

BAB III

LANDASAN TEORI

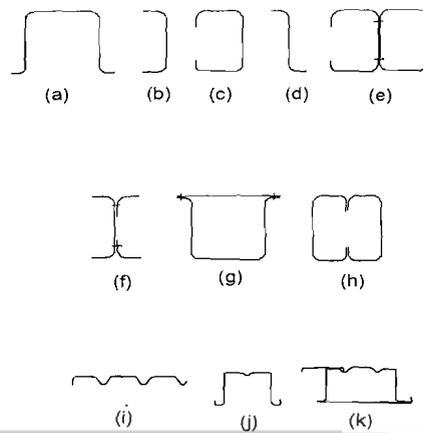
3.1 Profil Bentukan Dingin

Profil Baja bentukan dingin (*cold-formed members*) digunakan secara luas di dalam konstruksi. Suatu karakteristik yang baik dari baja bentukan dingin adalah dapat dibentuk kedalam suatu variasi penampang melintang yang dibentuk bersekat-sekat menggunakan peralatan sederhana.

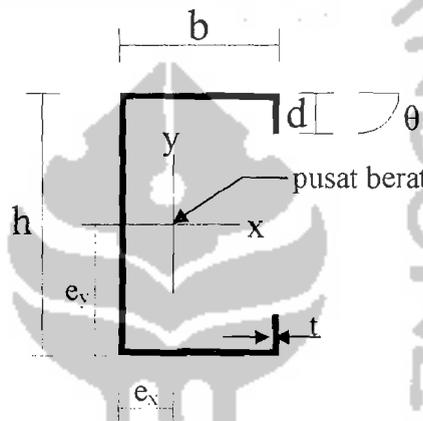
Gambar 3.1 menunjukkan beberapa profil bentukan dingin yang dibedakan menjadi tiga kelompok (*Lambert Tall, 1974*), yaitu :

1. Bagian a sampai d, bentuk sederhana,
2. bagian e sampai h, bentuk penuh,
3. bagian i sampai k, bentuk panel atau dek.

Profil bentukan dingin yang umum digunakan sebagai elemen pembentuk kuda-kuda adalah profil *lipped channel*. Sifat penampang (*Section Properties*) profil *lipped channel* seperti terlihat pada Gambar 3.2, meliputi: (a) luas penampang, (b) momen inersia dan (c) jari-jari inersia, dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut ini.



Gambar 3. 1 Profil bentukan dingin



Gambar 3. 2 Profil *Lipped Channel*

sesuai dengan notasi yang digunakan dalam Gambar 3.2, luas penampang profil

(A) dapat dihitung menggunakan pendekatan Persamaan (3.1),

$$A = \{(h - 2t) + 2b + 2d - t\}t \quad (3.1)$$

profil *lipped channel* memiliki satu sumbu simetri yaitu sumbu kuat (sumbu x).

Jarak pusat berat ke sisi kiri (e_x) dan jarak pusat berat ke sisi bawah (e_y) dapat

dihitung menggunakan pendekatan seperti ditunjukkan dalam persamaan-

persamaan berikut,

$$e_y = \frac{1}{2} \cdot h \quad (3.2)$$

$$e_x = \frac{b \cdot (b + 2 \cdot d)}{h + 2 \cdot b + 2 \cdot d} \quad (3.3)$$

momen inersia terhadap sumbu X dan sumbu Y didekati dengan Persamaan (3.4) dan Persamaan (3.5),

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot t \cdot h^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t \cdot h^2 + \frac{2}{3} \cdot d^3 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot d \cdot t \cdot h^2 - d^2 \cdot t \cdot h + \frac{1}{6} \cdot b \cdot t^3 \quad (3.4)$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot h \cdot t^3 + \frac{2}{3} \cdot t \cdot b^3 + \frac{1}{6} \cdot d \cdot t^3 + 2 \cdot d \cdot t \cdot b^2 - (h \cdot t + 2 \cdot b \cdot t + 2 \cdot d \cdot t) \cdot b^2 \cdot \frac{(b + 2 \cdot d)^2}{(h + 2 \cdot b + 2 \cdot d)^2} \quad (3.5)$$

jari-jari inersia terhadap sumbu X dan sumbu Y dihitung berdasarkan Persamaan (3.6) dan Persamaan (3.7) berikut,

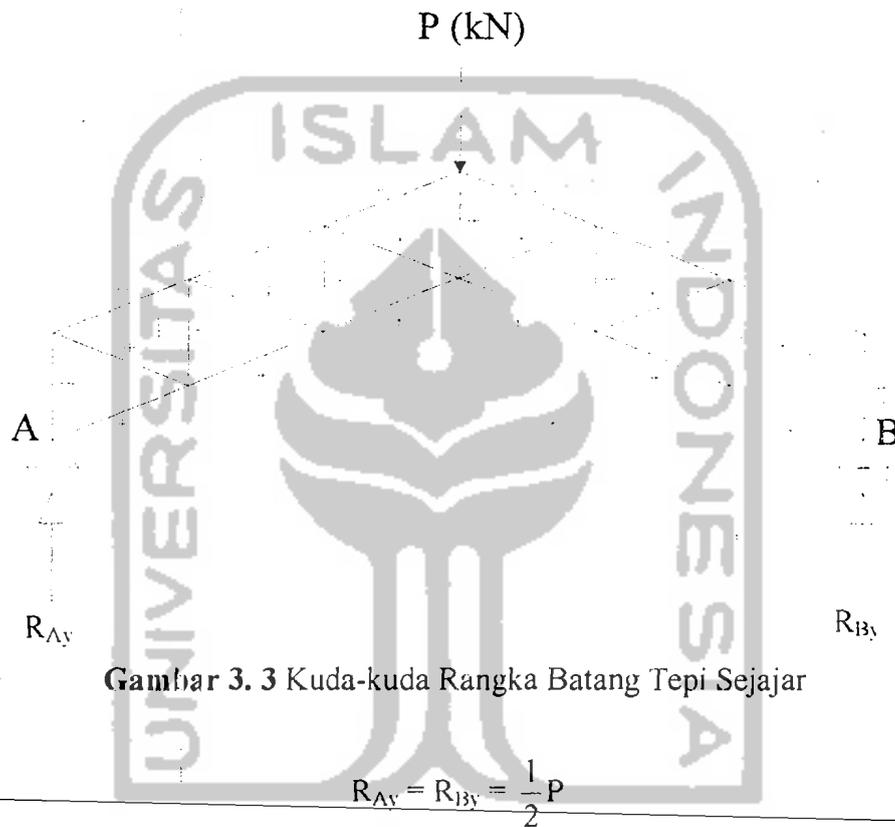
$$i_x = r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (3.6)$$

$$i_y = r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (3.7)$$

3.2 Kuda-kuda Rangka Batang

Kuda-kuda rangka batang (*truss*) adalah suatu struktur kerangka yang terdiri dari sejumlah tertentu batang-batang yang dihubungkan satu sama lain dengan perantara titik-titik simpul yang berupa sendi tanpa gesekan dimana gaya-gaya luar bekerja melalui titik-titik ini (*Chu-Kia Wang, 1985*).

Struktur kuda-kuda dengan batang tepi sejajar merupakan salah satu bentuk umum yang sering digunakan, komponennya terdiri dari batang tepi atas yang sejajar dengan batang tepi bawah, batang vertikal dan batang diagonal, seperti terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Kuda-kuda Rangka Batang Tepi Sejajar

$$R_{Ay} = R_{By} = \frac{1}{2}P \quad (3.8)$$

dengan: $R_{Ay} = R_{By}$ = reaksi tumpuan akibat beban pada struktur.

