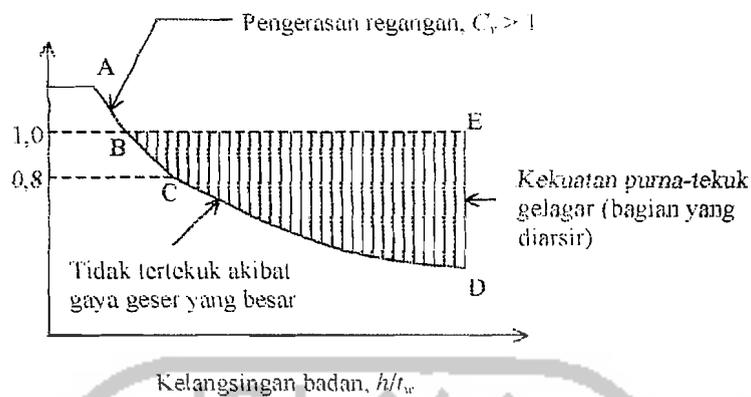
$$C_v = \frac{310000k}{F_{yw} \left(\frac{h}{t}\right)^2} \quad (3.19)$$

dan untuk tekuk tak elastik $C_v > 0.8$

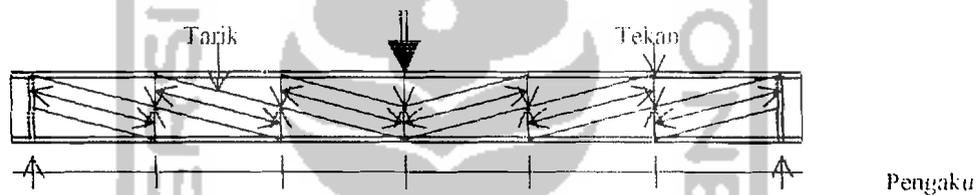
$$C_v = \frac{500}{\left(\frac{h}{t}\right)} \sqrt{\frac{k}{F_{yw}}} \quad (3.20)$$

c. Kekuatan Geser Nominal Termasuk Aksi Medan Tarik

Kekuatan tekuk elastik dan tak elastik pada badan gelagar yang terkena geser diwakili oleh Gambar 3.5. Tampak pada Gambar 3.5 suatu pelat yang diperkaku oleh sayap dan pengaku transversal memiliki kekuatan pasca tekuk yang cukup besar sebab gaya-gaya tarik akan dipikul oleh pengaku transversal. Pemasukan aksi rangka batang memperbesar kekuatan geser dari kekuatan berdasarkan tekuk (ABCD pada Gambar 3.5) hingga mendekati kondisi yang sejalan dengan leleh dalam teori balok klasik (ABE dalam Gambar 3.5).



Gambar 3.5 Kapasitas geser yang tersedia dengan memperhitungkan kekuatan pasca tekuk (Salmon dan Johnson, 1992)



Gambar 3.6 Aksi medan tarik (Salmon dan Johnson, 1986)

Kekuatan geser nominal V_n dapat dinyatakan sebagai jumlah dari kekuatan tekuk V_{cr} dan kekuatan pasca tekuk V_{tr} dari aksi tarik lapangan,

$$V_n = V_{cr} + V_{tr} \quad (3.21)$$

Kekuatan tekuk nomil diberikan pada Persamaan 3.14 dengan $V_n = V_{cr}$ dimana $C_v = \tau_{cr}/\tau_y$ dan diberikan oleh Persamaan 3.10 dan 3.12 masing-masing untuk tekuk elastik dan tidak elastik.

Kekuatan geser V_{tr} berasal dari aksi medan tarik dalam badan gelagar menimbulkan suatu pita gaya-gaya tarik yang terjadi setelah badan itu

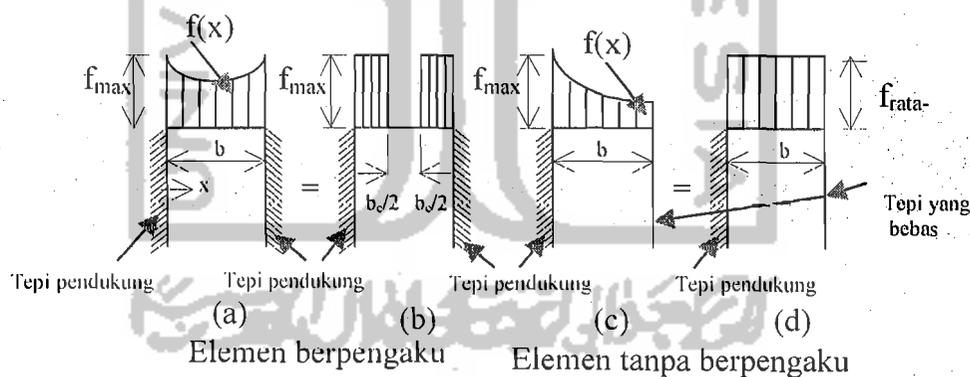
mengalami tekuk akibat tekan diagonal. Keseimbangan gaya dipertahankan melalui transfer gaya ke pengaku vertikal.

Kekuatan geser V_{ff} dinyatakan dalam Persamaan berikut ini

$$V_{ff} = \sigma_c \frac{h_{tw}}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \quad (3.22)$$

4. Kekuatan Pasca Tekuk Pada Elemen Pelat

Menurut Salmon dan Johnson, 1992, elemen pelat dalam tekan baik dengan pengaku maupun tanpa pengaku masih memiliki kekuatan setelah terjadinya tekuk yakni kekuatan pasca tekuk. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Elemen-elemen pelat dibawah tekanan aksial, memperhatikan distribusi regangan dan sistem ekifalen (Salmon dan Johnson 1992)

Dari Gambar 3.7a jelaslah bahwa kekuatan nominal P_n dari sebuah elemen pengaku dapat diwujudkan sebagai:

$$P_n = t \int_0^b f(x) dx \quad (3.23)$$

yang melibatkan integrasi fungsi distribusi tegangan tak merata; atau alternatifnya, konsep lebar efektif (Gambar 3.7b) dan dapat pula digunakan :

$$P_n = t b_E f_{\text{maks}} A_{\text{eff}} f_{\text{maks}} \text{ (elemen pengaku)} \quad (3.24)$$

di mana b_E = Lebar efektif di mana tegangan maksimum dapat dianggap merata yang dapat memberikan kapasitas total yang tepat.

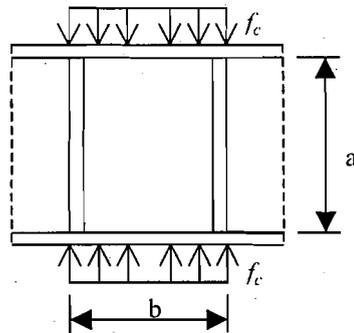
Gambar 3.7c menunjukkan bahwa Persamaan 3.24 sama validnya untuk elemen tanpa pengaku keculai bila distribusi regangan tidak simetrik terhadap pusat elemennya. Bila digunakan tegangan reduksi rata-rata $f_{\text{rata-rata}} < f_{\text{maks}}$, kapasitas elemen tanpa pengaku dapat ditulis sebagai (Gambar 3.7d) :

$$P_n = t b f_{\text{rata-rata}} = A_{\text{bruto}} f_{\text{rata-rata}} \text{ (tanpa elemen pengaku)} \quad (3.25)$$

3.1.2 Tekuk Akibat Tekanan Merata

1. Tekuk Elastis Akibat Tekanan Merata

Beban transversal yang berat pada gelagar pelat biasanya dipikul oleh pengaku tumpuan (bearing stiffener) sehingga tegangan tekan f_c (seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2) umumnya kecil. Namun bila badan terbuat dari pelat yang tipis, beban merata sekalipun yang menimbulkan tegangan tekan yang cukup besar sehingga badan tertekuk secara vertikal.



