

BAB III

LANDASAN TEORI

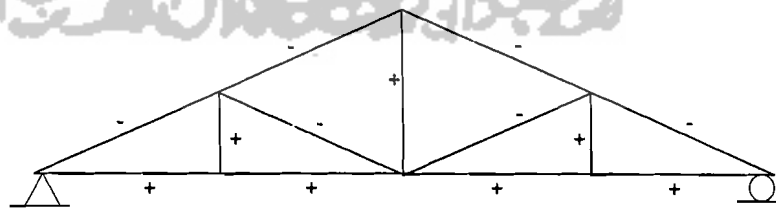
3.1 KUDA - KUDA RANGKA BATANG

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

Bentuk dasar kuda-kuda rangka batang yang umum dijumpai adalah rangka *Howe*, *Fink*, dan *Pratt* (*Hsieh, 1983*). Komponen rangka terdiri dari batang tepi atas, tepi bawah dan batang pengisi. Batang-batang tepi bawah pada struktur rangka batang umumnya merupakan batang tarik, dan batang pada tepi atas berfungsi sebagai batang tekan.

3.1.1 *Howe Truss*

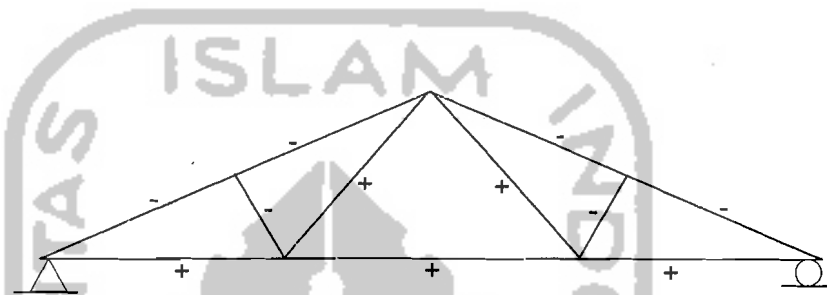
Batang pengisi pada rangka *Howe* berupa batang diagonal dan batang vertikal, batang diagonal umumnya merupakan batang tekan, sedangkan batang vertikal umumnya berupa batang tarik, (*Gambar 3.1*).



Gambar 3.1 *Howe Truss*

3.1.2 Fink Truss

Pada rangka *Fink* batang pengisinya berupa batang diagonal, sebagian batang diagonal tegak lurus terhadap batang tepi atas. Sebagian batang pengisi merupakan batang tarik, sedangkan batang pengisi yang lain merupakan batang tekan. Panjang batang pengisi yang berfungsi sebagai batang tekan lebih pendek dibanding batang pengisi yang berfungsi sebagai batang tarik (Gambar 3.2).



Gambar 3.2 Fink Truss

3.1.3 Pratt Truss

Pada rangka *Pratt* batang pengisi diagonal umumnya merupakan batang tarik sedangkan batang pengisi vertikal umumnya merupakan batang tekan (Gambar 3.3).