Pembebanan sentris pada puncak rangka kuda-kuda batang tepi sejajar akan mengakibatkan sebagian komponen rangka memikul gaya tekan (-) dan sebagian lagi memikul gaya tarik (+) seperti terlihat pada Gambar 3.3. Beban sentris pada puncak rangka mengakibatkan batang tepi atas kuda-kuda akan mengalami gaya tekan yang semakin besar dari tepi hingga bagian puncak, sedangkan batang tepi bawah mengalami gaya tarik yang semakin besar menuju tengah struktur. Untuk

batang diagonal akan mengalami gaya tarik yang semakin besar dari tepi hingga tengah, sebaliknya batang vertikal mengalami gaya tekan dengan bagian tepi memiliki gaya yang besar dan mengecil dari tepi hingga tengah struktur.

3.3 Batang Tarik

Batang tarik adalah batang yang mendukung tegangan tarik aksial yang diakibatkan oleh bekerjanya gaya tarik aksial pada ujung-ujung batang (*Padosbajayo, 1991*). Tegangan tarik yang terjadi pada batang seperti pada Gambar 3.3 tidak menimbulkan masalah stabilitas, karena tegangan tarik aksial yang bekerja pada sumbu longitudinal elemen cenderung menahan elemen pada garis longitudinal.

Kekuatan batang tarik yang mengalami kegagalan seperti terlihat pada Gambar 3.4a dan Gambar 3.4b akan mencapai kekuatan batas bila semua serat penampang melintang meleleh, sehingga kekuatan batang tarik bersifat merata pada seluruh tampang dan kekuatannya dinyatakan oleh Persamaan (3.9) (*Salmon dan Johnson, 1994*).

$$P_u = A_g \cdot F_y \quad (3.9)$$

dengan: A_g = luas penampang bruto batang tarik, F_y = tegangan leleh baja.

Kegagalan batang tarik yang perlu diperhitungkan adalah patahnya elemen tarik seperti terlihat pada Gambar 3.4c, dengan anggapan batang tarik yang patah telah melampaui tegangan tariknya sehingga kekuatan batang tarik dapat diketahui menggunakan Persamaan (3.10). Untuk batang tarik yang berlubang dengan konsentrasi tegangan dan eksentrisitas pembebanan yang tidak diperhitungkan,

kekuatan batang tarik dipengaruhi oleh pengurangan luas penampang akibat lubang alat sambung. Sehingga luas efektifnya dinyatakan dalam Persamaan (3.12). Sedangkan untuk batang tarik yang tidak berlubang atau dilas, luas penampangnya dihitung menurut Persamaan (3.11).

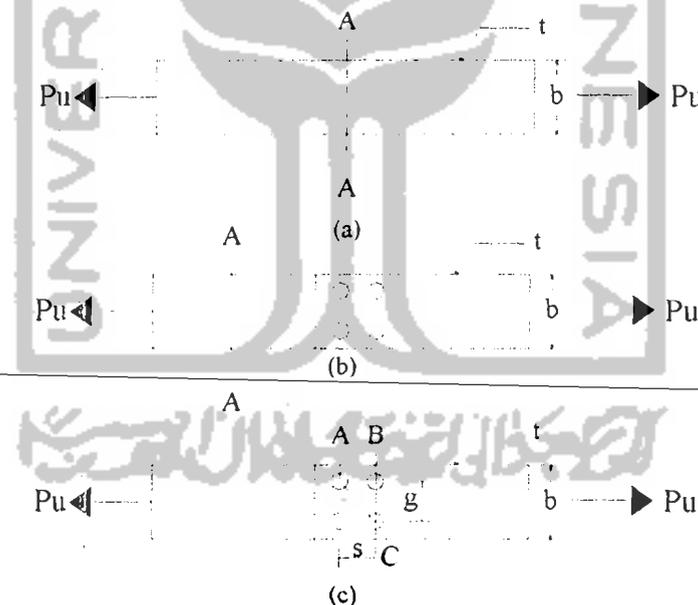
$$P_u = A_e \cdot F_u \quad (3.10)$$

dengan: A_e = luas penampang efektif, F_u = tegangan tarik

$$A_e = U \cdot A_g \quad (3.11)$$

$$A_e = U \cdot A_n \quad (3.12)$$

dengan: A_e = luas penampang efektif, U = faktor efisiensi, A_n = luas penampang netto, A_g = luas penampang.



Gambar 3. 4 Elemen yang mengalami kerusakan akibat gaya tarik

Pada Gambar 3.4c yang memperlihatkan dua baris lubang, garis keruntuhan dapat melalui garis lurus (B-C) atau dapat mengikuti garis diagonal (A-C). Luas penampang netto untuk kedua kondisi keruntuhan tersebut berturut-turut dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.12a) dan Persamaan (3.12b), dengan s adalah jarak

seling sejajar (yaitu jarak lubang bersebelahan yang sejajar arah pembebanan) dan g adalah jarak tegak (yaitu jarak lubang yang tegak lurus arah pembebanan).

$$A_n = b.t - n.d.t \quad (3.12a)$$

$$A_n = b.t - n.d.t + \frac{s^2}{4.g} \quad (3.12b)$$

dengan : b = lebar penampang batang tarik, n = jumlah baut yang berada pada garis keruntuhan, d = diameter baut, t = tebal pelat.

Batang yang mengalami tegangan tarik tidak memiliki masalah dalam stabilitas, namun guna mencegah terjadinya lendutan yang cukup besar pada struktur tarik maka perlu kriteria kekakuan untuk membatasi kelangsingan batang tarik tersebut. Kriteria tersebut berdasarkan pada angka kelangsingan batang (KL/r), dengan K adalah faktor panjang efektif, L adalah panjang batang dan r adalah jari-jari inersia terkecil yang merupakan akar kuadrat dari inersia penampang melintang batang dibagi luas penampang melintang batang dibagi luas penampang ($r = \sqrt{I/A}$). Dalam menentukan angka kelangsingan, kedua ujung batang tarik dianggap sendi dengan faktor panjang efektifnya adalah satu ($K=1$), maka kelangsingan dapat dinyatakan sebagai panjang batang dibagi jari-jari inersia (L/r). Angka kelangsingan yang masih bisa digunakan menurut AISC dan AASHTO untuk berbagai jenis batang tarik terlihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Angka kelangsingan maksimum untuk batang tarik
(dikutip dari Struktur Baja Disain Dan Perilaku Jilid 1, Salmon dan Johnson)

	AISC	AASHTO
Untuk batang utama	240	200
Untuk pengaku lateral dan batang sekunder lain	300	240
Untuk batang yang mengalami pembalikan tegangan	-	140

3.4 Batang Tekan

Batang tekan merupakan elemen struktur (batang) yang mengalami gaya tekan aksial searah panjang batang yang arah bebannya berimpit dengan sumbu longitudinal elemen tersebut. Pada kenyataannya hal tersebut amat jarang terjadi sekalipun eksentrisitas yang ada kecil namun cukup berpengaruh terhadap stabilitas elemen tersebut. Masalah yang paling penting diperhatikan dalam perencanaan batang tekan adalah masalah stabilitas, karena elemen struktur tekan sangat peka terhadap faktor-faktor yang dapat menimbulkan peralihan lateral atau tekuk. Kapasitas pikul beban pada elemen struktur tekan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti eksentrisitas beban, ketidaksempurnaan material, dan profil penampang.

Keruntuhan batang tekan dapat dibedakan menjadi 2 kategori, kedua macam keruntuhan tersebut adalah:

1. Keruntuhan yang diakibatkan tegangan lelehnya terlampaui, keruntuhan semacam ini terjadi pada batang tekan yang pendek (*stocky column*) dan penampangnya kompak.
2. Keruntuhan yang diakibatkan oleh tekuk, keruntuhan yang diakibatkan oleh tekuk terdiri dari dua macam, yaitu : (1) tekuk total (*overall buckling*), batang

tekan mengalami tekuk total bila penampang batang kompak dan langsing (KL/r besar); (2) tekuk lokal (*local buckling*), batang yang mengalami tekuk lokal memiliki penampang yang tidak kompak dan elemen penampangnya langsing (rasio b/t besar).