Gambar 3.8 Pelat dengan Tekanan Merata (Salmon dan Johson, 1986)

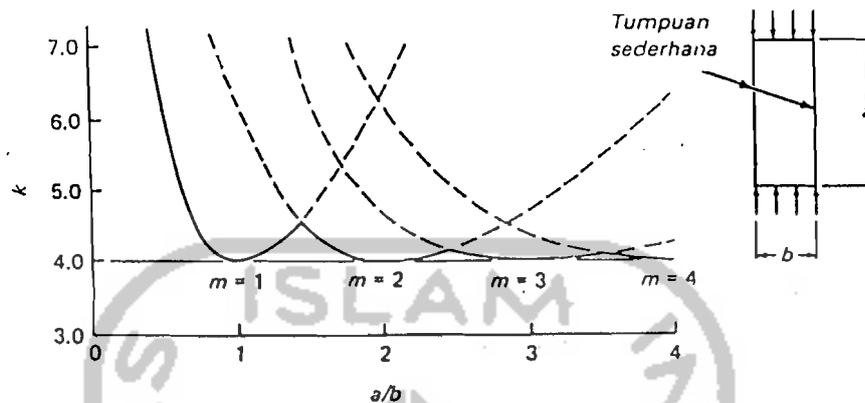
Tampak dalam Gambar 3.8 yaitu pelat dengan tekanan merata. Jarak antar pengaku adalah b (yaitu daerah yang bebannya bisa dianggap terbagi rata) dan tinggi badan tanpa sokongan adalah a pada gelagar pelat. sehingga tegangan yang terjadi adalah

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.26)$$

dengan

$$k = \left[\frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \quad (3.27)$$

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 banyaknya pengaruh gelombang yang terjadi dalam arah x pada saat tekuk. Pada Gambar 3.9 menunjukkan bahwa harga minimum untuk jumlah pengaruh gelombang tertentu, yakni kondisi lemah ini terjadi pada saat sepanjang pelat kelipatan bulat dari lebarnya, dan bahwa kelipatan ini sama dengan banyaknya separuh gelombang .



Gambar 3.9 Koefisien tekuk untuk pelat yang mendapat tekanan merata-tepi longitudinal bertumpuan sederhana (Salmon dan Johnson,1992)

Menurut Salmon dan Johnson,1992 dengan $a/b = m$ akan diperoleh $k = 4$. Selanjutnya bila m bertambah besar, persamaan k menjadi makin datar dan mendekati harga konstan 4 untuk rasio a/b yang besar. Hal ini memberikan persamaan tegangan tekuk elastik elemen pelat yang mengalami tekanan merata sepanjang dua tepi yang bertumpuan sederhana di sepanjang dua tepi yang sejajar beban :

$$F_{cr} = \frac{4\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.28)$$

2. Kekuatan Pelat Yang Memikul Tekanan Tepi Merata

Salmon dan Johnson,1992 menyatakan bahwa bila 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 itu.

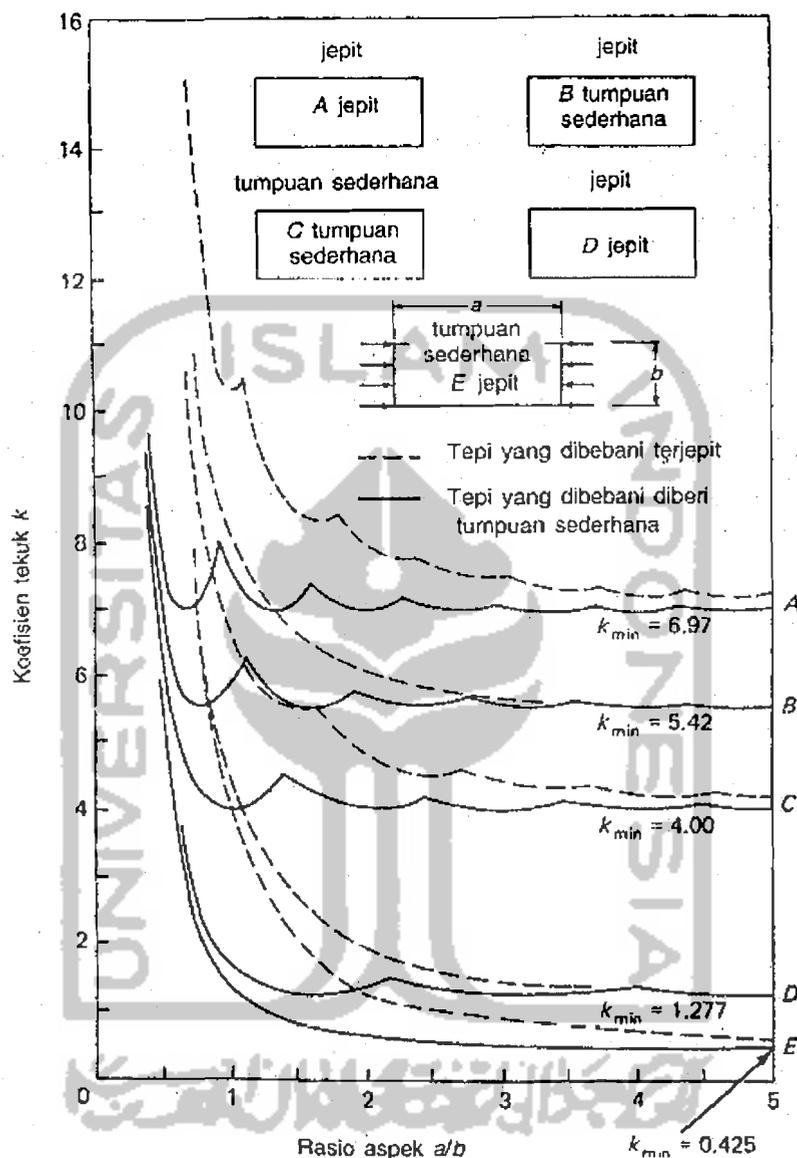
Menurut **Salmon dan Johnson, 1992** tekuk lokal dipengaruhi oleh nilai b/t bila nilai b/t rendah, pengerasan regangan dapat tercapai tanpa menalami tekuk; sedang untuk harga b/t menengah, tegangan sisa dan ketidak sempurnan menyebabkan tekuk tak elastik atau masa transisi; dan untuk b/t besar maka akan melampaui kekuatan tekuk yakni pelat itu akan menunjukkan terjadinya kekuatan pasca tekuk.

Persyaratan untuk mencapai tegangan leleh tanpa tekuk lokal adalah :

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \geq F_y \quad (3.29)$$

dengan k adalah konstanta tekuk merupakan fungsi distribusi tegangan dan kondisi di tepi pelat.

