

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Pendahuluan

Keruntuhan pada balok dapat terjadi karena salah satu hal berikut ini :

1. Tegangan-tegangan yang terjadi pada balok melebihi kapasitas tegangan yang dapat diterima oleh material balok tersebut (untuk balok yang relatif besar).
2. Tegangan-tegangan yang terjadi pada balok menyebabkan balok berada dalam keadaan tidak stabil (untuk balok langsing).

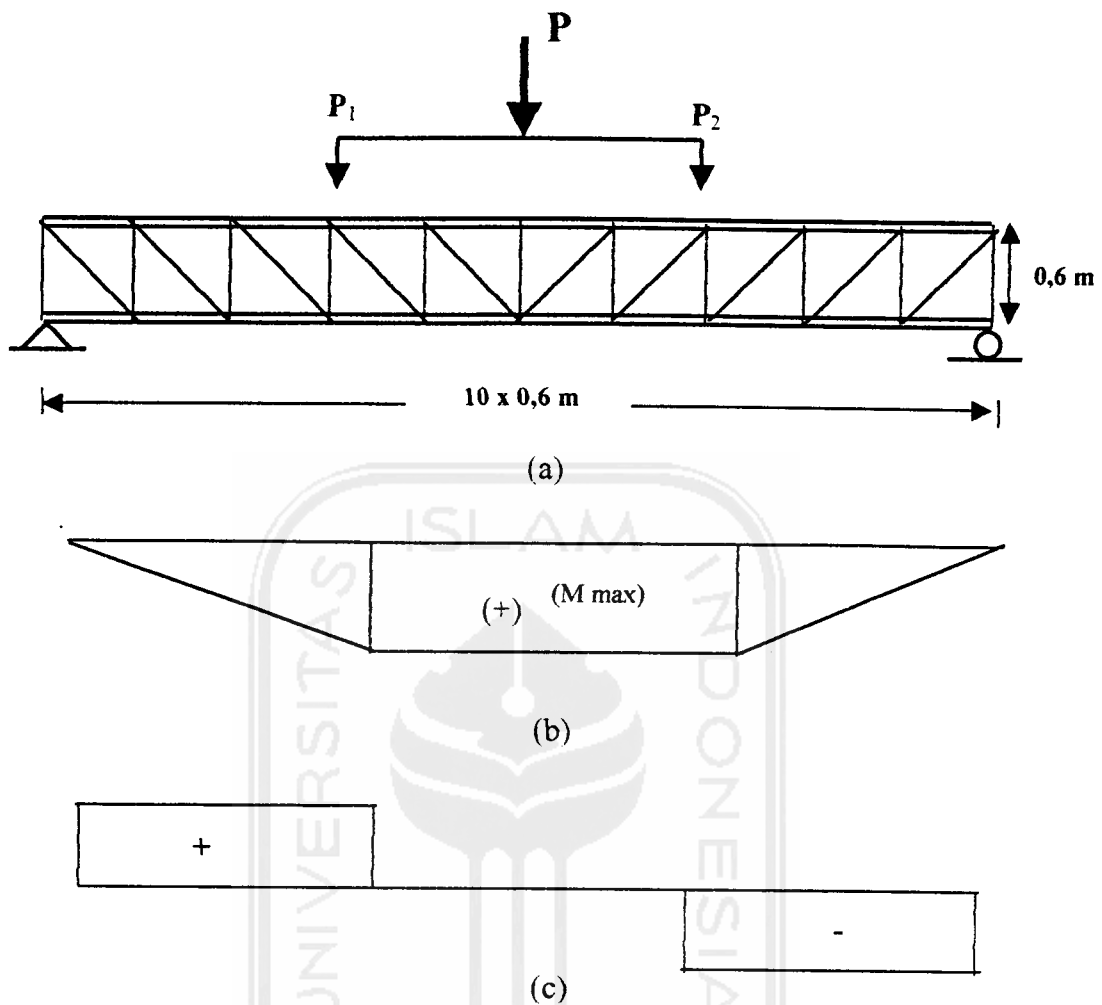
Ketidakstabilan pada balok biasanya dikenal sebagai masalah tekuk pada balok. Perilaku balok yang mengalami tekuk dapat diuraikan sebagai berikut : Sebuah balok yang dikenai beban yang bertambah secara perlahan-lahan akan mengalami lendutan pada arah beban yang diberikan sampai akhirnya balok tertekuk keluar bidang pembebanan. Keruntuhan dari balok langsing lurus dimulai saat penambahan tegangan pada keadaan tekuk lateral elastis menyebabkan leleh. Sebuah balok dengan ketebalan menengah dapat leleh sebelum beban tekuk tercapai, hal ini terjadi akibat pengaruh kombinasi tegangan momen dan residu, dan leleh dapat terjadi setelah tekuk plastis tercapai (*Chen, W.F dan Atsuta, T, 1997*)

Tekuk pada balok merupakan masalah kestabilan. Balok akan tetap stabil jika beban yang diterimanya relatif kecil, tetapi jika beban yang diterimanya terus

menerus diperbesar maka akan terjadi ketidakstabilan . Jika keseimbangan netral dianggap sebagai suatu keadaan transisi antara stabil dan labil, maka beban yang menyebabkan terjadinya keseimbangan netral disebut dengan beban kritis. Untuk itu, dalam menentukan beban kritis yang dapat diterima oleh balok dapat menggunakan konsep keseimbangan.

Struktur balok badan terbuka (*open web*) dengan tumpuan sederhana dapat dipandang sebagai struktur rangka batang, tampak pada Gambar (3.1.a.). Bila struktur tersebut menerima beban transversal yang tegak lurus dengan dengan sumbu longitudinal, maka struktur akan mengalami deformasi dan menerima momen, hal ini mengakibatkan terjadinya lentur pada balok. Pemberian beban lentur diatur sedemikian rupa sehingga beban lentur yang diterimanya adalah beban lentur searah (lentur yang terjadi pada satu bidang). Muatan biasanya dianggap bekerja pada *shear-centre* (titik pusat geser), sehingga torsi dapat diabaikan. (*Padosbajayo, 1994*).

Dalam proses analisis, yang perlu ditinjau adalah masalah momen. Nilai momen yang paling kritis akan sangat menentukan dalam perhitungan, seperti pada Gambar (3.1.b.). Besar momen maksimum (*M maks*) ini terjadi pada bagian elemen yang tidak mengalami gaya geser ($V = 0$), seperti pada Gambar (3.1.c.). Untuk diagram momen dan geser yang terjadi tampak pada Gambar (3.1.b.) dan Gambar (3.1.c.) ini digambar dengan mengabaikan berat balok sendiri dan hanya meninjau kedua beban terpusat (P).

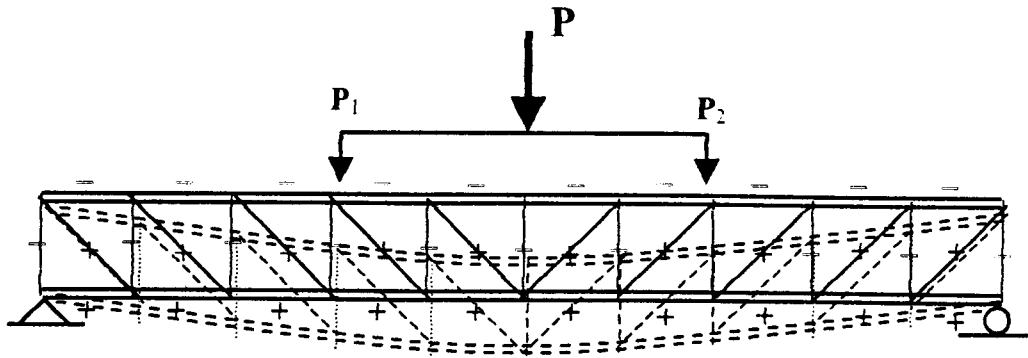


Gambar 3.1.(a). Peristiwa pembebanan dan lendutan.

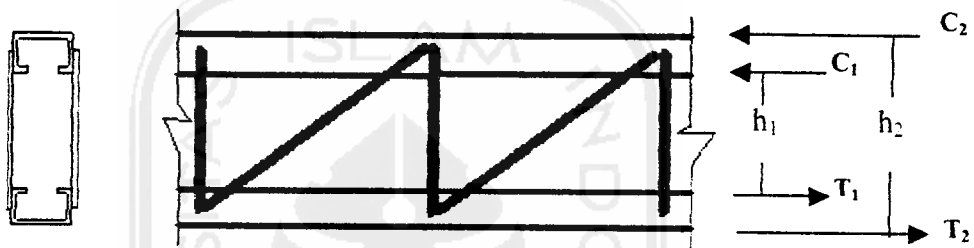
(b). Diagram momen.