3.4.1 Keruntuhan Akibat Tegangan Leleh Terlampaui

Pada keadaan yang umum batang tekan yang pendek dan mempunyai rasio lebar terhadap tebal (b/t) kecil dapat dibebani sampai bahan meleleh atau bahkan sampai daerah pengerasan regangan (*Strain Hardening*). Oleh karena itu keruntuhan akibat tegangan lelehnya terlampaui biasanya dijumpai pada jenis batang dengan karakteristik tersebut. Kapasitas tekan ditentukan sebagai hasil kali tegangan leleh dan luas penampang seperti ditunjukkan oleh Persamaan (3.6). Menurut *Charles G. Salmon dan Johnson (1994)* salah satu faktor yang berpengaruh pada kegagalan ini adalah luas penampang dari batang tekan tersebut. Semakin besar luas penampang melintang batang maka kapasitas tekannya akan semakin meningkat, sehingga risiko untuk keruntuhan ini dapat diminimalisir dan sebaliknya. Biasanya pada kondisi ini $F_{cr} \geq F_y$, sehingga $F_{cr} = F_y$.

$$P_u = A_g \times F_y \quad (3.13)$$

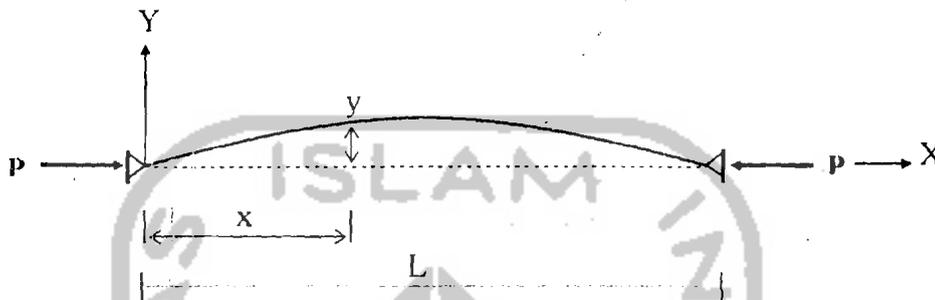
dengan: A_g = luas penampang batang tarik, F_y = tegangan leleh baja.

3.4.2 Keruntuhan Akibat Tekuk

Keruntuhan akibat tekuk terdiri dari 2 macam, yaitu :

a. Tekuk Total

Pada keruntuhan akibat tekuk ini, tegangan yang terjadi pada seluruh penampang masih dalam keadaan elastis, sehingga biasa disebut tekuk elastis.



Gambar 3.5 Batang tertekan

L = panjang batang, Δ = lendutan

Berdasarkan Gambar 3.5, batang tekan yang ditinjau pada titik sejauh x mengalami deformasi lateral sebesar y dapat dihitung menggunakan pendekatan seperti pada Persamaan (3.14a) yaitu persamaan diferensial kurva elastis berikut.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (3.14a)$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -P \cdot y \quad (3.14b)$$

Persamaan (3.14b) dapat ditulis kembali menjadi

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI} y = 0 \quad (3.14c)$$

Penyelesaian Persamaan (3.14c) menghasilkan beban tekuk Euler (*Euler buckling load*), yaitu

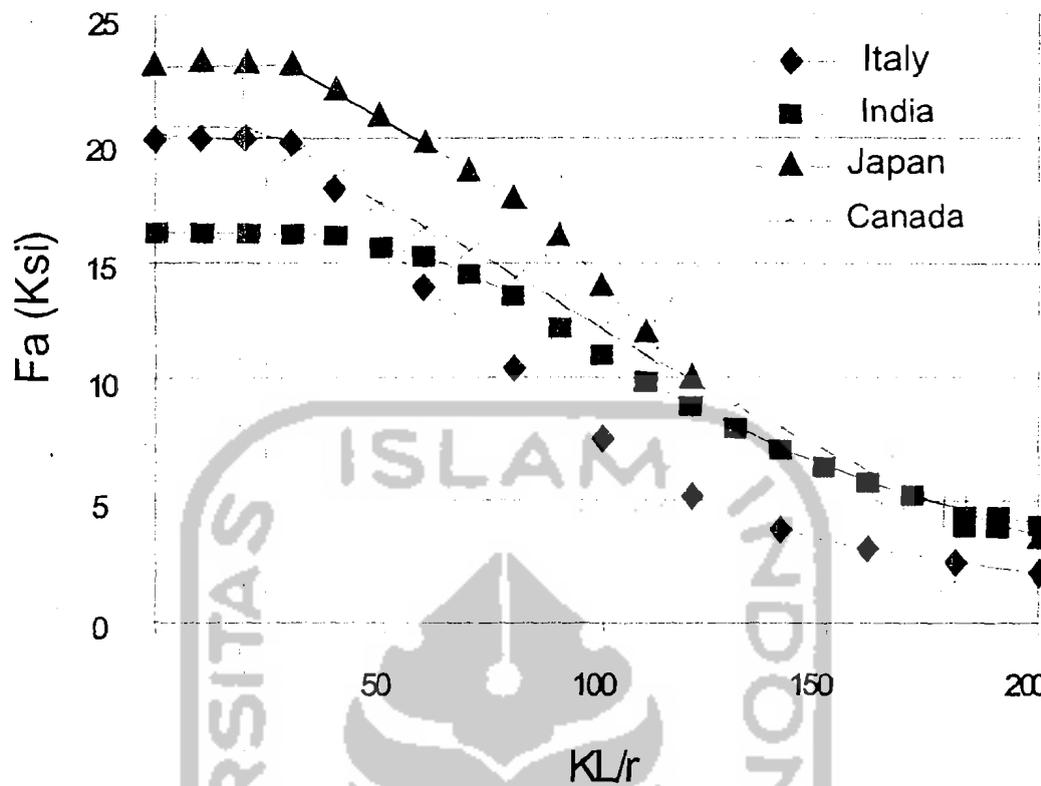
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.15)$$

jika ruas kiri dan kanan Persamaan (3.15) dibagi dengan luas penampang (A), maka akan diperoleh tegangan tekan kritis Euler seperti terlihat pada Persamaan (3.16) berikut ini,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.16)$$

dengan: E = modulus elastisitas baja, L = panjang tekuk, dan r = jari-jari inersia minimum = $\sqrt{\frac{I}{A}}$, I = inersia bahan. Berdasarkan Persamaan (3.16) terlihat bahwa tegangan kritis batang tekan berbanding terbalik dengan kuadrat kelangsingan (KL/r), sehingga semakin langsing batang tekan tegangan kritisnya akan semakin kecil.

Kurva tegangan ijin (F_a) fungsi kelangsingan (KL/r) pada kolom di beberapa negara yaitu: Italia, India, Jepang dan Kanada menunjukkan grafik hubungan yang hampir sama seperti terlihat pada Gambar 3.4. Penurunan tegangan ijin batang relatif kecil pada KL/r kecil (0 s/d ± 40), penurunan tegangan ijin batang terjadi besar seiring dengan penambahan KL/r untuk $KL/r = \pm 40$ sampai dengan ± 160 , dan menjadi relatif datar untuk KL/r lebih dari ± 160 .