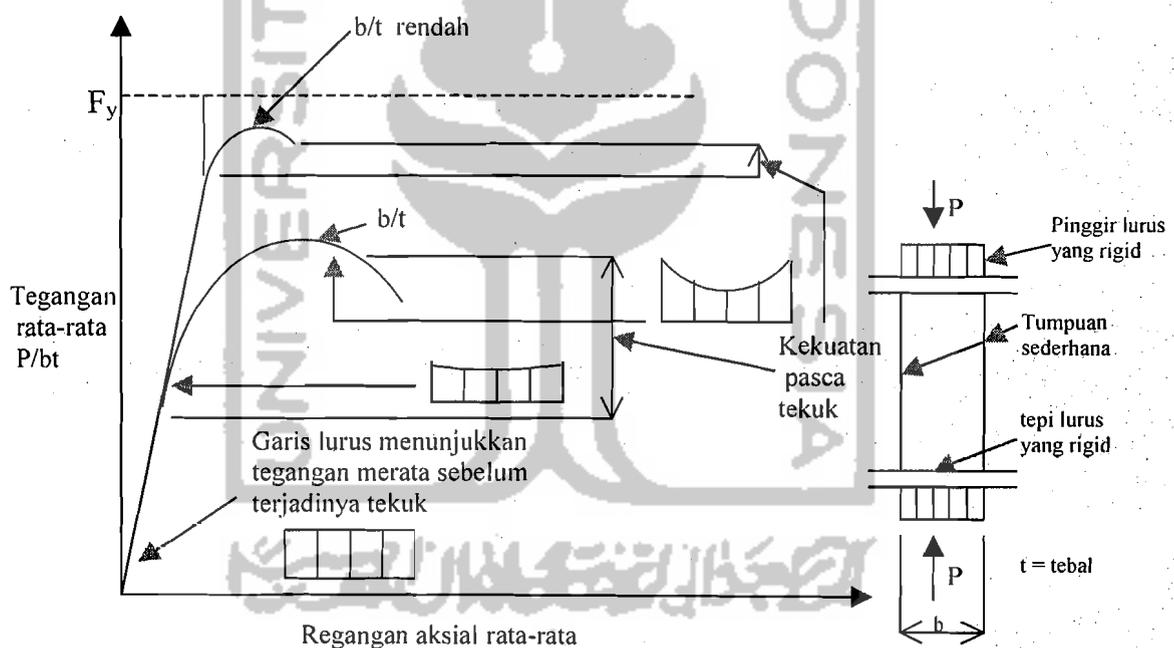
Nilai k dipengaruhi oleh rasio a/b dan kondisi dari tepi-tepi pelat dimana semakin besar nilai a/b maka nilai k akan mendekati konstan. Tampak bila (b/t) kecil nilai k mendekati 0.425 untuk pelat yang tidak diperkuat, dalam hal ini nilai tersebut dimiliki oleh sayap dan nilai k untuk pelat yang diperkuat adalah 4, dalam hal ini dimiliki oleh badan. Dengan demikian tampak bahwa nilai k untuk pelat yang diperkuat naik sepuluh kali lipat dari nilai k untuk pelat yang tidak diperkuat. Nilai k ini dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada pelat segi empat datar (Salmon dan Johson, 1996)

Kekuatan pelat aktual dalam tekan tergantung pada banyak faktor yang sama seperti yang mempengaruhi kekuatan kolom secara keseluruhan, khususnya tegangan sisa pada Gambar 3.10 menunjukkan perilaku tipikal pelat tekan yang

dibebani sampai beban ultimitnya dengan mengasumsikan bahwa material bersifat elastik-plastik ideal dan tidak mengandung tegangan sisa, distribusi tegangan akan tetap merata sampai tegangan tekuk elastik F_{cr} tercapai. Peningkatan beban lebih lanjut dapat dilakukan, namun bagian pelat yang paling jauh dari sisi tumpuannya akan melendut keluar dari bidang asalnya. Defleksi keluar dari bidang ini akan menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak merata meskipun beban dikenakan melalui ujung-ujung rigid dan lurus sempurna.



Gambar 3.11 Perilaku Pelat Akibat Tekanan Tepi (Salmon dan Johson, 1986)

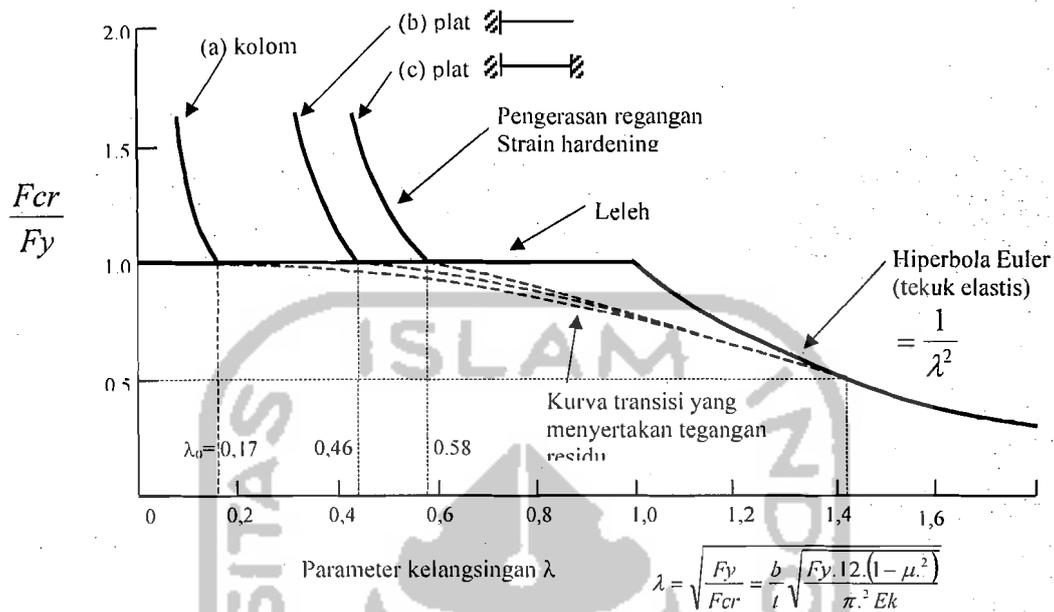
Gambar 3.11 menunjukkan bahwa kekuatan pelat yang menerima tekanan tepi terdiri dari jumlah kedua komponen (1) tegangan tekuk elastik atau tak elastik yang diwakili oleh Persamaan 3.29 dan (2) kekuatan pasca tekuk. Harus

diperhatikan pula bahwa kukutan pasca tekuk akan terjadi lebih tinggi pada saat rasio b/t bertambah besar. Untuk harga b/t yang rendah bukan hanya kekutan pasca tekuk yang akan hilang, melainkan keseluruhan pelat pun telah meleleh dan mencapai kondisi pengerasan regangan (*strain hardening*, sehingga F_{cr}/F_y akan menjadi lebih besar dari satu.

Bila F_{cr}/F_y didefinisikan sebagai $1/\lambda_c^2$, Persamaan 3.29 untuk pelat menjadi :

$$\lambda_c = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y(12)(1-\mu^2)}{\pi^2 Ek}} \quad (3.30)$$

dengan λ_c adalah parameter kerampingan dan F_y adalah tegangan leleh. E adalah modulus elastisitas, μ adalah rasio poisson dan b/t adalah rasio lebar terhadap tebal pelat. λ_c harus dibatasi agar tidak melampaui λ_0 bila dikendaki tercapainya pengerasan dengan tanpa adanya tekuk pelat. Dari Gambar 3.11 λ_c hendaknya tidak melampaui sekitar 0.46 untuk elemen tekan tanpa pengaku dan 0.58 untuk elemen tekan dengan pengaku.



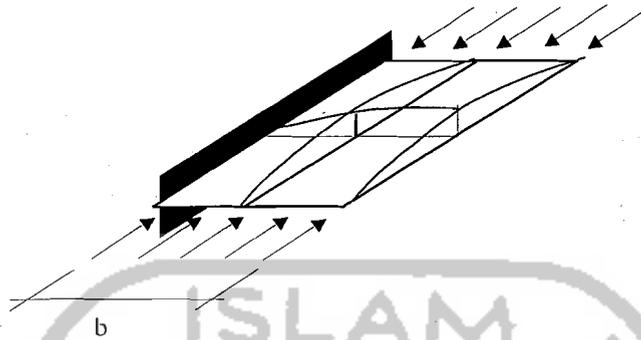
Gambar 3.12. Perbandingan antara tekuk plat dengan tekuk kolom

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

$$\frac{b}{t} \leq 425 \sqrt{\frac{k}{F_y}} \quad (3.31)$$

λ_c harus dibatasi agar tercapai pengerasan regangan tanpa adanya tekuk pelat.

Untuk elemen tanpa pengaku (pelat dengan satu tepinya bebas) seperti ditunjukkan pada Gambar (3.13) harga $\lambda_c = 0,46$.