(c). Diagram gaya geser

Jika ditinjau dari gaya-gaya yang bekerja, batang tepi atas dan batang vertikal pada struktur tersebut mengalami gaya tekan, stabilitas struktur tekan perlu mendapat perhatian karena sangat peka terhadap faktor-faktor yang dapat mengakibatkan tekuk (*buckling*), sedangkan pada batang bagian bawah dan batang diagonal akan mengalami gaya tarik seperti Gambar (3.2.a).



3.2. (a) Gaya batang yang terjadi



3.2. (b) Potongan melintang

Batang tekan dari profil diwaspadai, karena profil C canai dingin rawan terjadi tekuk (*buckling*). Gaya tekan $C = P_{cr}$ diperoleh berdasarkan tegangan kritis yang terjadi (P_{cr}) dikalikan dengan luas penampang (A), yaitu :

$$P_{cr} = F_{cr} \cdot A \quad (3.1)$$

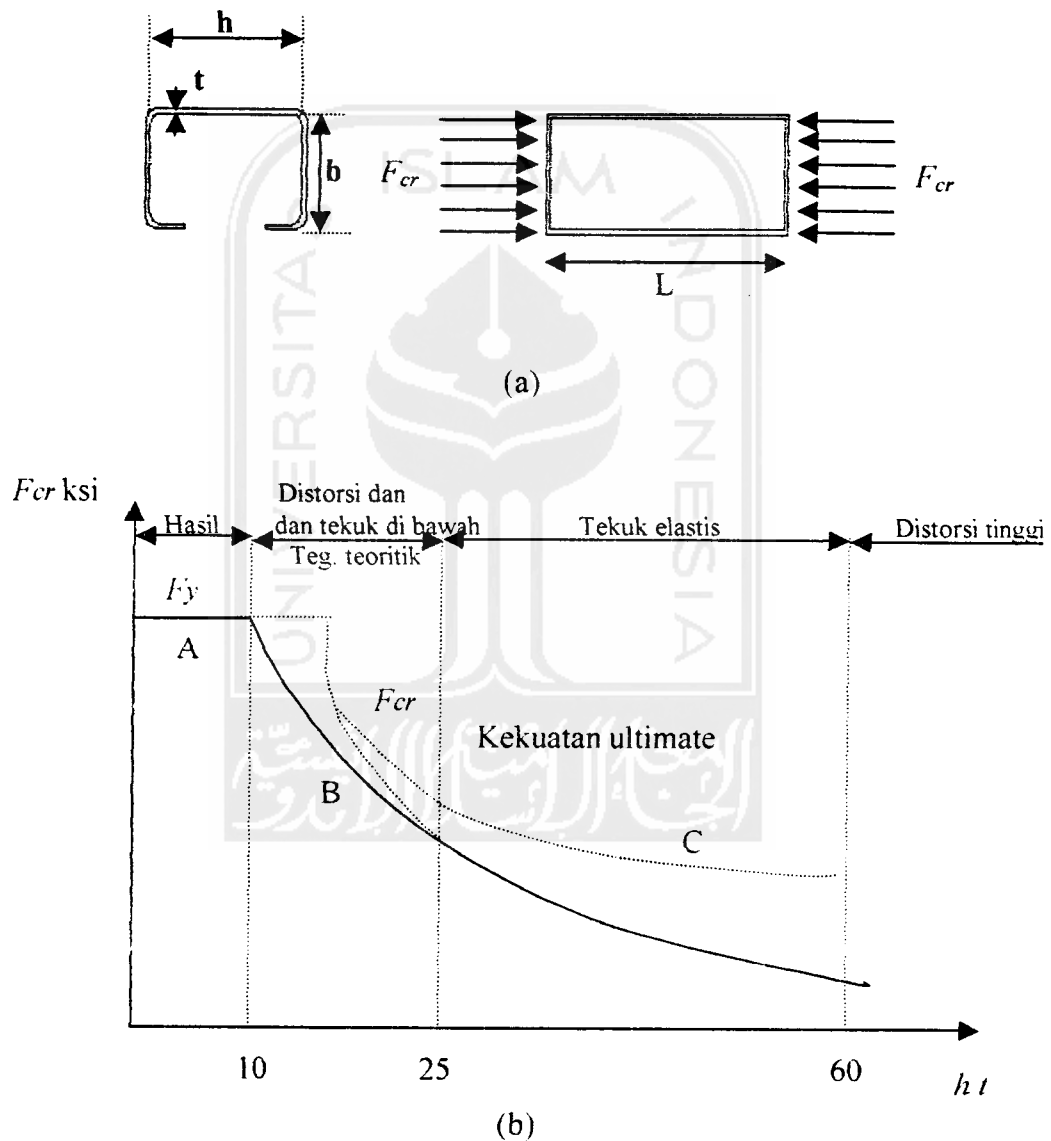
Mengacu pada Gambar (3.2.b), hubungan antara Momen Nominal dengan P_{cr} pada struktur rangka adalah :

$$M = P_{cr} \cdot h \quad (3.2)$$

$$M = C_1 \cdot h_1 + C_2 \cdot h_2 \quad (3.3)$$

Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar nilai h , maka momen nominalnya akan semakin besar, momen internal pada struktur rangka tersebut merupakan penjumlahan dari kopel gaya.

Tegangan kritis profil C canai dingin yang dianalisis berperilaku sebagai pelat dipengaruhi oleh rasio (h/t) pada badan dan nilai (b/t) pada sayap, semakin tinggi nilai perbandingan (h/t) atau (b/t), maka tegangan kritisnya semakin rendah dapat dilihat pada Gambar (3.3.b) (Salmon dan Johnson, 1990).



Gambar 3.3. (a) Perilaku Elemen

(b) Grafik hubungan h/t dengan F_y

Boris Bresler/T.Y. Lin/John B. Scalzi, mengemukakan elemen dengan harga (b/t) kurang dari 10, maka $F_{cr} = F_y$. Hubungan antara kuat tekan dan (b/t) tersebut ditunjukkan pada kurva A, pada Gambar (3.3.b).

Pada elemen dengan (b/t) lebih besar dari 10 kurang dari 25 tekuk lokal dapat terjadi pada tegangan di bawah tegangan tekuk teoritis. Tegangan kritis untuk elemen tersebut mendekati F_y dan F_{cr} pada (b/t) sama dengan 25, ditunjukkan pada kurva B.

Pada elemen dengan (b/t) antara 25 dan 60 penyimpangan dapat terjadi pada tegangan sama dengan atau lebih besar dari tegangan tekuk teoritis F_{cr} , ditunjukkan pada kurva C.

Pada elemen dengan (b/t) lebih besar dari 60 penyimpangan tegangan kritisnya sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa elemen-elemen tersebut tidak dapat digunakan untuk struktur.

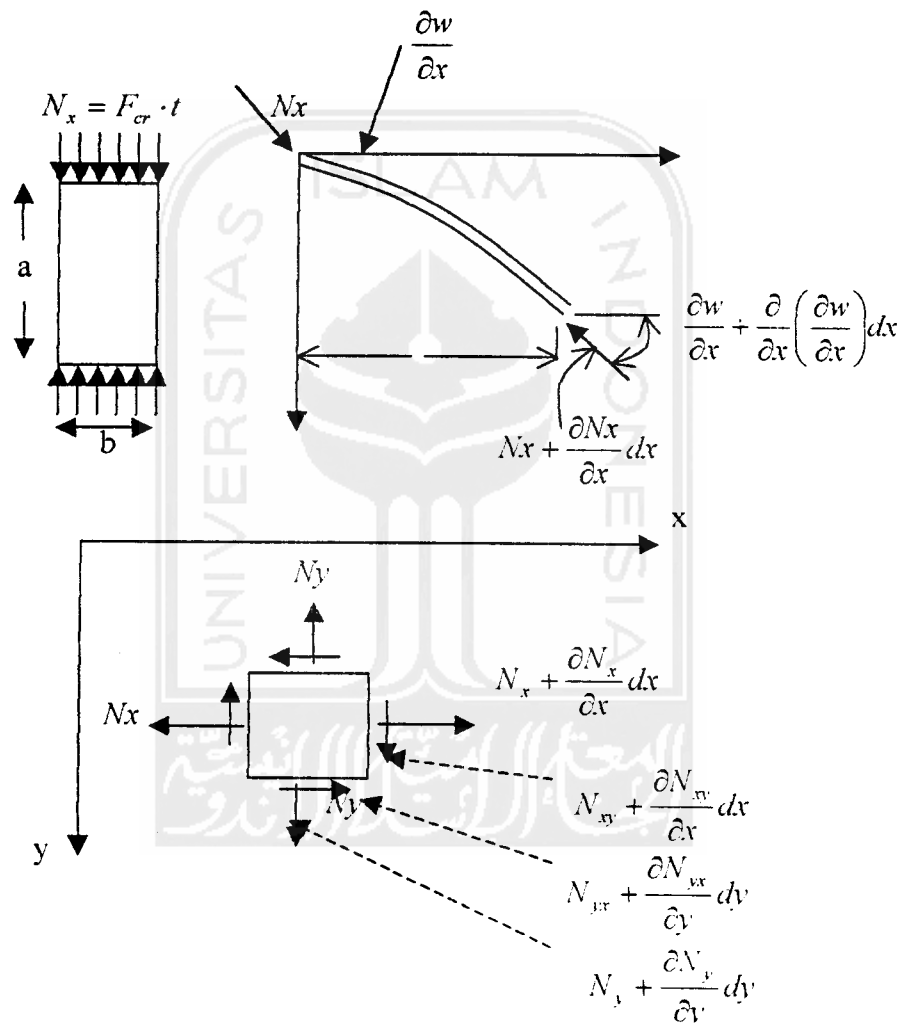
Sebagian besar profil C canai dingin memiliki perbandingan (h/t) yang cukup besar di atas 10 sehingga tegangan kritis yang terjadi jauh di bawah tegangan lelehnya.