Gambar 3. 6 Grafik Hubungan KL/r Dengan F_a Di Beberapa Negara
(Lambert Tall, 1974)

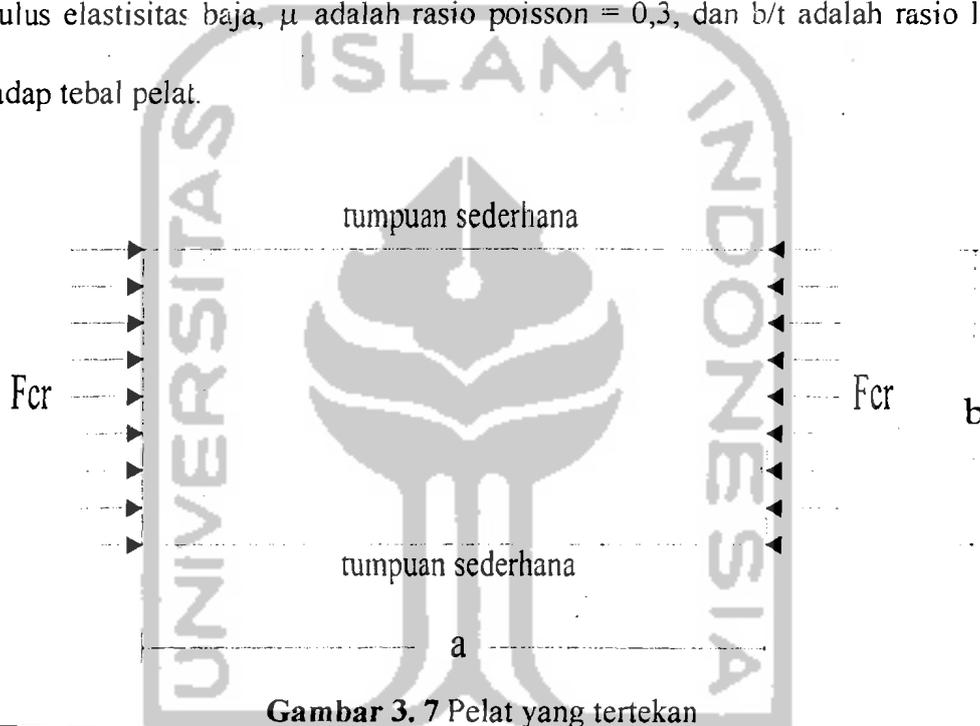
b. Tekuk Lokal

Lambert Tall (1974) mengemukakan tekuk lokal adalah tekuk yang terjadi pada salah satu elemen penyusun tampang suatu struktur yang menyebabkan elemen yang tertekuk tidak dapat lagi menanggung penambahan beban, dengan kata lain efisiensi penampang berkurang. Keruntuhan akibat tekuk lokal ini terjadi pada penampang yang langsing dimana tegangan kritis (F_{cr}) yang dimiliki oleh pelat jauh di bawah tegangan lelehnya (F_y). Pendapat yang sama juga dikemukakan oleh *Charles G. Salmon dan Johnson (1994)*, tegangan tekuk elastik teoritik atau

tegangan kritis pelat yang tertekan terlihat pada Gambar 3.7 dan dapat dinyatakan dengan Persamaan (3.17).

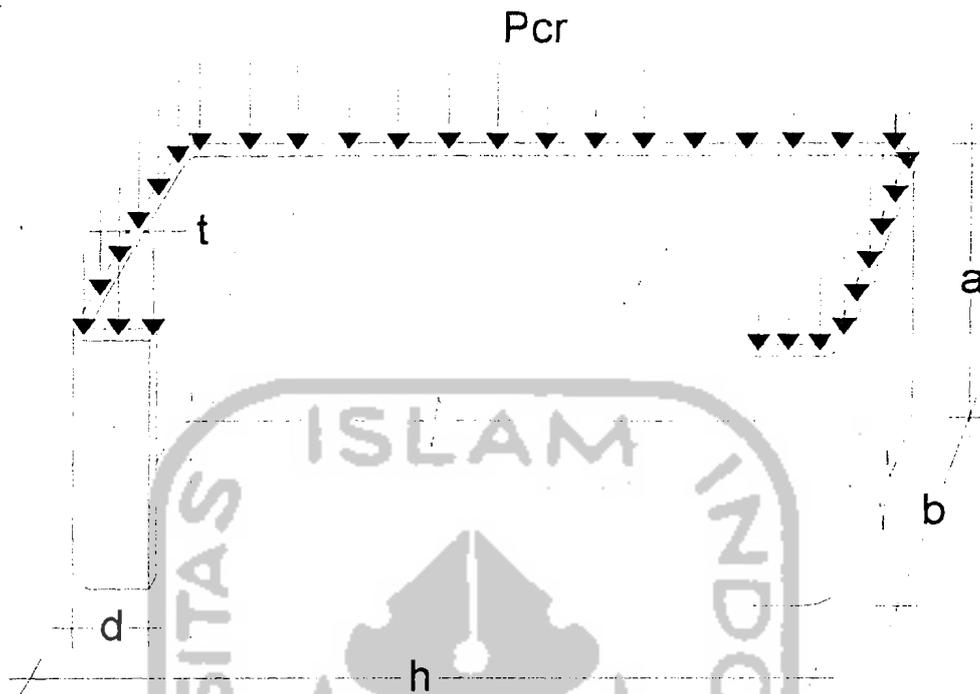
$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (3.17)$$

dengan : F_{cr} = tegangan kritis, k adalah koefisien tekuk, $\pi = 3,14$, E adalah modulus elastisitas baja, μ adalah rasio poisson = 0,3, dan b/t adalah rasio lebar terhadap tebal pelat.



Gambar 3. 7 Pelat yang tertekan

Berdasarkan Persamaan (3.17) tegangan kritis elemen tekan dipengaruhi koefisien tekuk (k) dan rasio lebar terhadap tebal pelat (b/t). Tegangan kritis juga dipengaruhi aspek rasio yaitu rasio panjang terhadap lebar pelat (a/b). Semakin besar aspek rasio dan rasio lebar terhadap tebal pelat (b/t), koefisien tekuk semakin kecil sehingga menyebabkan terjadinya tekuk lokal pada penampang profil di bagian sayap maupun di bagian badan. Gambar 3.8 menunjukkan penampang profil *Lipped Channel* bentukan dingin.



Gambar 3. 8 Profil *Lipped Channel*

dengan: h = tinggi badan, b = lebar sayap, d = panjang lip, t = tebal profil, E = modulus elastis ($2 \cdot 10^5$ Mpa), μ = rasio poisson (0,3)

Ragam interaksi tekuk lokal, antara lain:

1) Tekuk Lokal Lip

Bibir profil *lipped channel* dianggap sebagai pelat yang salah satu sisinya bebas dan sisi lainnya dianggap sebagai dukungan sederhana. Sesuai dengan notasi pada Gambar 3.8, tegangan kritis bibir dinyatakan dalam Persamaan (3.18). Nilai rasio panjang terhadap lebar pelat (a/b) yang besar dan pelat memikul tekanan murni maka nilai koefisien tekuk (k) untuk bibir profil, $k = 0,425$.

$$F_{cr\text{lip}} = k_{\text{lip}} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2) \left(\frac{d}{t}\right)^2} \quad (3.18)$$

Tegangan kritis pada bibir didapat dengan mensubstitusikan nilai k pada Persamaan (3.18) adalah:

$$F_{cr\text{lip}} = 76.823,84 \times \left(\frac{t}{d}\right)^2 \text{ (Mpa)}$$

2) Tekuk Lokal Sayap

Sesuai dengan notasi pada Gambar 3.8, perhitungan tegangan kritis untuk sayap dengan menganggap kedua sisinya sebagai tumpuan sederhana, ditunjukkan oleh Persamaan (3.19) sebagai berikut :

$$F_{cr\text{sayap}} = k_{\text{sayap}} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.19)$$

Untuk rasio panjang terhadap lebar pelat (a/b) yang besar dan pelat mendapat tekanan murni, maka koefisien tekuk pelat (k) = 4. Sehingga tegangan kritis pada sayap didapat dengan mensubstitusikan nilai k pada persamaan Persamaan (3.19).

$$F_{cr\text{sayap}} = 723.047,94 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \text{ (Mpa)} \quad (3.20)$$

3) Tekuk Lokal Badan

Tegangan kritis untuk pelat badan yang kedua sisinya dianggap sebagai tumpuan sederhana serta rasio panjang terhadap lebar pelat (a/b) besar dan menerima tekanan murni, koefisien tekuk pelat (k) = 4, ditunjukkan pada Persamaan (3.21) berikut :

$$F_{cr \text{ badan}} = k_{\text{badan}} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2) \left(\frac{h}{t} \right)^2} \quad (3.21)$$

Nilai koefisien tekuk pelat (k) pada badan, $k = 4$, maka Persamaan (3.20) dapat digunakan untuk mencari tegangan kritis badan dengan mengganti nilai b dengan nilai h sesuai notasi pada Gambar 3.6.