Gambar 3.13. Defleksi tekuk pelat pada sayap (jepit-bebas).
(Salmon dan Johson, 1992)

Bila harga $\lambda_c = 0,46$ dimasukkan ke dalam Persamaan (3.29), maka

$$(3.32) \quad \frac{b}{t} = \left(\frac{(0,46)^2 \pi^2 2 \cdot 10^5}{12 F_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5}$$

$$\frac{b}{t} = 195,6 \sqrt{\frac{k}{F_y (Mpa)}} \quad (3.33)$$

Mengambil keadaan batas yang sesuai, untuk nilai $k = 0,67$

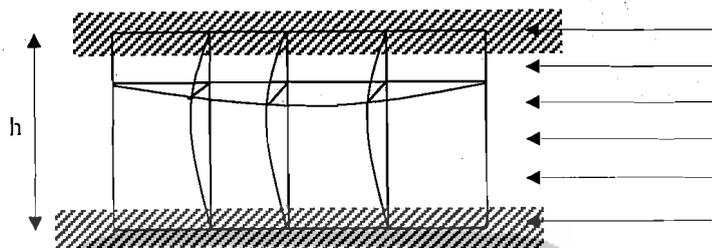
$$\frac{b}{t} = 195,6 \sqrt{\frac{0,67}{F_y (Mpa)}} \quad (3.34)$$

$$\frac{b}{t} = \frac{171}{\sqrt{F_y (Mpa)}} \quad (3.35)$$

Batas rasio b/t pada sayap untuk menghindari tekuk adalah : $\frac{b}{t} \leq \frac{171}{\sqrt{F_y (Mpa)}}$

Untuk pelat dengan kondisi tumpuan tepi jepit-jepit, seperti ditunjukkan pada

Gambar (3.14) harga $\lambda_c = 0,58$



Gambar 3.14. Defleksi tekuk pelat pada Badan (jepit-jepit)
(Salmon dan Johson, 1992)

Bila harga $\lambda_c = 0,58$ dimasukkan ke dalam Persamaan (3.30), maka

$$\frac{b}{t} = \left(\frac{(0,58)^2 \pi^2 2.10^5}{12F_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5} \quad (3.36)$$

$$\frac{b}{t} = 246,5 \sqrt{\frac{k}{F_y (Mpa)}} \quad (3.37)$$

batas rasio h/t pada badan untuk menghindari tekuk adalah: $\frac{h}{t} \leq \frac{500}{\sqrt{F_y (Mpa)}}$

3.1.3 Lentur Pada Bidang Badan

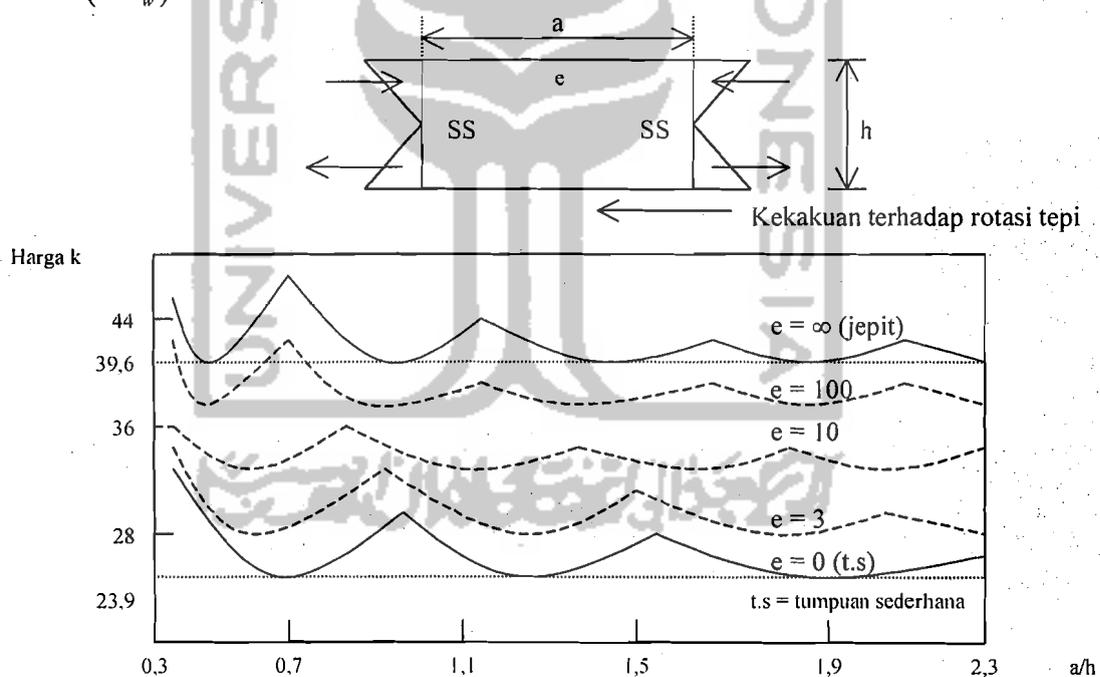
Badan gelagar pelat biasanya memiliki rasio sebesar h/t_w , tekuk mungkin terjadi akibat lentur pada bidang badan. Pada badan gelagar yang langsing dan diberi pengaku setelah terjadinya tekuk elastis masih ada kekutan pasca tekuk serti yang sudah di jelaskan di atas.

Penurunan harga k secara teoritis untuk lentur pada bidang plat dijabarkan oleh **Timoshenko dan Woinowski-Kriger (1959)**. Untuk sembarang jenis pembebanan nilai, k bergantung pada rasio bentuk a/h dan kondisi tumpuan sepanjang tepi. Variasi nilai k terhadap rasio a/h ditunjukkan pada Gambar 3.15.

Tegangan kritis (dengan $E = 200.000 \text{ MPa}$) bisa dikatakan terletak antara :

$$F_{cr} = \frac{4320000}{(h/t_w)^2} \text{ MPa} \text{ untuk } k = 23,9 \text{ (tumpuan sederhana di sayap)} \quad (3.38)$$

$$F_{cr} = \frac{7120000}{(h/t_w)^2} \text{ MPa} \text{ untuk } k = 39,6 \text{ (jepit sempurna di sayap)} \quad (3.39)$$



Gambar 3.15 Koefisien tekuk untuk plat yang mengalami lentur murni

Berdasarkan penelitian **Salmon dan Johnson, 1996**, dengan bahan penelitian baja profil I dengan mutu baja A36, badan akan tertekuk akibat adanya tegangan lentur.

3.2 Tekuk-Puntir Lateral Gelagar Pelat Kantilever

Bowles, 1985 menyatakan bahwa kebanyakan bagian konstruksi adalah kumpulan pelat-pelat datar (*flat plates*). Bila sebuah pelat dipengaruhi langsung oleh desakan, lenturan, atau tegangan geser maka pelat tersebut dapat menekuk secara setempat sebelum seluruh bagian konstruksi mengalami kegagalan.

Meskipun balok memiliki reistansi yang cukup dalam tekuk puntir-lateral dan terhadap tekuk lokal untuk mencapai kekuatan momen plastiknya. Dengan demikian, pencegahan keruntuhan akibat dari bentuk ketidak stabilan tersebut membutuhkan batasan jarak antara titik-titik tumpuan lateral, batas rasio lebar atau tebal sayap tekannya, serta batas rasio keadaan tebal badannya. (Salmon dan Johnson, 1992).

Dalam buku Salmon dan Johnson, 1996 menyatakan joint-venant menunjukkan bahwa bila batang yang tidak berpenampang lingkaran dipuntir maka penampang yang datar sebelum terpuntir menjadi tidak rata setelah terpuntir. Permukaan penampang lintang yang semula datar menjadi permukaan yang tertekuk.

Menurut Salmon dan Johnson, 1996 menyatakan bahwa tekuk torsi lateral pada suatu balok kantilever tidak pernah seberat kondisi suatu segmen yang mendapat pembebanan momen seragam. Karena momen pada ujung bebas dari kantilever adalah nol, gaya tekan pada sayap akan berkurang dari maksimum pada ujung yang satu hingga menjadi nol pada ujung bebas;

sehingga, pembebanannya kurang begitu berat bila dibandingkan jika gaya tekannya bekerja merata pada seluruh panjang bentang.