3.2. Tekuk Pelat yang Ditekan Secara Merata

Pada penampang profil C canai tersusun dari elemen-elemen pelat. Tinjauan kemungkinan tekuk batang tidak hanya berdasarkan angka kelangsingan untuk penampang lintang secara keseluruhan saja, melainkan juga perlu meninjau kemungkinan adanya tekuk setempat (lokal), karena tekuk lokal dapat terjadi lebih dahulu pada salah satu elemen pelat pembentuk penampang. Tekuk setempat menyebabkan elemen yang tertekuk tidak dapat memikul beban yang harus

diterimanya, jika ada beban tambahan; dengan kata lain, efisiensi penampang lintang berkurang. (Salmon dan Johnson, 1994).

Tekuk Pelat perlu ditinjau terhadap komponen gaya tekan N_x bila pelat tersebut terdefleksi ke posisi sedikit tertekuk, dengan q yang menyatakan komponen beban transversal akibat lenturan pelat.



Gambar 3.4. a. Pelat yang mendapat tekan merata

b. Elemen pelat dalam posisi lentur

c. Pelat-pelat pada sumbu x dan y

Penjumlahan gaya-gaya dalam arah z pada elemen pelat dari Gambar (3.4),
memberikan :

$$N_x \cdot dy \frac{\partial w}{\partial x} - \left(N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx \right) dy \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \right) = q dx dy \quad (3.4)$$

$$- \left(N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial N_x}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) dy dx = q dy dx \quad (3.5)$$

yang dengan pengabaian suku kecil berordo tinggi memberikan :

$$q = -N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

Kemudian, persamaan diferensial untuk lentur pelat homogen :

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q \quad (3.7)$$

Menjadi :

$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \frac{N_x}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (3.8)$$

Yang merupakan persamaan *diferensial parsial* dimana w merupakan fungsi x dan y . Defleksi w dapat dinyatakan sebagai perkalian dalam fungsi x , (X), dan fungsi y , (Y). Lagi pula tekuk dapat diasumsikan memberikan variasi sinusoidal dalam arah x , dengan demikian :

$$w = X(x) Y(y) \quad (3.9)$$

Dengan memisalkan :

$$X(x) = \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (3.10)$$

Dimana fungsi X memenuhi syarat defleksi nol dan momen nol dari tumpuan sederhana pada $x = 0$ dan $x = a$. Substitusi Persamaan (3.9) ke dalam Persamaan (3.8), setelah eliminasi suku $\sin m\pi x/a$, akan memberikan :

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^4 Y - 2\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{d^4 Y}{dy^4} = + \frac{Nx}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 Y$$

$$\left(\frac{d^4 Y}{dy^4}\right) - 2\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2}\right) + \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^4 - \frac{Nx}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2\right] Y = 0 \quad (3.11)$$

Sebuah persamaan differensial homogen biasa berpangkat empat.

Penyelesaiannya dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$Y = C_1 \sinh \alpha y + C_2 \cosh \alpha y + C_3 \sin \beta y + C_4 \cos \beta y \quad (3.12)$$

Dimana :

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \sqrt{\frac{Nx}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}} \quad \text{dan} \quad \beta = \sqrt{-\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \sqrt{\frac{Nx}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}}$$

Dengan demikian, persamaan defleksi pelat keseluruhan adalah :

$$w = \left(\sin \frac{m\pi x}{a}\right) (C_1 \sinh \alpha y + C_2 \cosh \alpha y + C_3 \sin \beta y + C_4 \cos \beta y) \quad (3.13)$$

Yang memenuhi syarat batas. Dengan mengasumsikan sumbu x sebagai sumbu simetri pelat, yaitu kondisi tumpuan sepanjang kedua tepi yang sejajar arah pembebanan, koefisien fungsi yang ganjil C_1 dan C_3 harus sama dengan nol.

Dengan demikian :

$$w = \left(\sin \frac{m\pi x}{a}\right) (C_2 \cosh \alpha y + C_4 \cos \beta y) \sin (m\pi x/a) \quad (3.14)$$

Dengan kondisi tumpuan sederhana di $y = b/2$ dan $y = -b/2$, syarat di $y = \pm b/2$ adalah :

$$w = 0 = \left(\sin \frac{m\pi x}{a} \right) \left(C_2 \cosh \alpha \frac{b}{2} + C_4 \cos \beta \frac{b}{2} \right)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 = \left(\sin \frac{m\pi x}{a} \right) \left(C_2 \alpha^2 \cosh \alpha \frac{b}{2} + C_4 \beta^2 \cos \beta \frac{b}{2} \right) \quad (3.15)$$

Untuk penyelesaian selain $C_2 = C_4 = 0$, determinan koefisien-koefisien lain harus sama dengan nol. Dengan demikian, maka :

$$(\alpha^2 + \beta^2) \cosh \alpha \frac{b}{2} \cos \beta \frac{b}{2} = 0 \quad (3.16)$$

Karena $\alpha^2 \neq -\beta^2$ kecuali bila $Nx = 0$ (penyelesaian *trivial*), dan karena $\cosh \alpha (b/2) > 1$ satu-satunya cara agar Persamaan (3.16) dapat dipenuhi dalam persoalan nyata adalah untuk :

$$\cos \beta \frac{b}{2} = 0$$

Maka dari itu :

$$\beta \frac{b}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \text{ dan seterusnya.}$$

Dengan menggunakan harga terendah dari $\beta (b/2)$ dan mensubstitusikan ke dalam β seperti yang didefinisikan di bawah ini, Persamaan (3.12) memberikan :

$$\frac{b}{2} \sqrt{-\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \sqrt{\frac{Nx}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}} = \frac{\pi}{2}$$

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

$$Nx = D \left[\frac{\pi^2 E}{b^2 m \pi} + \frac{m\pi}{a} \right]^2$$

$$Nx = \frac{D\pi^2}{b^2} \left[\frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \quad (3.17)$$

Karena $Nx = F_{cr}t$ dan $D = Et^3 [12(1-\mu^2)]$, tegangan tekuk elastis dapat dinyatakan sebagai :

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (3.18)$$

Dengan kasus khusus yang dibahas di sini :

$$k = \left[\frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \quad (3.19)$$

Koefisien tekuk k merupakan fungsi dari jenis tegangan (dalam kasus ini tekanan merata pada dua tepi yang berlawanan) dan kondisi tumpuan tepi (dalam kasus ini, tumpuan sederhana pada keempat tepi), di samping resiko aspek a/b yang muncul secara langsung dalam persamaan tersebut.

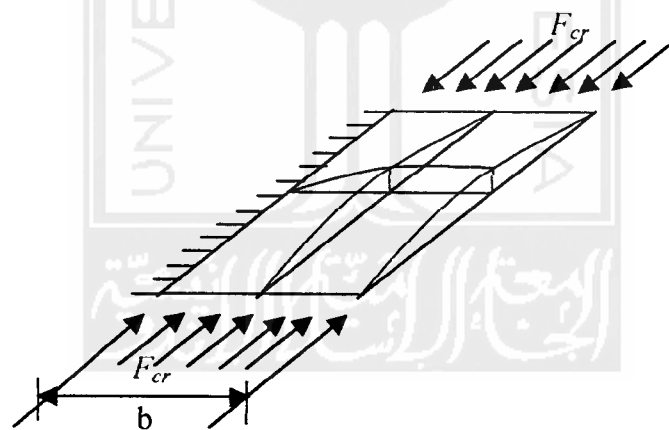
Persamaan untuk tekuk pelat pada Persamaan (3.18), sepenuhnya bersifat umum dalam bentuk k dan penurunanannya untuk kasus yang dibahas disini dapat dianggap sebagai ilustrasi prosedur bagi kasus lainnya. Bilangan bulat m menunjukkan banyaknya separuh gelombang yang terjadi dalam arah x pada saat tekuk. Gambar (3.7) menunjukkan bahwa ada harga k minimum untuk jumlah separuh gelombang tertentu, yakni kondisi terlemah. Perhatikan bahwa situasi terlemah ini terjadi pada saat panjang pelat merupakan kelipatan bulat dari lebarnya, dan bahwa kelipatan ini sama dengan banyaknya separuh gelombang.