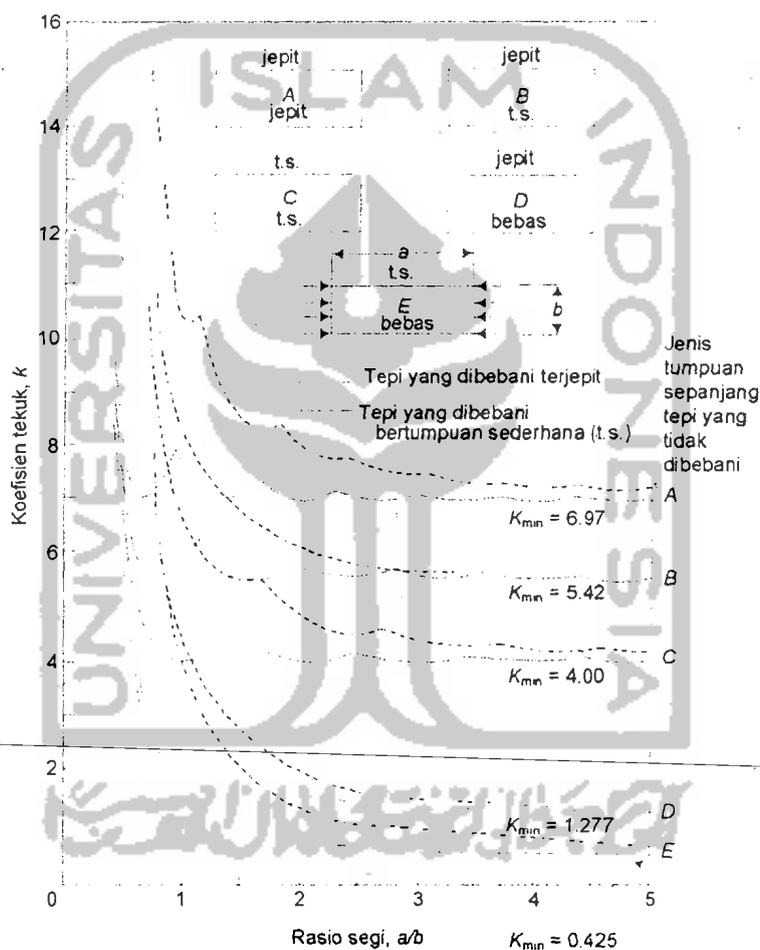
3.4.3 Nilai Koefisien Tekuk (k)

Nilai koefisien tekuk dari suatu rangka batang hanya bisa ditinjau pada batang yang mengalami kerusakan akibat tekuk, baik akibat tekuk menyeluruh maupun akibat tekuk lokal

Pada kondisi tekuk menyeluruh nilai koefisien tekuk (k) dipengaruhi oleh kelangsingan dari batang profil yang dapat diketahui menggunakan Persamaan (3.9), dimana F_{cr} dinyatakan sebagai gaya batang dibagi luas profil (P_{cr} / A). Pada kegagalan akibat tekuk lokal, nilai koefisien tekuk (k) untuk elemen tekan pelat dipengaruhi oleh kondisi tepi elemen pelat dan rasio panjang terhadap lebar pelat (a/b) seperti terlihat pada Gambar 3.7. Nilai koefisien tekuk (k) untuk berbagai kondisi tumpuan elemen pelat diberikan pada Gambar 3.9.

Berdasarkan Gambar 3.7 dan Gambar 3.9, nilai rasio panjang terhadap lebar pelat (a/b) yang lebih besar dari lima untuk setiap kondisi tumpuan elemen pelat, memiliki nilai koefisien tekuk (k) yang hampir konstan dan nilai koefisien tekuk (k) yang digunakan adalah k_{minimum} (k_{min}). Untuk pelat yang kedua sisinya merupakan tumpuan jepit (A) nilai $k_{\text{min}} = 6,97$, untuk pelat yang salah satu sisinya

tumpuan sederhana dan sisi lainnya tumpuan jepit (B) nilai $k_{\min} = 5,42$. Sedangkan pelat yang kedua sisinya tumpuan sederhana (C) nilai $k_{\min} = 4$, untuk pelat yang salah satu sisinya tumpuan jepit dan sisi lainnya bebas (D) nilai $k_{\min} = 1,277$, serta untuk pelat yang salah satu sisinya tumpuan sederhana dan sisi lainnya bebas (E) nilai $k_{\min} = 0,425$.



Gambar 3. 9 Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada pelat segi empat datar (dikutip dari Struktur Baja Disain Dan Perilaku Jilid 1, Salmon dan Johnson)

Nilai koefisien tekuk (k) mendekati nilai 0,425 untuk pelat yang salah satu sisinya tidak diperkuat, seperti yang dimiliki oleh bibir (*lips*) dan untuk pelat yang kedua sisinya ditumpu oleh tumpuan sederhana memiliki nilai $k = 4$ dimiliki oleh

badan. Tampak bahwa nilai k untuk bibir mendekati $1/10$ dari nilai k yang dimiliki oleh badan.

Schafer (1997) mengemukakan nilai koefisien tekuk (k) untuk tekuk lokal dapat diketahui dengan analisa potongan, terbatas pada sayap tepi dan sayap badan. Sesuai dengan notasi yang digunakan dalam Gambar 3.8 nilai koefisien tekuk (k) dipengaruhi oleh rasio tinggi terhadap lebar profil (d/b). Nilai koefisien tekuk (k) diambil dari nilai koefisien tekuk (k) terkecil hasil perhitungan Persamaan (3.22), Persamaan (3.23), dan Persamaan (3.24), sehingga kekuatan pelat akibat tekuk lokal dapat diketahui menggunakan Persamaan (3.19).

a. Koefisien tekuk Sayap Tepi

Sesuai dengan notasi Gambar 3.8 nilai koefisien tekuk (k) untuk tekuk lokal sayap tepi dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.21) seperti yang dikemukakan oleh *Schafer (1997)* berikut,

$$k_{\text{sayap tepi}} = -11,07 \left(\frac{d}{b} \right)^2 + 3,95 \left(\frac{d}{b} \right) + 4 \quad (3.22)$$

nilai d dan b untuk profil *lipped channel* 70x22x8 yaitu: nilai $d = 8$ dan nilai $b = 22$ disubstitusikan ke dalam Persamaan (3.22) sehingga didapat nilai koefisien tekuk (k) sebagai berikut.

$$k_{\text{sayap tepi}} = -11,07 \left(\frac{8}{22} \right)^2 + 3,95 \left(\frac{8}{22} \right) + 4 = 3,97$$

Berdasarkan Gambar 3.9, nilai $k = 3,97$ untuk potongan elemen pelat di atas mendekati nilai k_{min} untuk elemen dengan tumpuan sederhana pada kedua sisinya.

b. Koefisien tekuk Sayap Badan

Nilai koefisien tekuk (k) untuk tekuk lokal sayap badan menurut *Schafer (1997)* dinyatakan dalam Persamaan (3.23) dan Persamaan (3.24). Dari persamaan-persamaan tersebut jika rasio tinggi badan terhadap lebar sayap ($h/b \geq 1$) maka nilai koefisien tekuk ($k \leq 4$). Berdasarkan Gambar 3.9 untuk nilai $k = 4$ potongan elemen ini dianggap kedua sisinya sebagai tumpuan sendi. Jika $h/b < 1$ maka nilai k lebih dari 4.

$$k_{\text{sayap badan}} = \left[\left[2 - \left(\frac{b}{h} \right)^{0.4} \right] \cdot 4 \cdot \left(\frac{b}{h} \right)^2 \right] \quad \text{jika } \frac{h}{b} \geq 1 \quad (3.23)$$

$$\left[\left[2 - \left(\frac{h}{b} \right)^{0.2} \right] \cdot 4 \right] \quad \text{jika } \frac{h}{b} < 1 \quad (3.24)$$

Nilai yang sesuai dengan notasi pada Gambar 3.8 untuk profil *Lipped Channel* 70x22x8 adalah: nilai $h = 70$ dan nilai $b = 22$. Nilai $\frac{h}{b} = 3,182 > 1$, maka koefisien tekuk (k) untuk tekuk lokal sayap badan dihitung dengan mensubstitusikan nilai h dan b pada Persamaan (3.23).