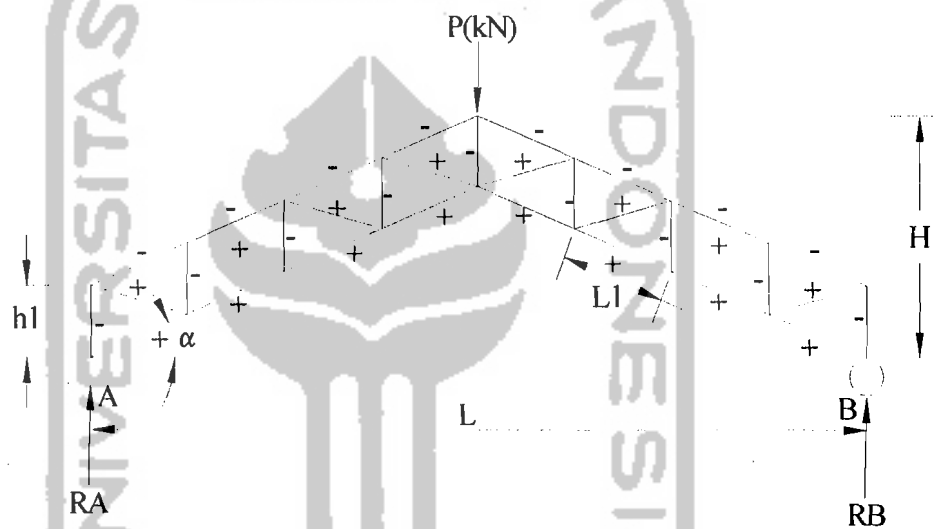


Gambar 3.3 Pratt Truss

Konfigurasi komponen dan panjang batang pengisi ketiga rangka tersebut di atas bervariasi sehingga mempengaruhi kekuatan (*kapasitas*) dan kekakuan (*stiffnes*) rangka.

3.1.4 Kuda-Kuda Rangka Batang Tepi Sejajar

Salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan dan kekakuan struktur rangka batang adalah susunan komponen, selain itu juga ukuran penampang komponen. Terdapat beberapa bentuk modifikasi dari bentuk dasar kuda-kuda rangka batang salah satunya yang sering digunakan adalah kuda-kuda rangka batang tepi sejajar, dengan batang pengisi berupa batang diagonal dan batang vertikal. Rangka batang tepi sejajar Gambar 3.4 merupakan modifikasi dari bentuk dasar rangka *Pratt*.



Gambar 3. 4 Kuda-kuda rangka batang tepi sejajar

Pada Gambar 3.4 kuda-kuda rangka batang tepi sejajar joint-jointnya diasumsikan sebagai sendi. Berdasarkan asumsi tersebut komponen rangka hanya memikul gaya aksial tarik atau tekan saja. Pada kuda-kuda yang menerima gaya transversal sebesar P pada puncak maka pada batang tepi atasnya akan menerima 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 (*Schodek, 1991*).

Gaya luar P juga menimbulkan deformasi aksial pada setiap komponen rangka, dimana batang tekan mengalami perpendekan dan batang tarik mengalami perpanjangan. Menurut **Hooke** deformasi akibat gaya aksial ditunjukkan seperti pada persamaan 3.1.

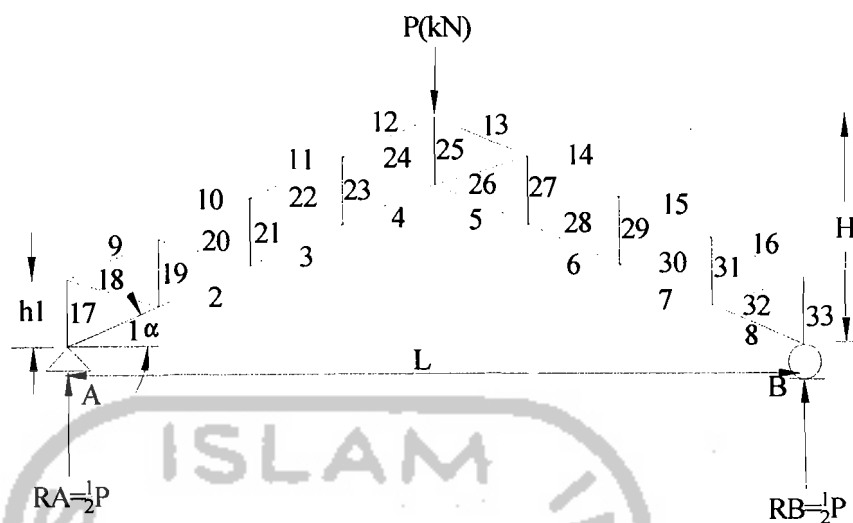
$$\Delta = \frac{P.L}{A.E} \quad (3.1)$$

dengan P = gaya aksial, L = panjang batang, A = luas penampang dan E = modulus elastis bahan.

Tampak bahwa deformasi batang berbanding lurus dengan panjang batang dan beban yang bekerja, berbanding terbalik dengan luas penampang dan modulus elastisitas. Deformasi aksial setiap komponen rangka menimbulkan lendutan arah transversal.

3.2 ANALISIS GAYA BATANG

Fakta bahwa setiap bagian pada stuktur harus berada dalam keadaan keseimbangan adalah dasar semua analisis rangka batang. Pada analisis rangka batang dengan metode titik buhul (*joint*), rangka batang dianggap sebagai gabungan batang dan titik buhul. Gaya batang diperoleh dengan meninjau keseimbangan titik-titik joint, dan titik joint tersebut harus berada dalam keseimbangan (*Schodek, 1991*).