Jadi, 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 (*Salmon dan Johnson, 1994*).

3.2.1. Tekuk Lokal

Bila sebuah pelat dipengaruhi secara langsung oleh desakan, lenturan, atau tegangan geser atau oleh gabungan tegangan-tegangan tersebut, maka pelat akan mengalami tekukan secara setempat sebelum seluruh elemen mengalami kegagalan. Tegangan yang berkompresi secara merata akan mencapai tegangan tekuk, dimana bila tegangan tekuk dicapai maka pelat akan melentur dengan membentuk gelombang yang dipengaruhi oleh syarat-syarat tepi (syarat-syarat batas) dan perbandingan panjang dan lebar (a/b) dengan pendistribusian kembali yang dihasilkan oleh tegangan desak dan penambahan beban, sampai keseluruhan pelat tersebut tertekuk. (*Joseph E. Bowles, 1985*).

3.2.1.1. Tekuk Lokal pada Sayap



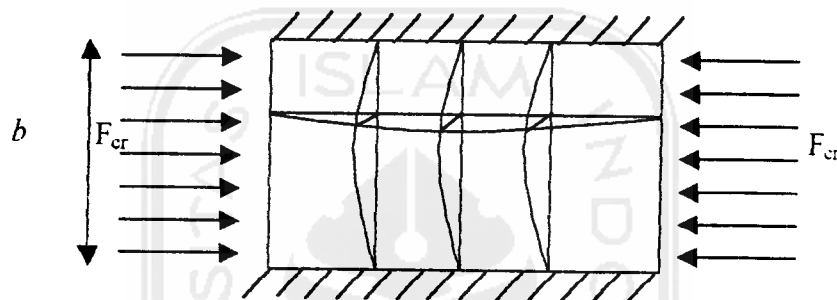
Gambar 3.5. Tekuk pada Sayap (jepit-bebas)

Stabilitas pada sayap dengan kondisi tumpuan tepi jepit-bebas seperti pada Gambar (3.5) sebelum mengalami tekuk diwakili oleh Persamaan (3.20) berikut ini :

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (3.20)$$

Dengan : b adalah lebar sayap, E adalah modulus elastis = 2×10^5 Mpa, angka poisson μ diambil 0,3 (untuk baja dan rasio lebar dengan ketebalan (b/t)), nilai k untuk kondisi yang ditunjukkan pada Gambar (3.5) dan perbandingan L/b , seperti pada Gambar (3.7) diperoleh $k = 0.425$. Dari Persamaan (3.4) untuk $F_y = F_{cr} = 240$ Mpa, diperoleh $b/t = 17,882$.

3.2.1.2. Tekuk Lokal pada Badan



Gambar 3.6. Tekuk horizontal pada Badan (jepit-jepit)

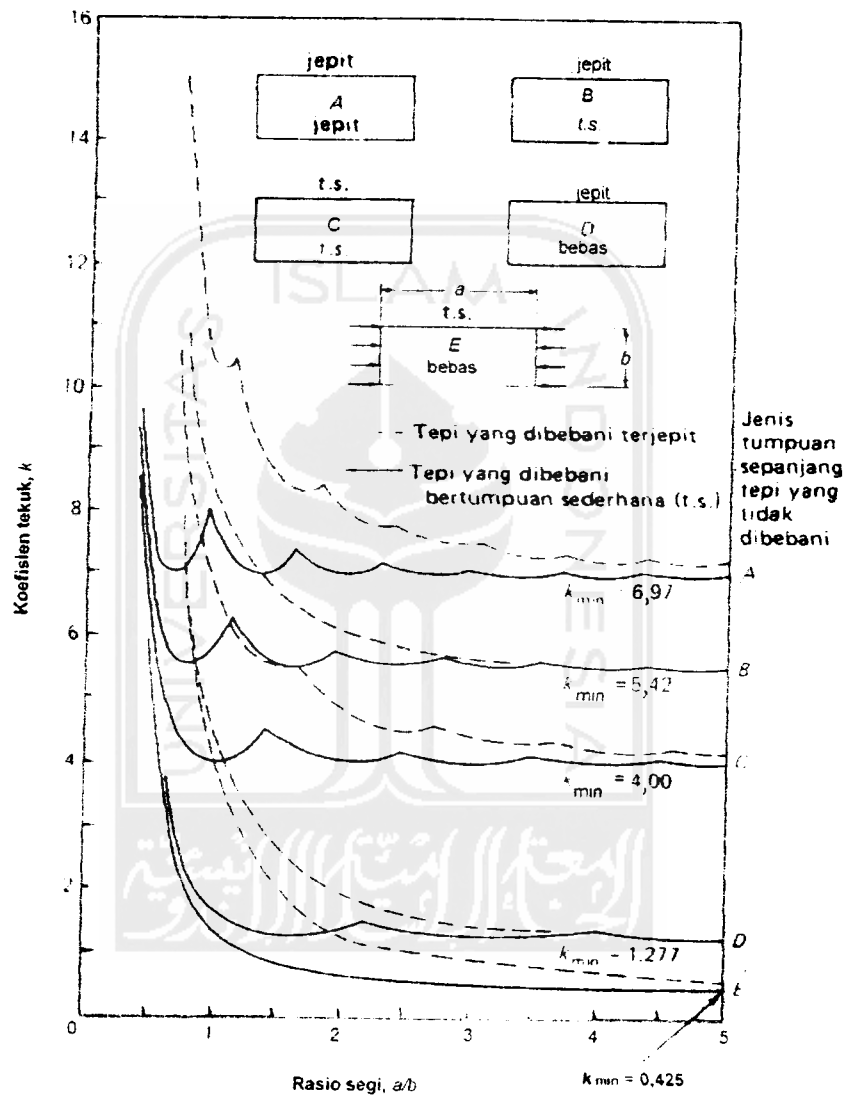
Stabilitas pada badan dengan kondisi tumpuan tepi jepit-jepit sebelum mengalami tekuk seperti pada Gambar (3.6) diwakili oleh Persamaan (3.21) berikut ini:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad (3.21)$$

dengan nilai k untuk kondisi yang ditunjukkan pada Gambar (3.6) dan perbandingan rasio lebar terhadap tebal (b/t), seperti pada Gambar (3.7) diperoleh $k = 4$. Dari persamaan (3.20) untuk $F_y = F_{cr} = 240$ Mpa, diperoleh $h/t = 54,86$.

Dari persamaan tersebut dapat diambil kesimpulan, bahwa semakin besar b/t (pada sayap) atau h/t (pada badan) maka tegangan F_{cr} semakin rendah karena itu untuk meningkatkan nilai tegangan kritis dilakukan dengan cara memberi

pengaku pada tepi-tepi pelat, sehingga akan menaik nilai k , misalnya dari kondisi jepit-bebas dengan k mendekati 0.425 diubah menjadi kondisi jepit-jepit dengan nilai k antara 0,425 dan 4.

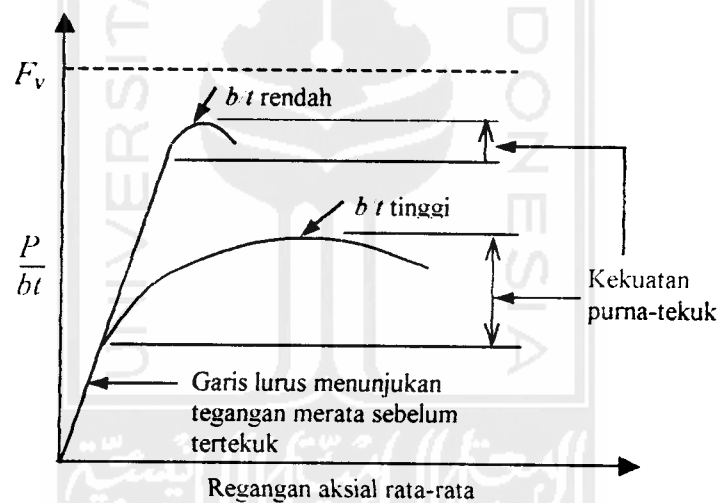


Gambar 3.7. Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada pelat segi empat datar.

(diambil dari Gerrard dan Becker, 1957)

Nilai k dipengaruhi oleh perbandingan dari (L/b) dan kondisi dari tepi-tepi pelat dimana semakin besar nilai (L/b) maka nilai k akan semakin kecil, dengan demikian F_{cr} akan semakin kecil nilai k mendekati 0,425, untuk perbandingan $(L/b) \geq 5$ dan kondisi tepi-tepi pelat adalah tumpuan sederhana-bebas.