Sifat konservatif untuk menggunakan panjang-penuh sebagai panjang tak-berpenopang lateral efektif untuk tekuk torsi lateral balok-balok kantilever. Akan tetapi sifat kekonservatifan penggunaan panjang aktual untuk suatu balok kantilever sangat bergantung pada adanya *kekangan torsi jepit (fixed torsional restraint)* pada ujung penumpu, serta adanya pembebanan yang bekerja pada pusat geser atau pada flens bawah. Karena penjepitan semacam itu jarang terjadi sehingga disarankan untuk menggunakan panjang kantilever aktual sebagai panjang tak berpenopang lateral efektif.

3.2.1 Tekuk Puntir Lateral Elastis

Menurut Salmon dan Johnson, 1996 dengan memperhatikan balok dalam suatu posisi tertekuk terlihat bahwa momen yang bekerja M_0 pada bidang yz akan meningkatkan komponen momen Mx' , My' , Mz' , masing-masing menurut sumbu x' , y' , dan z' . Ini berarti terdapat kurfatur lentur baik pada bidang xz' maupun yz' serta kurvatur puntir menurut sumbu z' . Dengan asumsi deformasi kecil, lentur pada bidang yz' (dengan memperhitungkan kosinus arahnya adalah 1 antara sumbu-sumbu y' dan y' , dan z' dan z') dapat ditulis :

$$EI_x \frac{d^2 u}{dz^2} = M_{x'} = M_0 \quad (3.40)$$

di mana v adalah displesmen sentroid pada arah y (lihat Gambar 3.17).

Demikian pula, kurvatur pada bidang xz' adalah :

$$EI_y \frac{d^2 u}{dz^2} = M_{y'} = M_{0\phi} \quad (3.41)$$

seperti terlihat dari Gambar 3.16 dimana u merupakan pergeseran sentroid pada arah x , dengan persamaan diferensial sebagai berikut :

$$M_{z'} = GJ \frac{d\phi}{dz} - EC_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (3.42)$$

Dari Gambar 3.17 dan kosinus arahnya, komponen puntir dari M_0 ketika balok tersebut sedikit tertekuk adalah sebanding dengan putaran sudut balok dalam bidang xz :

$$M_{z'} = -\frac{d u}{dz} M_0 \quad (3.43)$$

yang untuk persamaan diferensial puntir memberikan :

$$-\frac{d u}{dz} M_0 = GJ \frac{d\phi}{dz} - EC_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (3.44)$$

Dua asumsi melekat dalam persamaan 3.40 dan 3.41 yang kedua-duanya berkaitan dengan asumsi deformasi kecil. Diasumsikan bahwa sifat-sifat $I_{x'}$ dan $I_{y'}$, masing masing sama dengan I_x dan I_y ; dan juga bahwa I_x adalah besar bila dibandingkan dengan I_y , sehingga Persamaan 3.40 tidak terkait dengan Persamaan 3.41 dan 3.44 Maka displesmen v dalam bidang lentur tidak dipengaruhi fungsi puntir ϕ .

Bila Persamaan 3.44 didiferensiasi terhadap z akan diperoleh :

$$-\frac{d^2 u}{dz^2} M_o = GJ \frac{d^2 \phi}{dz^2} - EC_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} \tag{3.45}$$

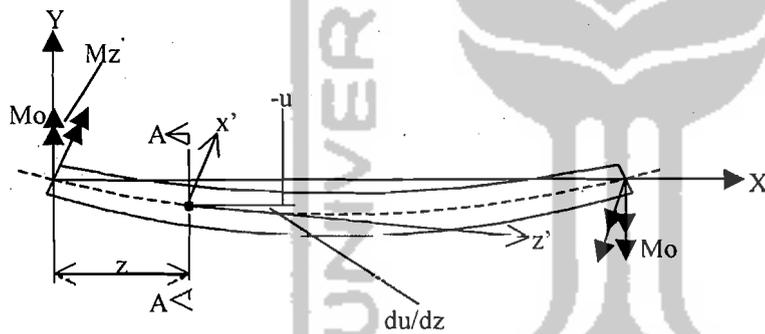
dari Persamaan 3.41

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{M_o \phi}{EI_y}$$

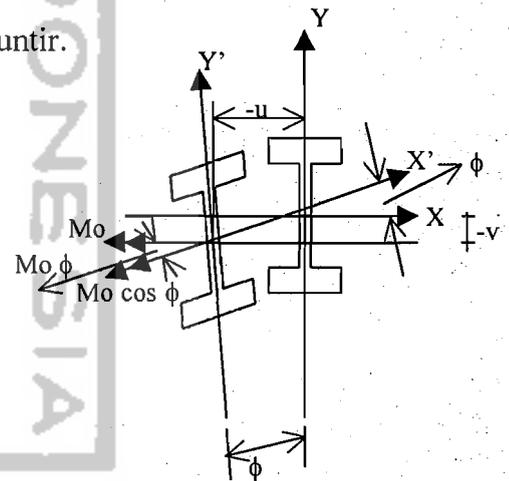
yang bila disubstitusikan kedalam Persamaan 3.45

$$EC_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \frac{M_o^2 \phi}{EI_y} = 0 \tag{3.46}$$

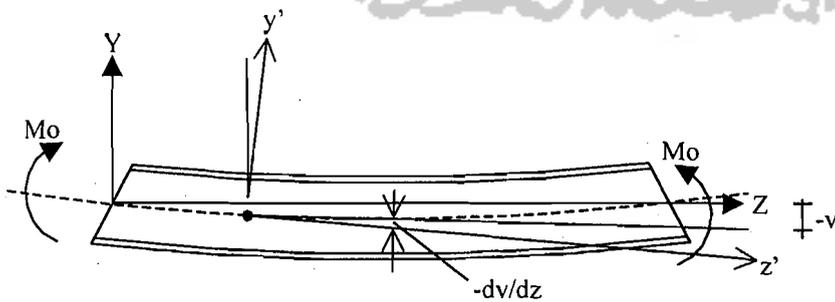
yang merupakan persamaan diferensial untuk sudut puntir.



(a) Tampak Atas



(c) Pot. A-A



(b) Tampak Samping

Kosinus Arah

	X	Y	Z
X'	1	ϕ	$-\frac{du}{dz}$
Y'	$-\phi$	1	$-\frac{dv}{dz}$
Z'	$\frac{du}{dz}$	$\frac{dv}{dz}$	1

Gambar 3.17 Balok profil I dalam posisi sedikit tertekuk (Englekirk,1993)

dan setelah melalui beberapa proses penurunan rumus yang dikemukakan oleh

Charles G. Salmon, John E. Johnson, 1996, maka :

Penyelesaian untuk $M_0 = M_{cr}$ memberikan :

$$M_{cr}^2 = E^2 C_w I_y \left[\left(\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{GJ}{2EC_w} \right)^2 - \left(\frac{GJ}{2EC_w} \right)^2 \right] \quad (3.47)$$

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^4 E^2 C_w I_y}{L^4} + \frac{\pi^2 E I_y GJ}{L^2}} \quad (3.48)$$

Pemfaktoran π/L dari dalam tanda akar memberikan :

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L} \right)^2 C_w I_y + E I_y GJ} \quad (3.49)$$

Untuk menyesuaikan dengan gradien momen dapat dikalikan dengan suatu faktor C_b , dengan demikian secara umum rumus M_{cr} dapat ditulis sebagai berikut :

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L} \right)^2 C_w I_y + E I_y GJ} \quad (3.50)$$

dimana :

C_b = Gradien momen yang nilainya antara 1.0 – 2.3 yang mempertimbangkan gradien momen diseluruh bentang dan berkurangnya kecenderungan tekuk lateral, ini dapat di lihat dalam tabel AISC Hal 1.5.14.5

atau dapat dirumuskan $C_b = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0.3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2.3$

L = Jarak antar penopang lateral, E = Modulus Elastisitas, C_w = Konstanta kelengkungan = $I_y h^2/4$, I_y = Momen inersia terhadap sumbu Y = $A r^2$, G =

Modulus Elastisitas geser = $\frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{E}{2.6}$, J = Konstanta torsi =

$$\frac{t_f^2}{3} \left[2b_f t_f + d_w t_w \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^2 \right]$$