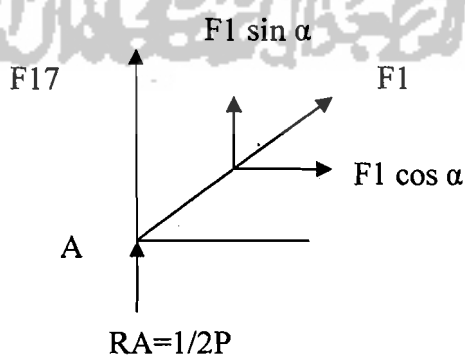


Gambar 3.5 Notasi batang rangka kuda-kuda batang tepi sejajar

$$R_{Ay} = R_{By} = \frac{1}{2}P \quad (3.2)$$

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

Analisis gaya batang pada rangka kuda-kuda batang tepi sejajar Gambar 3.5 dapat diselesaikan dengan metode keseimbangan titik buhul. Mula-mula dicari reaksi dukungan (R_A dan R_B). Analisis dimulai dengan memilih joint yang paling banyak memiliki dua gaya batang yang belum diketahui. Sebagai contoh dipilih keseimbangan pada joint A seperti terlihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Gaya batang pada joint A

Keseimbangan gaya-gaya vertikal dan horisontal pada joint A menghasilkan gaya pada batang F1 dan F17.

Jumlah gaya-gaya vertikal = 0

$$\Sigma F_y = 0$$

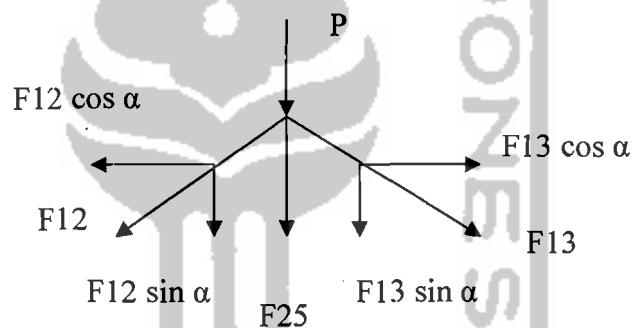
$$F_{17} + F_1 \sin \alpha + R_A = 0$$

Jumlah gaya-gaya horisontal = 0

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_1 \cos \alpha = 0$$

Puncak rangka merupakan joint yang memiliki gaya batang paling besar, yaitu batang F12 dan F13, analisis gaya batang pada puncak rangka dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Gaya batang pada puncak rangka

Jumlah gaya-gaya vertikal = 0

$$\Sigma F_y = 0$$

$$-P - F_{25} - F_{12} \sin \alpha - F_{13} \sin \alpha = 0$$

Jumlah gaya-gaya horisontal = 0

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_{12} \cos \alpha - F_{13} \cos \alpha = 0$$

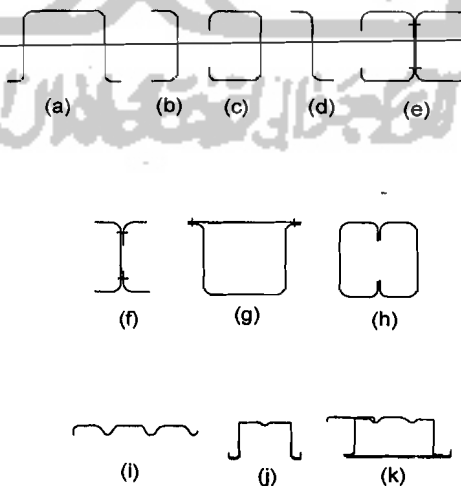
3.3 PROFIL BENTUKAN DINGIN

Penampang batang (*profil*) merupakan element struktur yang berpengaruh terhadap penempatan fungsi yang harus dipenuhi oleh struktur, agar sesuai dengan fungsi struktur maka pemilihan penampang harus didasari oleh fungsi struktur, dan beban yang harus dipikul.