Charles G. Salmon dan John E. Johnson menyatakan bahwa pelat yang mempunyai (b/t) relatif besar (badan tidak kompak) kemungkinan mengalami tekuk setempat (*local buckling*) yang sangat besar akibat beban aksial, kemungkinan terjadi pelat akan akan leleh pada sekitar 40% dari kekuatan nominal yang disebut sebagai leleh *premature* seperti terlihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Kelakuan pelat yang mengalami tekan tepi

3.2.2. Tekuk Primer

Batang tekan (*compression member*) adalah elemen struktur yang mendukung gaya tekan aksial. Walaupun di dalam struktur sesungguhnya jarang dijumpai batang yang benar-benar hanya mendukung gaya tekan aksial. Umumnya pada batang tekan bekerja juga gaya-gaya lain, misalnya momen

lentur, gaya lintang dan torsi. Dalam berbagai kasus sering dijumpai kombinasi tekan lentur dengan momen kecil sehingga dapat dipandang sebagai batang tekan saja.

Pada tampang batang tekan akan terjadi tegangan normal akibat gaya aksial, dan tegangan lentur akibat momen. Batang akan mengalami kegagalan akibat tekuk (*buckling*) jika kombinasi kedua tegangan ini mencapai tegangan leleh bahan. Batang yang gemuk akan mengalami kegagalan akibat tekuk dengan tegangan normal cukup besar, sedang tegangan lenturnya masih kecil. Sebaliknya, batang langsing akan mengalami kegagalan akibat tekuk dengan tegangan normal kecil, disertai tegangan lentur besar. (*Padosbajayo, 1994*).

Charles G. Salmon dan John E. Johnson, mengemukakan bahwa pada persamaan tekuk Euler jika pada sisi kiri dan kanan dibagi dengan A , dengan $A = L r^2$ sehingga Persamaan (3.22) tersebut dapat ditulis sebagai berikut ini :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(Lk/r)^2} \quad (3.22)$$

dengan r = jari-jari inersia dan (L/r) = kelangsingan. Dari persamaan tekuk tersebut dapat diketahui bahwa semakin langsing suatu batang kemungkinan terjadinya tekuk akan semakin tinggi dan kuat tekannya semakin kecil.

3.3. Batang tarik

Batang tarik adalah batang yang mengalami tegangan tarik aksial akibat beban kerja pada ujung-ujung batang. Desain komponen tarik merupakan persoalan yang paling sederhana dibandingkan perencanaan struktur yang lain.

Meskipun stabilitas bukan merupakan kriteria utama dalam desain batang tarik, namun batang tarik perlu dibatasi panjangnya untuk menjaga agar tidak terlalu fleksibel. Batang tarik yang terlalu panjang akan mempunyai lendutan besar yang disebabkan oleh berat batang tarik itu sendiri. Terlebih lagi batang akan bergetar bila menahan gaya-gaya angin atau alat-alat yang bergetar, seperti *fans* atau *compressors*. Ada kriteria kekakuan, berdasarkan kelangsingan (*slenderness ratio*) L/r dari batang, dimana L = panjang batang dan r = jari-jari inersia. Kelangsingan batang tarik menurut AISC ditunjuk pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Persyaratan Batang Tarik

Kelangsingan (L/r)	AISC	PPBBI
Untuk batang Utama	240	240
Untuk batang skunder	300	300

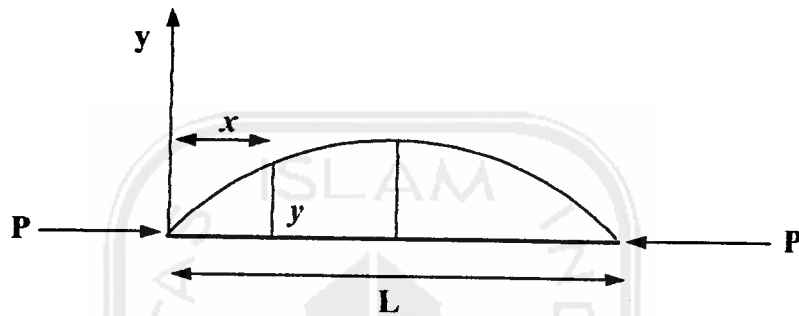
3.4. Batang Tekan

Secara garis besar ada 2 macam batang yang mengalami gaya tekan dalam suatu konstruksi, yaitu:

- a. Batang tekan yang merupakan batang dari suatu rangka batang. Batang ini mengalami gaya tekan aksial searah panjang batangnya. Umumnya dalam suatu rangka, batang tepi atas merupakan batang tekan, dan
- b. Kolom, merupakan batang tekan tegak yang bekerja untuk menahan balok-balok loteng, rangka atap, lintasan *crane* dalam pabrik, dan sebagainya (Oentoeng, 1999).

Menurut Persamaan Euler kekuatan batang tekan dinyatakan dengan rumus $P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada uraian berikut :

Akibat beban (P) dan pelenturan (y), pada penampang tersebut bekerja momen lentur, seperti pada Gambar 3.9.berikut ini :



Gambar 3.9. Batang lurus dibebani gaya aksial desak

Dari Gambar 3.11 dapat diketahui :

$$M = -P \cdot y \quad (3.23.a)$$

Karena $M = EI \frac{d^2 \cdot y}{dx^2}$, maka Persamaan (3.23.a) menjadi :

$$EI \frac{d^2 \cdot y}{dx^2} = -P \cdot y \quad (3.23.b)$$

Dengan, E = Modulus elastisitas, P = gaya aksial, I = inersia dan y = pelenturan.

Penyelesaian Persamaan (3.23.b) menghasilkan beban kritis (P_{cr}) berikut :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (3.24)$$

Dari Persamaan (3.24.), jika masing-masing ruas dibagi dengan luas penampang (A), maka akan diperoleh tegangan kritis (F_{cr}).

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{A \cdot L^2} \quad (3.25.a)$$

Karena $\frac{A}{I} = \frac{1}{j^2}$, maka Persamaan (3.25.a) menjadi :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(L/i)^2} \quad (3.25.b)$$

bila L pada Persamaan (3.25.b) diganti dengan panjang tekuk (Lk) diperoleh :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(Lk/i)^2} \quad (3.26)$$

dengan (Lk/i) adalah kelangsingan (λ), dimana harga k dicari dari Gambar 3.10.

Bentuk kolom yang tertekuk ditunjukkan oleh garis terputus	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Harga K teoretis	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Harga perencanaan yang disarankan bila kondisi ideal hanya merupakan pendekatan	0,65	0,80	1,0	1,2	2,10	2,0
Tanda kondisi ujung	Rotasi tak mungkin, Translasi tak mungkin Rotasi bebas, Translasi tak mungkin Rotasi tak mungkin, Translasi bebas Rotasi bebas, Translasi bebas					

3.10. Gambar faktor panjang efektif (k) untuk kolom yang dibebani secara terpusat dengan berbagai kondisi ideal.

3.5. Alat Sambung Las

Proses pengelasan merupakan proses penyambungan dua batang atau lebih dengan pemanasan samapai keadaan plastis, dengan atau tanpa tekanan. Panas yang digunakan untuk mencairkan logam dasar dan bahan pengisi agar terjadi aliran bahan (atau terjadi peleburan) serta untuk menaikkan daktilitas sehingga aliran plastis dapat terjadi.

Proses pengelasan yang digunakan pada penelitian ini adalah proses pengelasan busur nyala logam terlindung atau SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Dimana pada proses ini merupakan proses yang paling sering digunakan untuk pengelasan baja struktural maupun non-struktural. Proses SMAW sering disebut proses elektroda tongkat manual. Pemanasan dilakukan dengan busur listrik menyala antara elektroda yang dilapis dengan bahan yang akan disambung. Logam elektroda (kawat las) akan habis karena dipindahkan ke beban dasar selama proses pengelasan, sedangkan lapisannya sebagian dikonversi menjadi gas pelindung, sebagian menjadi terak (*slag*) dan sebagian lagi diserap oleh logam las. Bahan pelapis elektroda adalah campuran seperti lempung yang terdiri dari pengikat silikat dan bahan bubuk, seperti flour, karbonat, oksida, paduan logam dan selulosa. Campuran ini ditekan dan dipanasi hingga diperoleh lapisan konsentris kering yang keras. Lapisan elektroda ini mempunyai fungsi :

- a. Menghasilkan gas pelindung untuk mencegah masuknya udara dan membuat busur stabil.
- b. Memberikan bahan lain, seperti unsur pengurai oksida, untuk memperhalus struktur butiran pada logam las.

- c. Menghasilkan lapisan terak di atas kolam yang cair dan memadatkan las untuk melindungi dari oksigen dan nitrogen dalam udar, serta memperlambat pendinginan.

Bahan elektroda ditentukan dan dispesifikasikan oleh *American Welding Society*. Identifikasi seperti E70XX menunjukkan kekuatan tarik 70 *ksi*. Huruf XX menyatakan faktor-faktor seperti posisi pengelasan, sumber listrik yang disarankan, jenis lapisan, dan jenis karakteristik busur nyala (*Salmon dan Johnson, 1994*).