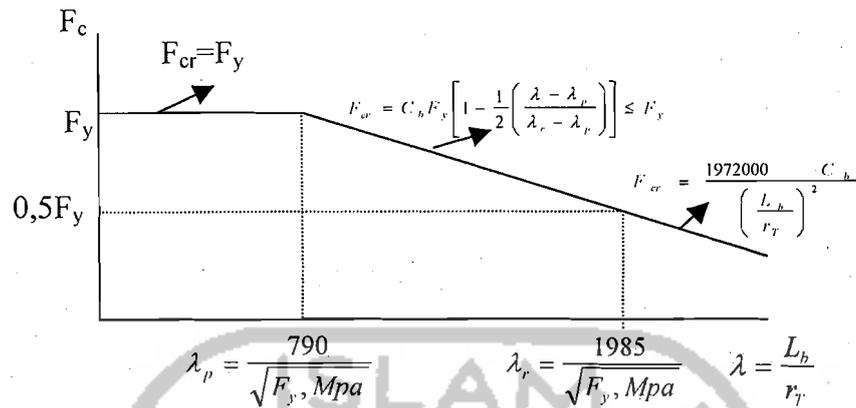
dimana t_f = tebal flens, b_f = lebar flens, t_w = tebal pelat badan, dan d_w = kedalaman badan.

Menurut **Salmon dan Johnson, 1996**, gradien momen (C_b) untuk kantilever adalah 1.0 dan **Trahair dan Bradford, 1988** menyatakan rumus momen kritis menjadi berubah karena L sebagai pembagi dikalikan dua dan rumus C_b tidak berlaku pada kantilever, dengan demikian C_b harus diambil satu kesatuan. Sebenarnya gradien momen mempunyai beberapa efek. Akan tetapi suatu kantilever pasti memiliki momen yang bervariasi dari maksimum pada tumpuan hingga nol pada ujung bebas, sehingga M_{cr} dinyatakan sebagai berikut :

$$M_{cr} = \frac{\pi \sqrt{(EI_y GJ)}}{2L} \sqrt{\left(1 + \frac{\pi^2 EC_w}{4GJL} \right)} \quad (3.51)$$

Dari berbagai penjelasan diatas maka dapat disimpulkan bahwa variasi L dapat sangat mempengaruhi harga M_{cr} , jika harga L semakin besar maka tentu saja M_{cr} akan semakin kecil begitu pula sebaliknya.

3.2.2 Tekuk Puntir-Lateral Tak-Elastik ($M_p > M_n \geq M_r$)



Gambar 3.18 Keadaan batas tekuk puntir lateral (Salmon dan Johnson, 1992)

Untuk tekuk lokal $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{171}{\sqrt{F_y (\text{MPa})}} \quad (3.52)$$

$$\lambda_p = \frac{171}{\sqrt{F_y (\text{MPa})}} \quad (3.53)$$

$$\lambda_r = \frac{390}{\sqrt{F_y (\text{MPa})}} \quad (3.54)$$

Untuk tekuk puntir lateral $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$

$$\lambda_p = \frac{790}{\sqrt{F_y (\text{MPa})}} \quad (3.55)$$

$$\lambda_r = \frac{1985}{\sqrt{F_y (\text{MPa})}} \quad (3.56)$$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_T} \quad (3.57)$$

dimana r_t adalah :

$$r_t = \sqrt{\frac{\frac{1}{12} t_f b_f^3}{t_f b_f + \frac{1}{6} t_w (d - 2t_f)}} \quad (3.58)$$

Tegangan kritis untuk kasus ini adalah :

$$F_{cr} = C_b F_y \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \quad (3.59)$$

Nilai koefisien C_b dihitung dengan Persamaan 3.60 :

$$C_b = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0.3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2.3 \quad (3.60)$$

3.3 Perencanaan Pengaku

Pengaku umumnya diperlukan bila pelat badan sangat tipis, perbandingan h/t_w besar dan tegangan geser badan relatif tinggi. Pengaku secara efektif akan menambah kapasitas geser terhadap tekukan geser badan. Pengaku hampir selalu diperlukan oleh spesifikasi dibawah beban yang terkonsentrasi dan pada reaksi gelagar pelat (Bowles, 1985).

Bila kekuatan geser gelagar pelat tergantung pada keikutsertaan medan tarik maka untuk mencapai kesetimbangan diperlukan pengaku pada badan gelagar hingga sayap untuk memperkaku gelagar dan diketahui bahwa suatu pelat yang diperkaku oleh sayap dan pengaku transversal memiliki kekuatan pasca tekuk yang cukup besar.

3.3.1 Pengaku Dukung/Landasan

Pengaku dukungan diperlukan secara berpasangan dan diletakan diatas reaksi-reaksi. Pengaku dukungan juga diperlukan dibawah beban terkonsentrasi yang diangkat 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

$$\frac{KL}{r} = 0.75 \frac{h}{r} \quad (3.61)$$

dengan h = kedalaman pelat badan

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

luas efektif Ae yang dihitung dengan menggunakan kekuatan kolom Pn.

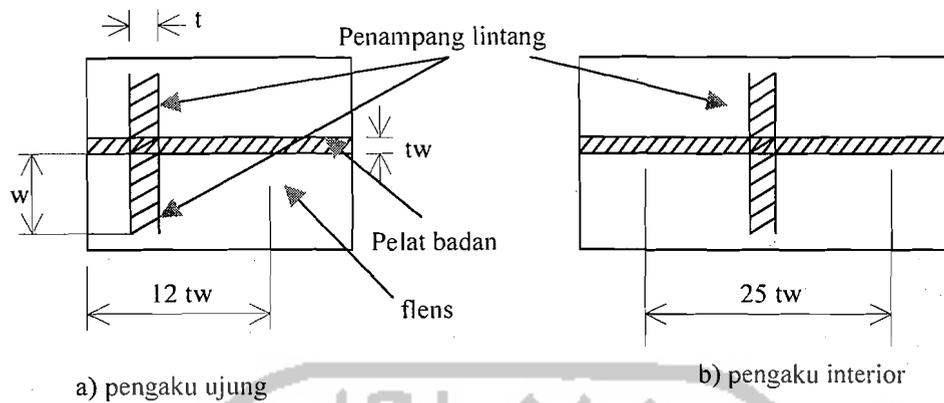
Persyaratan menurut LRFD adalah

$$\phi_c P_n \geq P_u \quad (3.62)$$

dengan ϕ = 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

$$A_{e\text{perlu}} = \frac{P_u}{\phi_c F_{cr}} \quad (3.63)$$



Gambar 3.19 Penampang Lintang Efektif Pengaku Tumpu (Salmon dan Johnson, 1992)

Persyaratan tumpu yang harus dipenuhi oleh LRFD adalah

$$\phi_c R_n \geq P_u \quad (3.64)$$

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

$$f_a \leq F_a \quad (3.65)$$

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

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{\left(\frac{KL}{r} \right)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{SF} \quad (3.66)$$

$$SF = \frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3} \quad (3.67)$$

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

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad (3.68)$$

dimana

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (3.69)$$

3.3.2 Pengaku Antara

Gelagar pelat biasanya didesain menggunakan pengaku antara. Pengaku antara tidak diperlukan apabila memenuhi syarat-syarat dibawah ini

$$\frac{h}{t_w} \leq 260 \quad (3.70)$$

dan $V_n \leq C_v(0,6F_{yw})A_w \quad (3.71)$

bila $\frac{1100}{\sqrt{F_{yw}, Mpa}} \leq \frac{h}{t_w} \leq \frac{1400}{\sqrt{F_{yw}, Mpa}}$

maka $C_v = \frac{1100}{\frac{h}{t_w} \sqrt{F_{yw}, MPa}}$ (tekuk tak elastis) (3.72)

bila $\frac{h}{t_w} > \frac{1400}{\sqrt{F_{yw}, Mpa}}$

maka $C_v = \frac{1516900}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 F_{yw}, Mpa}$ (tekuk elastis) (3.73)