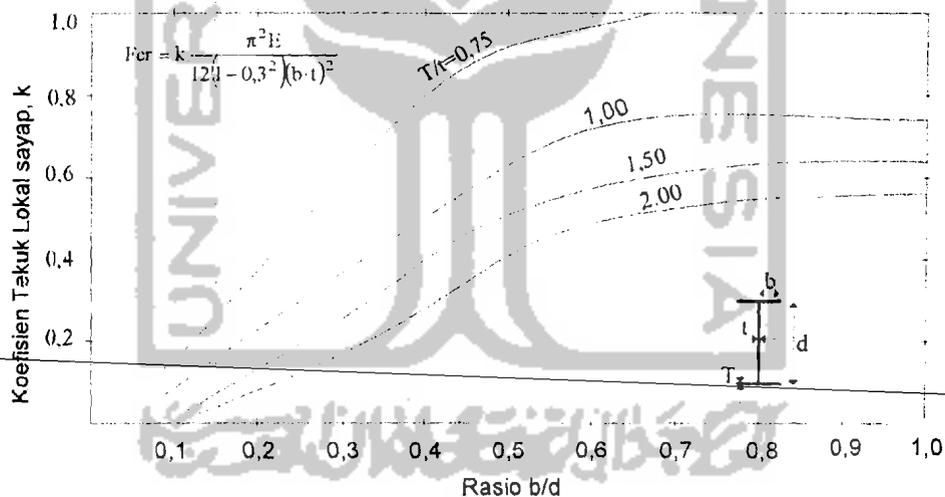
$$k_{\text{sayap badan}} = \left[\left[2 - \left(\frac{22}{70} \right)^{0.4} \right] \cdot 4 \cdot \left(\frac{22}{70} \right)^2 \right] = 0,542$$

berdasarkan gambar 3.9 nilai $k = 0,542$ mendekati nilai k_{\min} untuk elemen plat dengan salah satu sisinya merupakan tumpuan sederhana dan sisi lainnya bebas.

Tegangan kritis pelat dapat diketahui dengan memasukkan nilai k terkecil dari sayap badan dan koefisien tekuk sayap tepi pada Persamaan (3.19).

$$F_{\text{ersayap}} = 0,542 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2) \left(\frac{22}{1,2} \right)^2} = 291,49 \text{ Mpa}$$

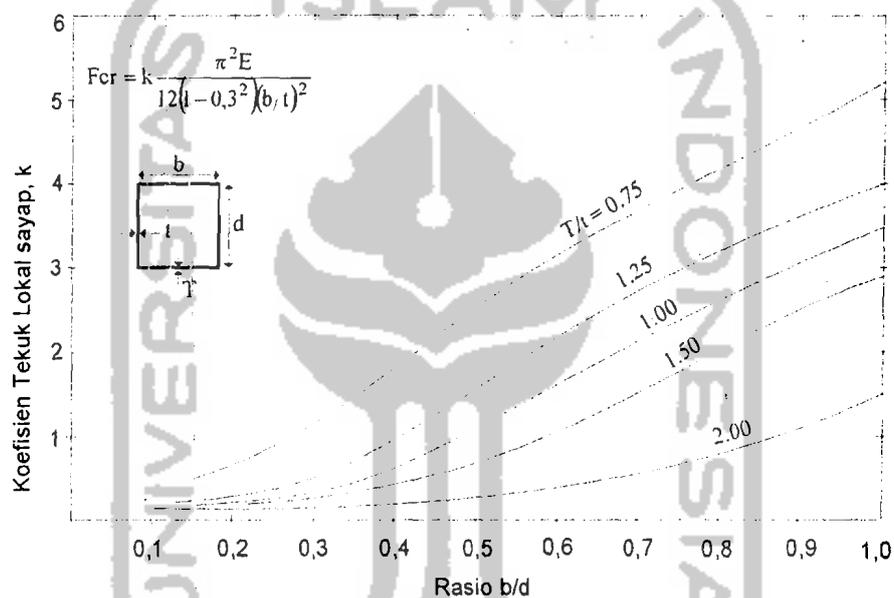
Kerusakan akibat tekuk dapat dicegah dengan memperkecil rasio lebar terhadap tebal pelat (b/t) sehingga meningkatkan koefisien tekuk (k). Nilai-nilai koefisien tekuk elastis k untuk penampang I pada tekanan yang sama ditunjukkan pada Gambar 3.10, dan untuk penampang kotak ditunjukkan pada Gambar 3.11. Menurut *N.S Trahair* dan *M.A Bradford (1988)*, tegangan tekuk dapat diketahui menggunakan Persamaan (3.17) dengan mengganti tebal pelat sebagai tebal sayap T .



Gambar 3. 10 Koefisien tekuk lokal untuk batang tekan penampang I (N.S Trahair dan M.A. Bradford, 1988)

Tampak pada Gambar 3.10 bahwa untuk batang tekan penampang I, selain dipengaruhi oleh rasio lebar sayap terhadap tinggi profil (b/d), nilai koefisien tekuk (k) juga dipengaruhi oleh rasio tebal sayap terhadap tebal badan (T/t). Semakin besar rasio lebar sayap terhadap tinggi profil (b/d) nilai k semakin besar dengan nilai $k_{\text{maks}} = 1$, sehingga kekuatan batang akan meningkat.

Berdasarkan Gambar 3.11 nilai koefisien tekuk (k) untuk penampang tertutup atau persegi dipengaruhi oleh rasio lebar badan terhadap tinggi penampang (b/d), selain itu juga dipengaruhi rasio tebal profil. Untuk penampang persegi semakin kecil rasio lebar badan terhadap tinggi penampang (b/d) nilai koefisien tekuk mendekati nilai minimum, sedangkan semakin besar rasio b/d nilai koefisien tekuk (k) mendekati nilai maksimum.



Gambar 3. 11 Koefisien tekuk lokal untuk batang tekan penampang kotak
(N.S Trahair dan M.A. Bradford, 1988)

3.5 Tegangan kritis metode AISC

AISC mengemukakan hitungan tegangan kritis yang mempertimbangkan tekuk lokal. Pengaruh tekuk lokal yang terjadi sebelum kekuatan kolom keseluruhan tercapai diperhitungkan dengan mengalikan tegangan maksimum yang dapat dicapai dengan faktor bentuk (Q). Faktor bentuk dipengaruhi oleh bentuk

penampang. Faktor bentuk dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.25) sebagai berikut :

$$Q = Q_a \cdot Q_s \quad (3.25)$$

dengan : Q_a = Faktor bentuk untuk elemen penampang yang diperkuat, Q_s = Faktor bentuk untuk elemen penampang yang tidak diperkuat.

Faktor bentuk Q_s diperhitungkan apabila,

$$\left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{250}{\sqrt{F_y}}\right) \text{ MPa} \quad (3.26)$$

Besar Q_s menurut AISC dinyatakan dalam Persamaan (3.27),

$$Q_s = 1,415 - 0,002694 \cdot \left(\frac{b}{t}\right) \sqrt{F_y} \text{ MPa} \quad (3.27)$$

Apabila semua elemen penampang diperkuat maka nilai $Q_s = 1,0$.