Salah satu las yang mendominasi aplikasi struktural adalah las sudut. Las sudut adalah las yang teoritis mempunyai penampang melintang segitiga, yang menggabungkan dua permukaan yang membentuk sudut. Dan kekuatan las tergantung pada arah beban yang bekerja, yang dapat sejajar atau tegak lurus terhadap sumbu las (*Spiegel dan Limbrunner, 1991*).

AISC menyatakan kriteria kekuatan las E70XX dalam desain untuk las sudut seperti pada tabel 3.2. berikut ini :

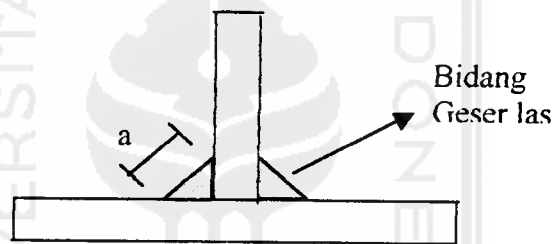
Tabel 3.2. Kekuatan las (kips per inci panjang)

Ukuran las (in)	E70XX SMAW	E70SAW
1/16	0,925	1,31
1/8	1,85	2,63
3/16	2,78	3,94
1/4	3,70	5,25
5/16	4,63	6,56
3/8	5,55	7,88
7/16	6,48	8,81
1/2	7,40	9,73

Lanjutan Tabel 3.2. Kekuatan las (kips per inci panjang)

Ukuran las (in)	E70XXSMAW	E70SAW
9/16	8,33	10,66
5/8	9,25	11,59
11/16	10,18	12,52
3/4	11,10	13,45
13/16	12,03	14,37
7/8	12,95	15,30

Perhitungan kekuatan las seperti berikut ini :



Gambar 3.11 Las Sudut

Luas penampang las,

$$A = Ln \cdot a \quad (3.27)$$

a = tebal rigi-rigi las

$$Ln = \text{panjang bersih las} = Lbr - 3 \cdot a$$

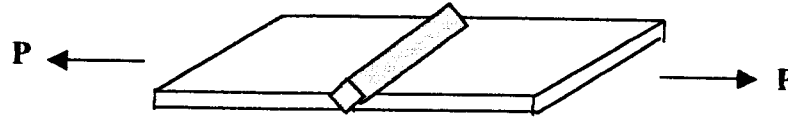
PPBBI menggunakan rumus *Huber Hencky* untuk menghitung kekuatan las, seperti berikut ini :

$$P = \frac{F_{ijm} \cdot A}{\sqrt{(\sin^2 \alpha + 3 \cdot \cos^2 \alpha)}} \quad (3.28)$$

Dengan, F_{ijm} = tegangan dasar ijin dari elektroda las, A = luas penampang las, dan α = sudut yang dibentuk oleh arah gaya dengan bidang geser las.

Penggunaan rumus di atas pada keadaan khusus :

1. $P_{ijin} = F_{ijin} \cdot A$; untuk $\alpha = 90^\circ$.



Gambar 3.12. Las sudut dengan sudut $\alpha = 90^\circ$.

2. $P_{ijin} = 0,58 \cdot F_{ijin} \cdot A$; untuk $\alpha = 0^\circ$.



Gambar 3.13. Las sudut dengan untuk $\alpha = 0^\circ$.

syarat tebal las : $a \leq \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot t$

syarat panjang las : $10 \cdot a \leq Ln \leq 40 \cdot a$

3.6. Tegangan Residu

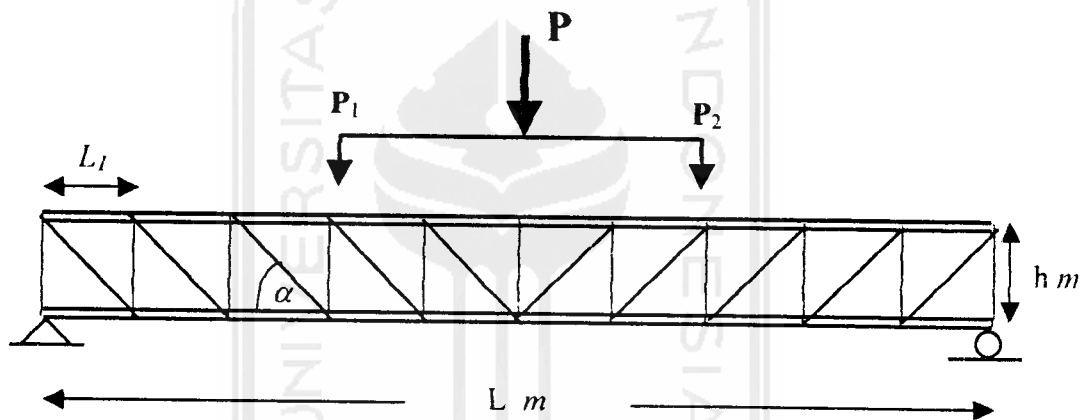
Tegangan residu atau tegangan sisa (*residual stress*) adalah tegangan yang tetap tinggal di dalam batang setelah batang baja selesai dibentuk produk akhir. Tegangan residu ada, karena di dalam batang baja terdapat deformasi plastis atau deformasi permanen. Deformasi plastis terjadi kerana beberapa sebab antara lain :

1. Pendinginan yang tidak merata setelah proses *hot-rolling*.
2. *Cold-bending* selama pabrikan.
3. Pengelasan. (*Salmon dan Johnson, 1994*).

3.7. Hubungan Sudut Batang Diagonal dan Pengaku pada Ujung Batang Vertikal dengan Batang Desak Horizontal Sisi Atas

Salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap kuat desak batang adalah kelangsingan. Semakin langsing suatu batang, semakin kecil kuat desaknya. Kelangsingan adalah rasio antara panjang tekuk (Lk) dengan jari-jari kelembaman atau *gyration* (r), seperti pada persamaan berikut ini :

$$\lambda = \frac{Lk}{r_{\min}} \quad (3.29)$$



Gambar 3.14. Panjang efektif batang desak (L_1)

Memperhatikan Gambar (3.14), maka dapat disimpulkan bahwa semakin kecil sudut (α) pada batang diagonal akan mengakibatkan batang tepi atas desak (L_1) lebih panjang (langsing) sehingga menjadikan batang batang tersebut mudah mengalami tekuk. Sebaliknya, semakin besar sudut (α) pada batang diagonal akan menjadikan batang tepi atas desak (L_1) lebih pendek sehingga batang tekuk akan dapat dikurangi. Tegangan kritis batang dengan kelangsingan semakin besar maka nilai F_{cr} akan semakin kecil dan sebaliknya jika suatu batang dengan kelangsingan semakin kecil maka nilai F_{cr} akan semakin besar.

Untuk kelangsingan suatu batang desak yang ujungnya diberi pengaku, AISC memberi batasan kelangsingan berupa keadaan kritis (C_c). Nilai C_c diwakili oleh Persamaan (3.25) berikut ini :

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot E}{Q \cdot F_y}} \quad (3.30)$$

dengan Q = faktor bentuk batang yang mengalami tekuk lokal.

Jika suatu batang desak harga $\frac{Lk}{r_{\min}} > C_c$, maka batang desak akan mengalami tekuk elastis, di mana tegangan kritisnya (F_{cr}) diwakili oleh Persamaan (3.26) berikut ini :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(Lk / r_{\min})^2} \quad (3.31)$$

Dan sebaliknya, jika harga $\frac{Lk}{r_{\min}} < C_c$, maka batang desak akan mengalami tekuk inelastis, dimana F_{cr} diwakili oleh Persamaan (3.27) berikut ini :

$$F_{cr} = Q \cdot \left[1 - \frac{(Lk/r)^2}{2C_c^2} \right] \cdot F_y \quad (3.32)$$

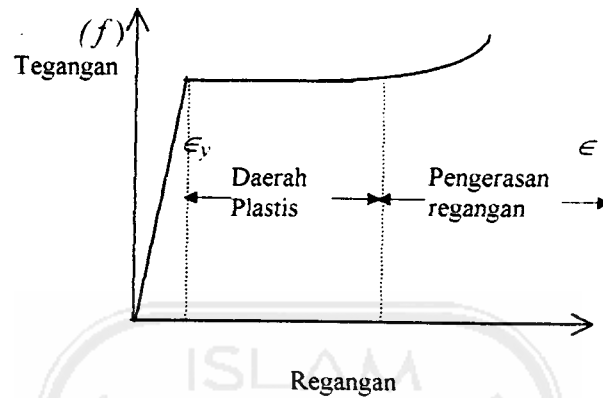
Dimana nilai :

$$Q = Q_s \cdot Q_a, \text{ dan } F_y = \text{Tegangan leleh baja, ksi.}$$

Nilai Q_s dan Q_a dapat dianggap sebagai faktor bentuk. Jika suatu batang tertekan yang terdiri dari elemen yang diperkuat dapat diperlakukan sebagai yang tidak diperkuat untuk menentukan tegangan ($F_{rata-rata}$).