3.3.3 Penempatan Pengaku Lateral

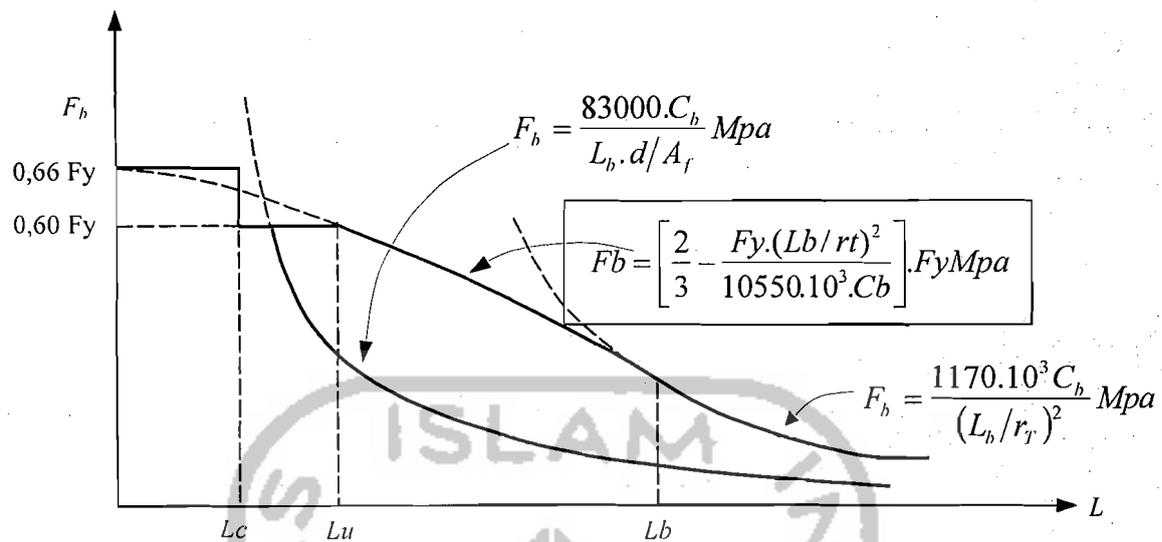
Berdasarkan asumsi bahwa beban transversal dikenakan secara vertikal melalui pusat geser maka perlu ditambahkan pengaku lateral dengan interval tertentu agar kegagalan akibat tekuk puntir lateral pada bagian yang tidak diinginkan dapat dicegah.

Pengaku lateral pada struktur dua tumpuan sederhana (*simple beam*) akan diperlukan bila syarat kompak pada struktur tersebut tidak terpenuhi. Adapun syarat kompak dari suatu struktur adalah apabila memenuhi persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$\text{Sayap : } \frac{bf}{2tf} \leq \frac{170}{\sqrt{F_y}} \text{ Mpa} \quad (3.74)$$

$$\text{Badan : } \frac{d}{tw} \leq \frac{1690}{\sqrt{F_y}} \text{ Mpa} \quad (3.75)$$

Apabila syarat kompak tersebut di atas tidak terpenuhi maka struktur tersebut harus diberi pengaku lateral, dengan ketentuan jarak sebagai berikut



Gambar 3.20. Tegangan pada balok dengan *lateral support* pada jarak tertentu

Dari Gambar (3.20) dapat dilihat bahwa :

1. Apabila : $L < L_c$

Maka tegangan ijin maksimal dipakai : $F_b = 0,66 F_y$

L_c diambil nilai terkecil dari :

$$L_c = \frac{200 \cdot b_f}{\sqrt{F_y}} \text{ Mpa} \quad (3.76)$$

$$L_c = \frac{138000}{(d / A_f) \cdot F_y} \text{ Mpa} \quad (3.77)$$

2. Apabila : $L_c < L < L_u$

Maka tegangan ijin maksimal dipakai : $F_b = 0,60 F_y$

L_u diambil nilai terbesar dari :

$$L_u = \frac{2900}{(d / A_f) \cdot F_y} \text{ Mpa} \quad (3.78)$$

$$Lu = r_T \sqrt{\frac{14800.cb}{F_y}} Mpa \quad (3.79)$$

dimana : r_T seperti pada persamaan 3.58

$$3. \text{ Apabila : } Lu < L < rt \sqrt{\frac{510000.cb}{F_y}} Mpa$$

Maka tegangan Fb diambil nilai terbesar dari persamaan :

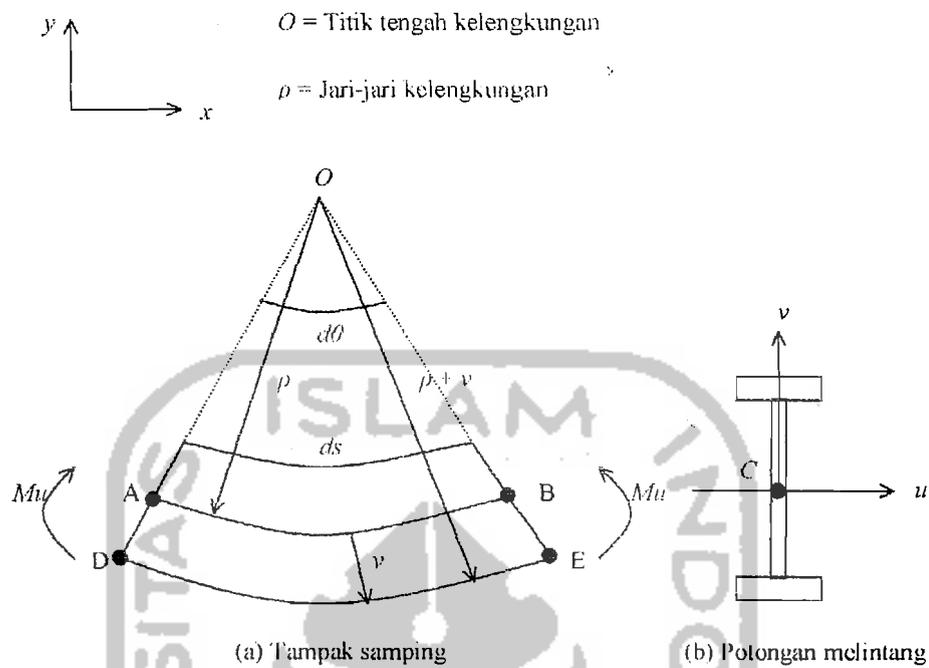
$$Fb = \left[\frac{2}{3} - \frac{F_y.(Lb/rt)^2}{10550.10^3.Cb} \right] .F_y Mpa \quad (3.80)$$

$$Fb = \frac{83000.Cb}{L.(d/A_f)} Mpa \quad (3.81)$$

3.4 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. Teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Kinematika dasar yang menghipotesa bahwa irisan-irisan yang berbentuk bidang datar akan tetap merupakan bidang datar selama berdeformasi.





Gambar 3.21 Deformasi segmen balok dalam lenturan

Elemen differensial balok untuk lentur murni ditunjukkan pada Gambar 3.21. Sumbu u dan v pada potongan melintang, adalah sumbu utama yang ditunjukkan pada Gambar 3.21b. AB adalah garis netral, pada garis netral ini garis tidak memendek ataupun memanjang. Regangan pada garis netral didapatkan dari persamaan :

$$\varepsilon_x = \frac{\text{panjang akhir} - \text{panjang awal}}{\text{panjang awal}} \quad (3.82)$$

Dengan substitusi didapat :

$$\varepsilon_x = \frac{(\rho + v)d\theta - \rho.d\theta}{\rho.d\theta} = \frac{v}{\rho} \quad (3.83)$$

Hubungan dasar antara kurva elastis dengan regangan linier, didapat :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = k = \frac{-\varepsilon_x}{v} \quad (3.84)$$

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

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (3.85)$$

sehingga :

$$\varepsilon_x = \frac{Mu_x}{EI_u} \quad (3.86)$$

Substitusi Persamaan 3.37 ke Persamaan 3.38 akan diperoleh :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = k = \frac{Mu_x}{EI_u} \quad (3.87)$$

dalam koordinat kartesian kurva kelengkungan didefinisikan :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = k = \frac{\pm d^2v/dx^2}{[1 + (dv/dx)^2]^{3/2}} \quad (3.88)$$

karena kemiringan dv/dx dari kurva elastis adalah sangat kecil, maka :