Besar nilai Q_a menurut AISC ditunjukkan oleh Persamaan (3.28) berikut ini,

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_{bruto}} \quad (3.28)$$

dengan : A_{ef} = luas efektif, A_{bruto} = luas bruto

Luas efektif diambil dari lebar efektif, besar lebar efektif menurut penelitian AISC yang dilakukan pada baja ringan dapat dihitung dengan Persamaan (3.29) di bawah ini,

$$\frac{b_E}{t} = \frac{21}{\sqrt{f}} \left(1 - \frac{4,18}{(b/t)\sqrt{f}} \right) \text{ MPa} \quad (3.29)$$

dengan f = tegangan yang bekerja pada elemen.

Besar tegangan kritis menurut AISC dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (3.30) di bawah ini.

$$F_{cr} = QF_y \left[1 - \frac{QF_y}{4\pi^2 E} \left(\frac{KL}{r} \right)^2 \right] \quad (3.30)$$

Apabila nilai KL/r maksimum yang diberi notasi C_c seperti ditunjukkan pada Persamaan (3.31),

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{QF_y}} \quad (3.31)$$

maka Persamaan (3.30) dapat ditulis kembali menjadi Persamaan (3.32)

$$F_{cr} = QF_y \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] \quad (3.32)$$

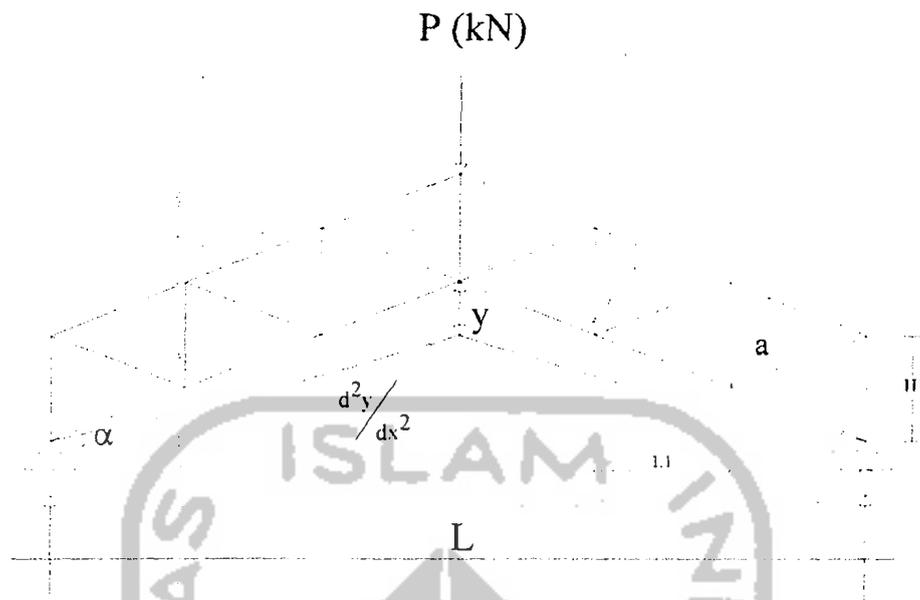
apabila nilai KL/r lebih dari nilai C_c maka tegangan kritis yang terjadi adalah,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.33)$$

3.6 Hubungan Beban – Lendutan

Beban titik pada puncak struktur kuda-kuda menyebabkan timbulnya lentur, sehingga struktur tersebut mengalami lendutan seperti terlihat pada Gambar 3.12.

Kuda-kuda dengan batang tepi sejajar memiliki nilai modulus elastisitas dan inersia (EI) konstan, sehingga untuk analisis lendutan, kuda-kuda rangka diasumsikan sebagai balok yang mempunyai tumpuan sederhana. Balok dengan tumpuan sederhana yang diberi beban transversal memiliki momen maksimum, semakin besar beban yang diberikan, makin besar pula momen dan lendutannya pada titik tersebut (*Ferdinand. L Singer dan Andrew Pytel, 1985*). Besarnya lendutan pada struktur rangka dapat didekati dengan persamaan diferensial kurva elastis balok yang ditunjukkan pada Persamaan (3.34).



Gambar 3. 12 Kuda-kuda yang mengalami lendutan (y) akibat beban aksial (P)

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (3.34)$$

karena nilai EI konstan, maka Persamaan (3.34) dapat diintegrasikan menjadi Persamaan (3.35) yang merupakan persamaan kemiringan kurva lendutan balok.

$$\frac{dy}{dx} = \int \frac{M}{EI} dx + C_1 \quad (3.35)$$

besarnya lendutan pada rangka dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan kemiringan kurva lendutan seperti ditunjukkan pada Persamaan (3.35) menjadi Persamaan (3.36).

$$y = \iint \frac{M}{EI} dx dx + \int C_1 dx + C_2 \quad (3.36)$$

$$y = \Delta = \iint \frac{M}{EI} dx dx + \int C_1 dx + C_2 \quad (3.37)$$

Beban terpusat di puncak struktur menimbulkan lendutan (Δ) yang dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.37) yang didekati dengan Persamaan (3.38) di bawah ini:

$$\Delta = \frac{P.L^3}{48 EI} \quad (3.38)$$

dengan : Δ = lendutan, P = beban, E = modulus elastis, L = panjang bentang kuda-kuda, I = momen inersia penampang

Kekakuan struktur adalah rasio beban terhadap lendutan yang terjadi, seperti terlihat pada Gambar 3.13 nilai kekakuan bisa diketahui menggunakan Persamaan (3.39).

$$k = \text{tg}\alpha = \frac{P_y}{\Delta_y} \quad (3.39)$$

Persamaan (3.39) merupakan nilai kekakuan struktur berdasarkan uji lentur. Menggunakan substitusi Persamaan (3.38) ke dalam Persamaan (3.39), nilai kekakuan struktur kuda-kuda batang tepi sejajar seperti pada Gambar 3.12 dapat didekati menggunakan Persamaan (3.40) di bawah ini:

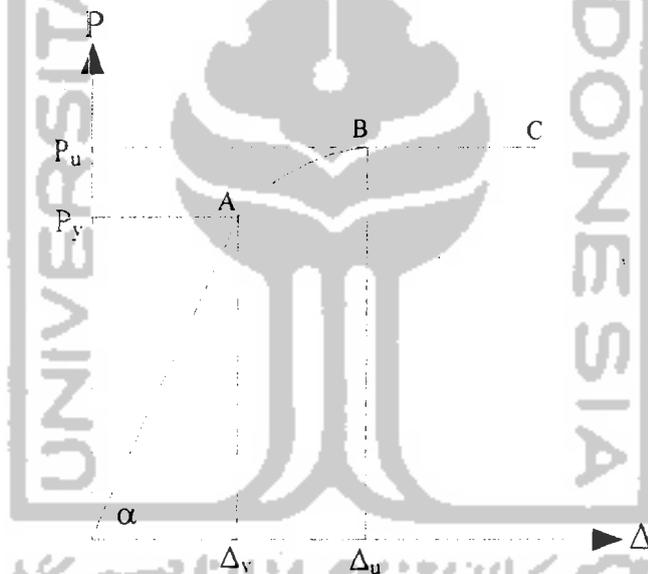
$$k = \frac{c.EI}{L^3} \quad (3.40)$$

dengan: c = konstanta; $I = (A \times a^2)$; E = modulus elastisitas; L = panjang bentang struktur kuda-kuda; A = luas penampang batang tepi; a = jarak antar batang tepi ($H1 \cdot \cos\alpha$), maka Persamaan (3.40) menjadi:

$$k = \frac{c.E.A.a^2}{L^3} \quad (3.41)$$

Berdasarkan Persamaan (3.40) terlihat bahwa jika semakin besar jarak antar batang tepi (a) dengan asumsi panjang bentang struktur kuda-kuda tetap, kekakuan struktur akan semakin meningkat.