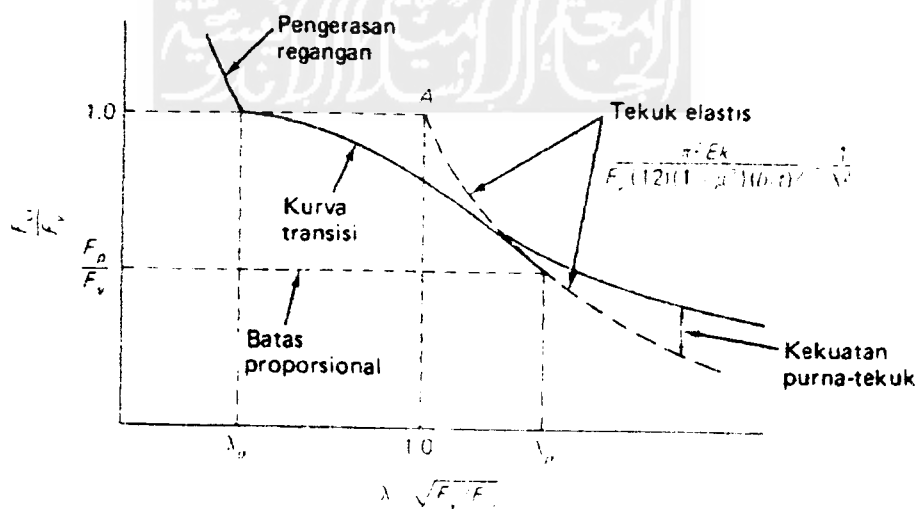
Pada perencanaan elemen pelat dengan tekan tepi harus mampu mengalami regangan yang lebih besar dari regangan leleh pertama ϵ_y . Tekuk

setempat harus tidak terjadi sebelum regangan tekan mencapai jauh ke dalam daerah plastis dan mendekati pengerasan regangan, seperti pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15. Daerah plastis dan pengerasan regangan pada hubungan tegangan-regangan untuk baja.

Untuk rasio lebar dengan ketebalan harus lebih kecil dari yang digunakan dalam metode tegangan kerja yang hanya mengharuskan pencapaian regangan, ϵ_y atau dengan kata lain λ harus lebih kecil dari λ_0 , seperti pada Gambar 3.16. berikut ini :



Gambar 3.16. Grafik tak berdimensi untuk kekuatan pelat dengan tekanan tepi .

Pada profil C canai dingin yang diasumsikan sebagai perlakuan pelat apabila diberikan beban secara merata pada ujung-ujungnya maka lendutan tekuk pelat akan dijumpai dalam dua kategori, yaitu :

- (1). Elemen pelat “yang tidak diperkuat”, yang memiliki satu tepi bebas yang sejajar pembebanan (Q_s sebagai faktor bentuk).

Untuk tegangan rencana, sifat penampang bruto dapat digunakan; jadi untuk elemen yang tidak diperkuat,

$$\frac{P_{ult}}{A_{bruto}} = \frac{f_{avg}}{f_{maks}} \cdot (f_{maks}) \cdot \frac{A_{bruto}}{A_{bruto}} = Q_s \cdot f_{maks} \quad (3.33)$$

Dengan meninjau Gambar (3.17), harga Q_s yang lebih kecil dari 1,0 sama artinya dengan $\lambda > \lambda_s$. Oleh AISC disederhanakan menggunakan bentuk garis lurus seperti kurva (A) pada Gambar 3.16. Anggapan yang digunakan yaitu $\lambda = 0,7$ adalah harga maksimum, dimana $F_{cr} = F_y$ dan batas proporsional terjadi pada $\lambda_p = \sqrt{2}$, yang sama seperti untuk tekuk keseluruhan. Akan tetapi, karena adanya kekuatan purna tekuk, kurva sejenis Euler dinaikkan ke atas kurva teoritis (kurva C) sehingga kurva perencanaan AISC (kurva B) memberikan $Q_s = F_{cr} / F_y = 0,65$ untuk $\lambda_p = \sqrt{2}$.

Walaupun dalam penurunannya Q_s didefinisikan sama dengan F_{cr} / F_y , tetapi tekuk pada batang keseluruhan terjadi (berdasarkan l_k / r) tegangan rata-rata $P/A = F_a$ selalu lebih kecil dari F_y . Hal ini berarti tekuk setempat elemen yang tidak diperkuat akan mengurangi efisiensi penampang lintang, bila F_{cr} untuk elemen pelat lebih kecil dari F_a .

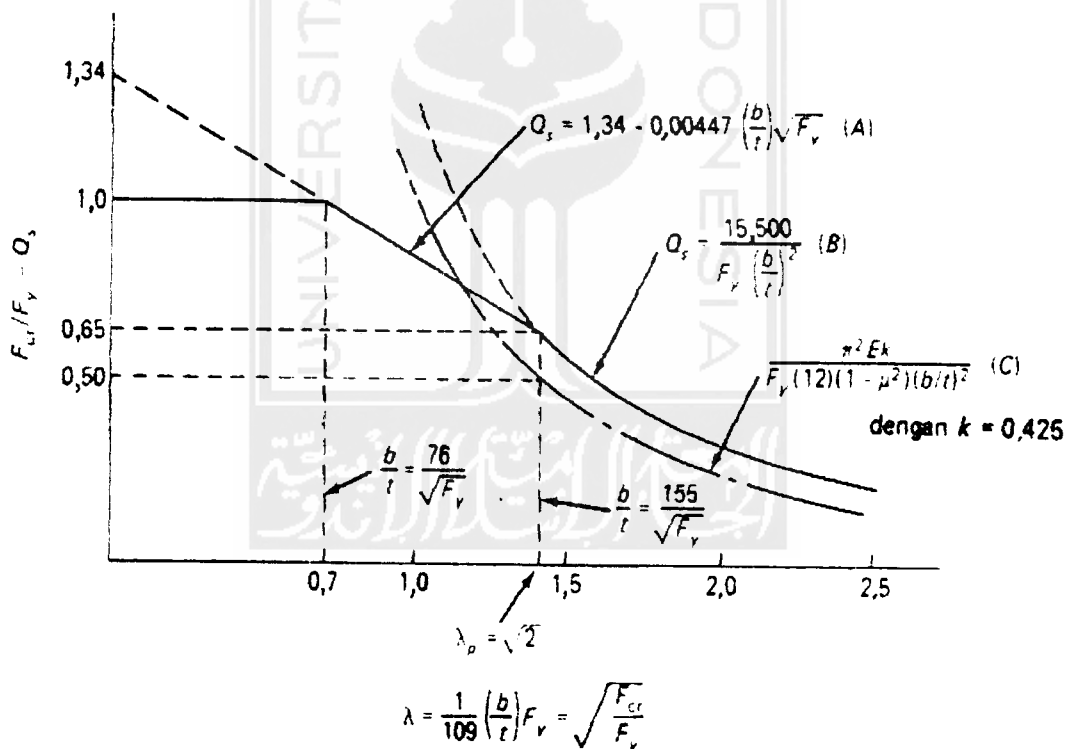
Dengan demikian secara umum untuk sayap tekan kolom :

$$Q_s = \frac{F_{cr}}{F_a} \geq \frac{F_{cr}}{F_y} \quad (3.34)$$

dan untuk sayap tekan pada balok,

$$Q_s = \frac{F_{cr}}{F_b} \geq \frac{F_{cr}}{F_y} \quad (3.35)$$

Pada lampiran C AISC memberikan persamaan reduksi tegangan untuk bagian sayap dan tangkai profil T . Persamaan reduksi ini didasarkan pada alasan yang sama seperti yang dijabarkan untuk profil siku tunggal, yang ditunjuk pada Gambar 3.17. berikut ini :



Gambar 3.17. Kekakuan pelat untuk elemen yang tidak diperkuat (siku tunggal) dengan satu tepi sendi dan tepi lainnya bebas.

(2) Elemen pelat “yang diperkuat”, yang bertumpu sepanjang dua tepi yang sejajar pembebanan (Qa sebagai faktor bentuk).