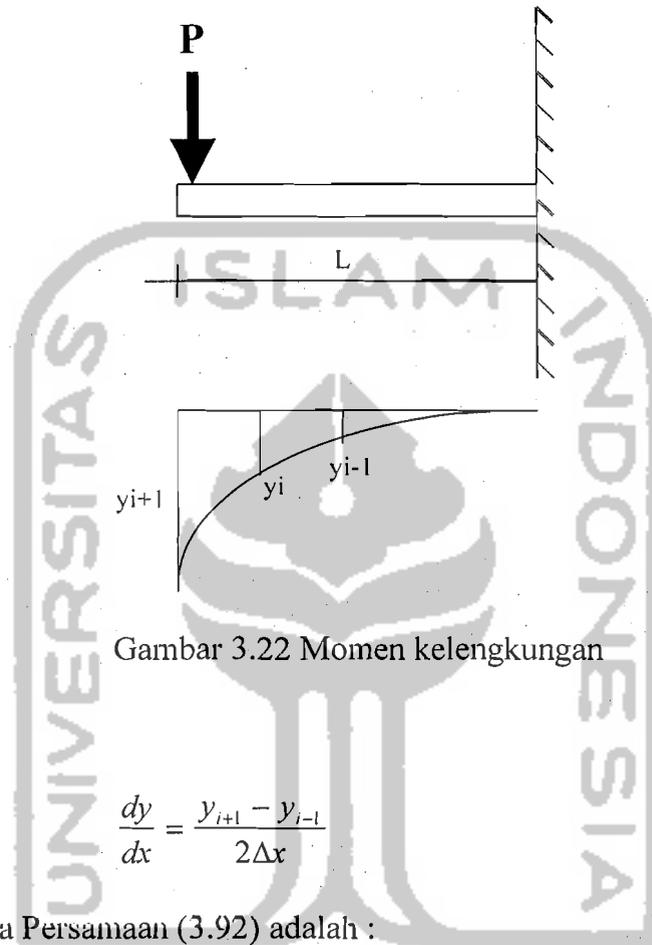
$$(dv/dx)^2 \approx 0 \quad (3.89)$$

Persamaan 3.88 disubstitusi dengan Persamaan 3.89 menjadi :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI_u} \quad (3.90)$$

$$EI_u = \frac{M}{(d^2v/dx^2)} \quad (3.91)$$

Dari hasil pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik pembebanan pada ujung bentang.



Gambar 3.22 Momen kelengkungan

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.92)$$

turunan kedua Persamaan (3.92) adalah :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta_x) \frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1}) \frac{d}{dx}(2\Delta_x)}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.93)$$

karena $(2\Delta_x)$ adalah konstanta maka

$$\frac{d}{dx}(2\Delta_x) = 0$$

sehingga Persamaan (3.92) menjadi

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta_x) \frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.94)$$

selanjutnya dari Persamaan (3.94) didapatkan

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.95)$$

kemudian Persamaan (3.95) disederhanakan menjadi :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} &= \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta_x)^2} \\ \frac{d^2 y}{dx^2} &= \phi = \frac{M}{EI} \\ M &= EI \cdot \phi \\ M &= EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \end{aligned} \quad (3.96)$$

Mengacu pada Gambar 3.22 didapat momen (M) :

$$M = \frac{1}{4} PL \quad (3.97)$$

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 3.22. 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 :

$$M_y = F_y \cdot S_x \quad (3.98)$$

tegangan. Pada saat tegangan leleh (f_y) tercapai diserat terluar (S_x) kapasitas momennya disebut momen leleh (M_y) dan dapat dihitung sebagai :

$$M_y = f_y \cdot S_x \quad (3.98)$$

Bila penampang berada dalam kondisi plastis, regangan pada setiap serat sama dengan atau lebih besar dari $\epsilon_y = f_y/E_y$, 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 :

$$M_p = f_b \int y \cdot dA \quad (3.99)$$

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

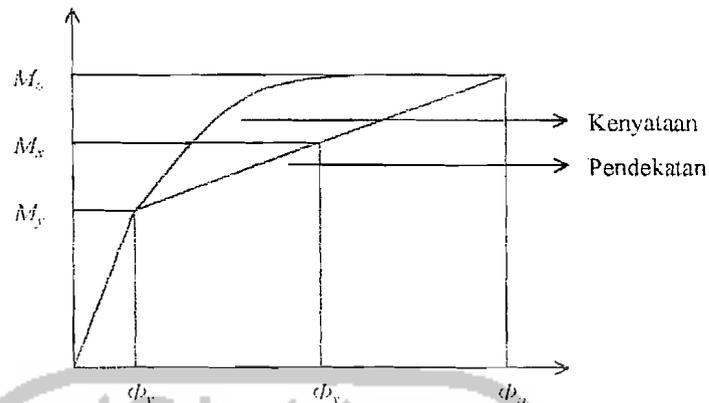
$$M_p = f_b \cdot z \quad (3.100)$$

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 .

$$f = \frac{M_p}{M_y} = \frac{z}{S} \quad (3.101)$$

Hubungan Momen (M) dengan kelengkungan (ϕ) ditunjukkan pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23 Grafik momen kelengkungan

3.5 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.

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. Jika beban besar, material akan terdeformasi semakin cepat dan defleksinya juga semakin besar.

Hubungan beban-lendutan ditunjukkan :

$$\Delta = \frac{P.L^3}{3EI} \quad (3.102)$$

dengan :

Δ = defleksi balok

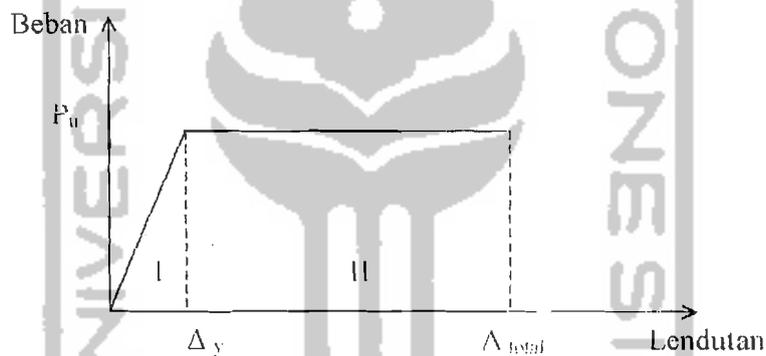
P = beban balok

E = modulus elastis bahan

L = panjang bentang balok

I = momen inersia penampang

Hubungan beban-lendutan pada balok yang dibebani lentur dapat disederhanakan menjadi bentuk bi-linier seperti pada Gambar 3.24.



Gambar 3.24 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.

3.6 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 :

$$\text{Daktilitas} = \frac{\epsilon_{tot}}{\epsilon_y} \quad (3.103)$$

dengan :

ϵ_{tot} = regangan total

ϵ_y = regangan pada saat leleh pertama

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

$$\mu_{\text{simpangan}} = \frac{\Delta_{\text{tot}}}{\Delta_y} \quad (3.105)$$

dengan :

$\mu_{\text{simpangan}}$ = daktilitas simpangan

Δ_{tot} = lendutan total

Δ_y = lendutan pada beban maksimum

Sedangkan daktilitas kelengkungan diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan, yaitu perbandingan antara Φ_{tot} dan Φ_y , yang dirumuskan :

$$\mu_{\text{kelengkungan}} = \frac{\Phi_{\text{tot}}}{\Phi_y} \quad (3.106)$$

dengan :

$\mu_{\text{kelengkungan}}$ = daktilitas kelengkungan

Φ_{tot} = kelengkungan total

Φ_y = kelengkungan pada momen maksimum

3.7 Pengelompokan Baja Berdasarkan tegangan Lelah

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