Gambar 3.13 menunjukkan bahwa kekakuan struktur sampai dengan titik A bersifat elastis, terlihat dari garis hubungan beban – lendutan yang linier. Pada titik B kekakuan struktur sudah mencapai maksimum karena sudah bersifat inelastis dan beban tersebut struktur sudah tidak mampu lagi menahan penambahan beban namun deformasi yang terjadi terus bertambah sampai dengan titik C.



Gambar 3.13 Grafik Hubungan Beban (P)-Lendutan (Δ)

3.7 Hubungan Momen dengan Kelengkungan

Apabila suatu material diberi beban maka material tersebut secara langsung akan terdefleksi. Semakin besar beban yang diberikan pada suatu material semakin besar pula lendutan yang terjadi pada material tersebut seperti pada Gambar 3.13.

Kelengkungan adalah kurva defleksi dari struktur yang diakibatkan oleh beban yang bekerja pada struktur tersebut, seperti pada Gambar 3.12 struktur kuda-

kuda mengalami lendutan sebesar Δ . Menurut *Ferdinand L. Singer* dan *Andrew Pytel (1985)*, kelengkungan yang terjadi pada struktur dapat didekati menggunakan Persamaan (3.41) berikut :

$$\kappa = \frac{d^2y/dx^2}{(1+(dy/dx)^2)^{3/2}} = \frac{M}{EI} \quad (3.41)$$

karena lendutan dianggap kecil, sehingga kurva elastis mendekati datar, harga dan kemiringan kurva (dy/dx) pada setiap titik sangat kecil sehingga Persamaan (3.41) dapat ditulis kembali menjadi Persamaan (3.42).

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (3.42)$$

Mengacu pada metode *Central Difference*, yaitu metode yang menggunakan tiga titik tinjau yang saling berurutan dan jarak antar titik sebesar Δx , berdasarkan Gambar 3.14 dan Persamaan (3.42), dy/dx didekati dengan Persamaan berikut :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.43)$$

turunan Persamaan (3.43) adalah

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x)(d/dx)(y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1})(d/dx)(2\Delta x)}{(2\Delta x)^2} \quad (3.44)$$

karena $(2\Delta x)$ adalah konstan maka

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

Sehingga Persamaan (3.44) menjadi

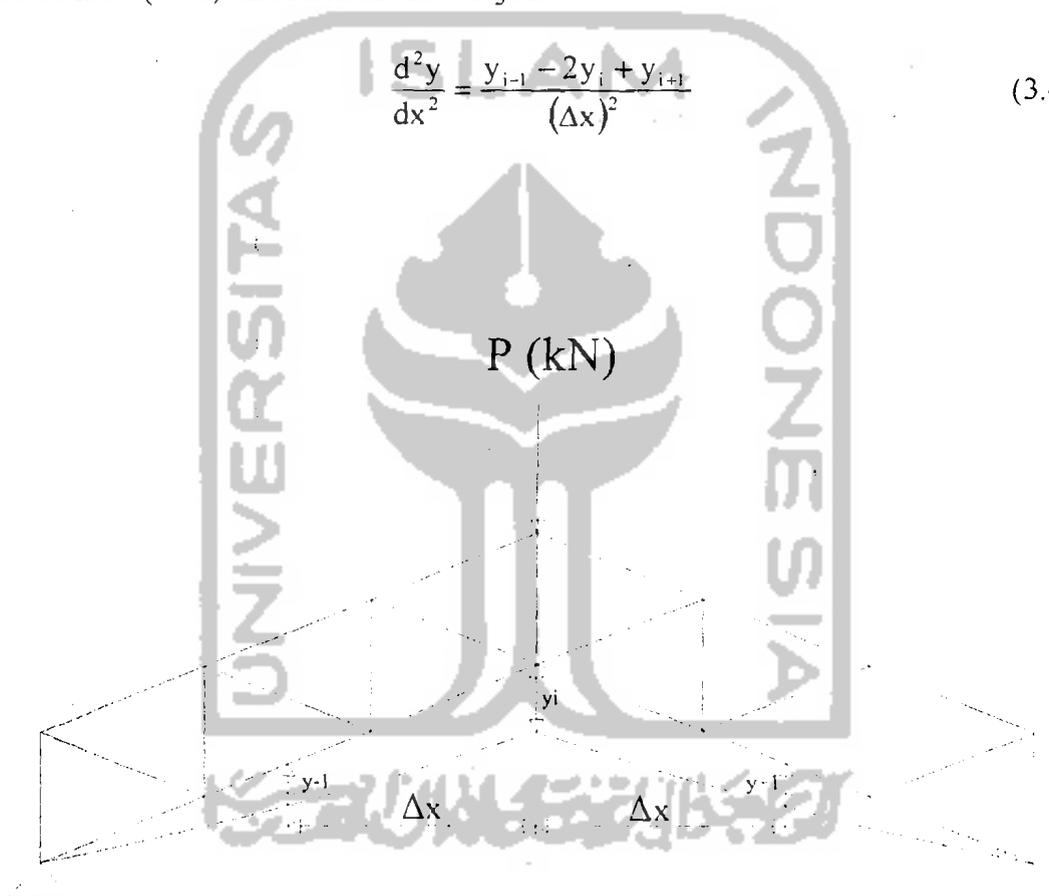
$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(2\Delta_x)(d. dx)(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.45)$$

selanjutnya dari Persamaan (3.45) didapatkan

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.46)$$

Persamaan (3.46) disederhanakan menjadi

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



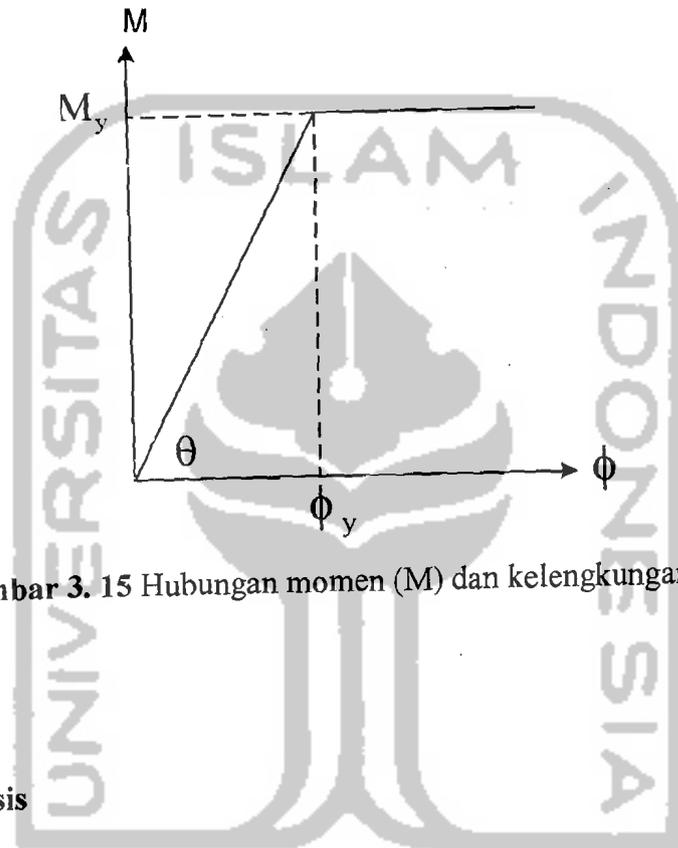
Gambar 3. 14 Rangka kuda-kuda yang diberi beban aksial (P)

bila $\frac{d^2y}{dx^2} = \phi$, maka Persamaan (3.47) dapat ditulis kembali menjadi Persamaan

(3.48) berikut ini:

$$\phi = \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{(\Delta x)^2} \quad (3.48)$$

Jadi kelengkungan dapat dihitung dengan bantuan lendutan di tiga titik yang berurutan dengan jarak tiap titik adalah Δx . Hubungan momen (M) dan kelengkungan (curvature)(ϕ) ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Hubungan momen (M) dan kelengkungan (ϕ)

3.8 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka dan landasan teori, dapat diambil hipotesis sebagai berikut: terjadi tekuk lokal pada elemen tekan penyusunampang.