Untuk elemen pelat yang diperkuat sifat penampang bruto digunakan dalam menentukan tegangan rencana, dimana diwakili oleh Persamaan (3.36) berikut ini :

$$\frac{P_{ult}}{A_{bruto}} = \frac{A_{eff}}{A_{bruto}} \cdot f_{maks} = Qa \cdot f_{maks} \quad (3.36)$$

Pada elemen pelat yang diperkuat ini, karena penampang lintang pada profil dapat terdiri dari elemen yang tidak diperkuat yang menurut spesifikasi AISC direncanakan dengan memakai tegangan rata-rata yang direduksi dan tidak menggunakan lebar efektif, maka tegangan yang diijinkan pada elemen yang tidak diperkuat digunakan sebagai tegangan maksimum yang dapat diberikan pada elemen yang diperkuat. Jadi tegangan beban kerja adalah :

$$f = F'_{cr} \text{ berdasarkan elemen yang tidak diperkuat}$$

Selanjutnya, dengan menggunakan harga Q_s yang rasional dan lebih tinggi (Persamaan 3.34), maka :

$$Q_s = \frac{F'_{cr}}{Fa}, \text{ dengan } f = Q_s \cdot Fa \quad (3.37)$$

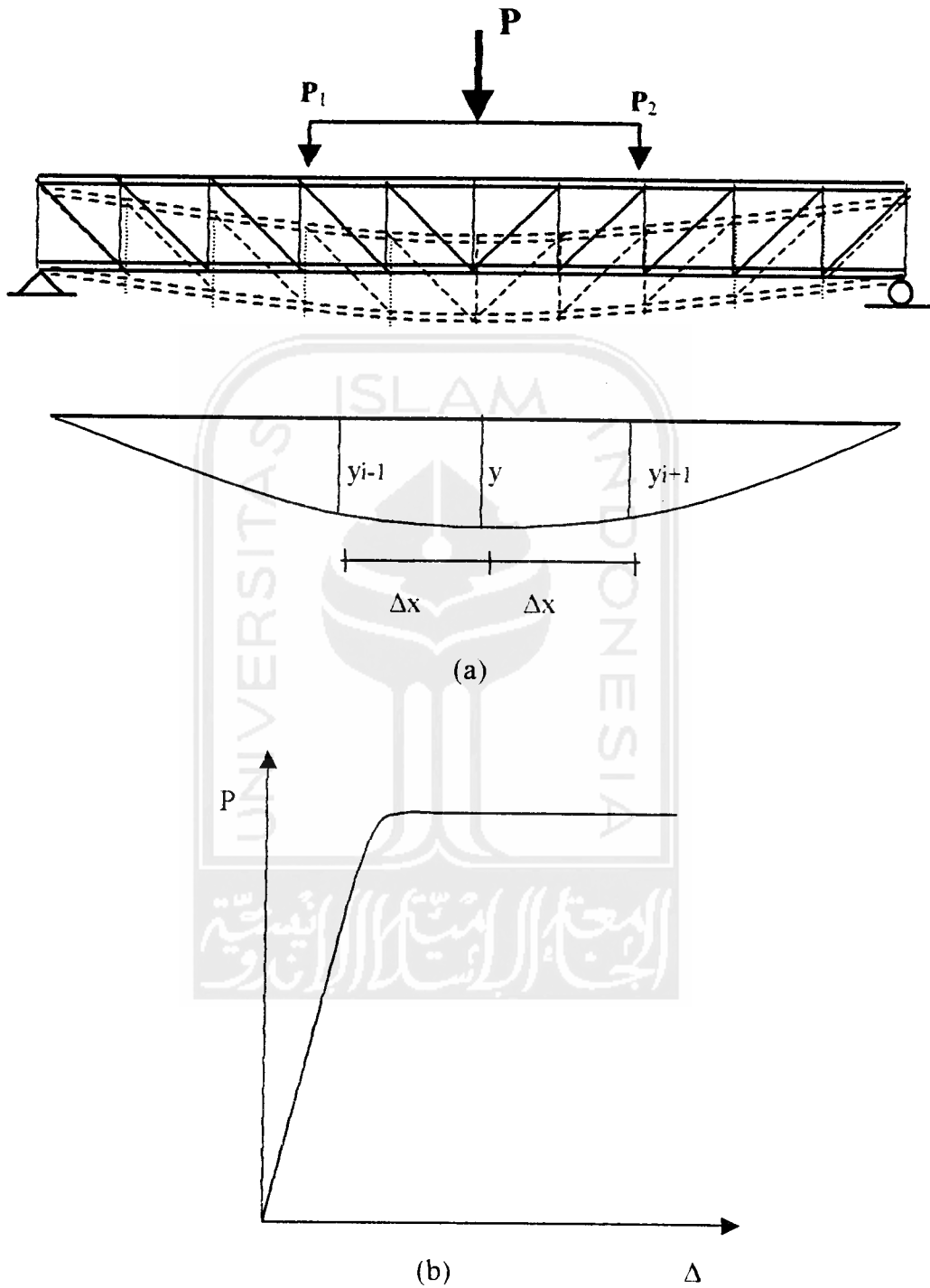
seperti yang ditetapkan oleh AISC-C3.

Akhirnya, menurut persamaan 3.36, Qa adalah :

$$Qa = \frac{(\text{lebar efektif}) \cdot t}{\text{luas yang sebenarnya}} = \frac{A_{eff}}{A_{bruto}} \quad (3.38)$$

dengan $A_{eff} = A_{bruto} - \Sigma (b-b_f) \cdot t$

3.8. Hubungan Momen dengan Kelengkungan



Gambar 3.18. Hubungan antara beban (P) dan Lendutan (Δ)

Dari pengujian kuat lentur dapat defleksi pada titik-titik distrik, misalnya y_{i-1} , y_i dan y_{i+1} , kemiringan garis lengkung didekati dengan menggunakan metode *Central Difference*. Mengacu pada Gambar (3.18.a) maka pendekatan dy/dx adalah :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.39)$$

Turunan keduanya menjadi :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x) \frac{d}{dx} (y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1}) \frac{d}{dx} (2\Delta x)}{(2\Delta x)^2} \quad (3.40)$$

Karena $(2\Delta x)$ adalah konstanta maka

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

Sehingga Persamaan (3.40) menjadi

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x) \frac{d}{dx} (y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1}) \frac{d}{dx} (2\Delta x)}{(2\Delta x)^2} \quad (3.41)$$

Selanjutnya didapatkan

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2})}{(2\Delta x)^2} \quad (3.42)$$

Jadi :

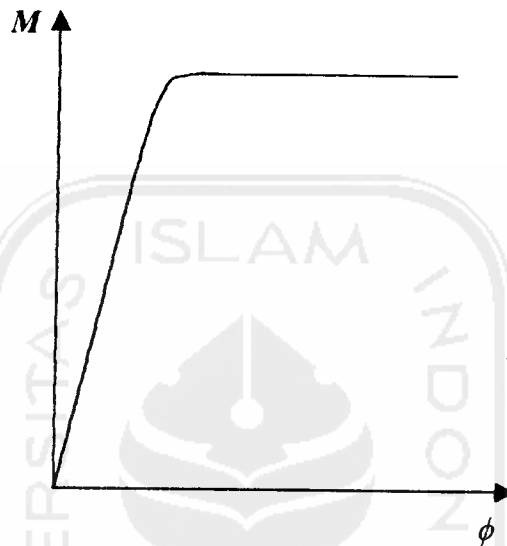
$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(y_{i+1} - y_i + y_{i-1})}{(\Delta x)^2}$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \phi = \frac{M}{EI}$$

$$M = EI \cdot \phi$$

$$M = EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3.43)$$

Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (curvatur) (ϕ) ditunjuk pada Gambar (3.19)



Gambar 3.19. Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (ϕ)

Pada saat pembebanan telah tercapai pada P_{max} (Gambar 3.18.b) dan terjadi momen batas yang menimbulkan mekanisme keruntuhan maka penampang ini akan terus berdeformasi tanpa menghasilkan gaya tahan tambahan. Sudut regangan ϕ akan elastis seluruhnya setelah itu keadaan tidak stabil dan lendutan tidak terkendali. Karena profil C canai dingin mempunyai tegangan kritis yang jauh dibawah tegangan lelehnya ($F_{cr} < F_y$) maka $M_n < M_y$, dimana :

$$M_n = F_{cr} \times A \times L < M_y = F_y \times A \times L \quad (3.44)$$

3.9. Hipotesa

Dengan memperhatikan latar belakang, tujuan penelitian, tinjauan pustaka dan landasan teori bahwa apabila suatu struktur balok badan terbuka (*Open Web Joist*) diberi beban sentris (P) maka akan terjadi F_{cr} yang besarnya akan dipengaruhi oleh koefisien k yang berasal dari grafik hubungan (Lb) dengan kondisi tepi-tepi pelat, dan rasio kelangsingan badan (b/t), balok badan terbuka (*Open Web Joist*) memiliki badan yang tidak kompak (b/t) diatas 10 sehingga akan terjadi keruntuhan tekuk jauh di bawah tegangan lelehnya $F_{cr} < F_y$, tetapi dengan mengubah kondisi tepi-tepi pelat dari jepit-bebas menjadi jepit-jepit dan panjang efektif (Lk) diharapkan akan terjadi kenaikan tegangan leleh $F_{cr} = F_y$.

Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan curvatur (θ) ditunjukkan Gambar (3.19) untuk setiap sampel dibuat hubungan non-dimensional P/P_{max} hubungan dengan Δ/Δ_y dan M/M_{max} hubungan dengan θ/θ_y .