Penampang batang yang terbuat dari potongan atau baja-pelat bentukan dingin (*cold formed members*) digunakan secara luas di dalam konstruksi. Salah satunya digunakan sebagai komponen penyusun rangka batang. Suatu karakteristik yang baik dari baja bentukan dingin adalah dapat dibentuk ke dalam suatu variasi melintang yang besar dibentuk bersekat-sekat menggunakan peralatan sederhana. Profil semacam ini dibentuk dari pelat-pelat yang sudah jadi, menjadi profil baja dalam temperatur atmosfer (dalam keadaan dingin). Profil macam ini ringan, sehingga efisien dalam penggunaannya.

Gambar 3.8 menunjukkan profil bentukan dingin ukuran ringan dapat dibedakan menjadi tiga kelompok (*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.

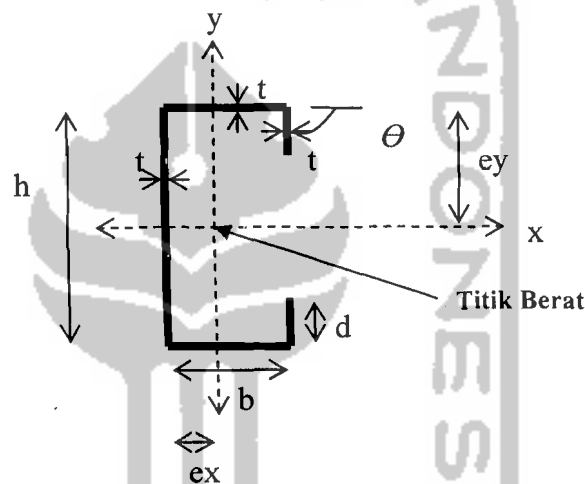


Gambar 3. 8 Profil bentukan dingin

Pada penelitian ini penampang yang digunakan adalah baja bentuk dingin dengan profil *Lipped channel* (Gambar c), karena profil inilah yang banyak digunakan pada struktur nyata.

3.3.1 Penampang Lintang Profil *Lipped Channel*

Sifat penampang (*Section Properties*) profil *Lipped Channel* seperti terlihat pada Gambar 3.9, meliputi: (a) luas penampang, (b) momen inersia dan (c) jari-jari inersia, dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut ini.



Gambar 3.9 Profil *Lipped Channel*

Sesuai dengan notasi yang digunakan dalam Gambar 3.9, luas penampang profil (A) dapat dihitung menggunakan pendekatan Persamaan (3.3),

$$A = t \times (h + 2b + 2d) \quad (3.3)$$

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 3.4 dan 3.5 berikut ini :

$$e_y = \frac{1}{2} \cdot h \quad (3.4)$$

$$e_x = \frac{b \cdot (b + 2 \cdot d)}{h + 2 \cdot b + 2 \cdot d} \quad (3.5)$$

Momen inersia profil *Lipped Channel* (I_x dan I_y) dihitung dengan Persamaan (3.6a) dan (3.6b) yaitu :

$$I_x = \int_0^A y^2 dA \quad (3.6a)$$

$$I_y = \int_0^A x^2 dA \quad (3.6b)$$

Momen inersia terhadap sumbu X dan sumbu Y didekati dengan Persamaan (3.7) dan Persamaan (3.8).

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot t \cdot h^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t \cdot h^2 + \frac{2}{3} \cdot d^3 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot d \cdot t \cdot h^2 - d^2 \cdot t \cdot h + \frac{1}{6} \cdot b \cdot t^3 \quad (3.7)$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot h \cdot t^3 + \frac{2}{3} \cdot t \cdot b^3 + \frac{1}{6} \cdot d \cdot t^3 + 2 \cdot d \cdot t \cdot b^2 - (h \cdot t + 2 \cdot b \cdot t + 2 \cdot d \cdot t) \cdot b^2 \cdot \frac{(b + 2 \cdot d)^2}{(h + 2 \cdot b + 2 \cdot d)^2} \quad (3.8)$$

Jari-jari inersia terhadap sumbu X ($i_x = r_x$) dan sumbu Y ($i_y = r_y$) dihitung berdasarkan Persamaan (3.9) dan Persamaan (3.10) berikut,

$$i_x = r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (3.9)$$

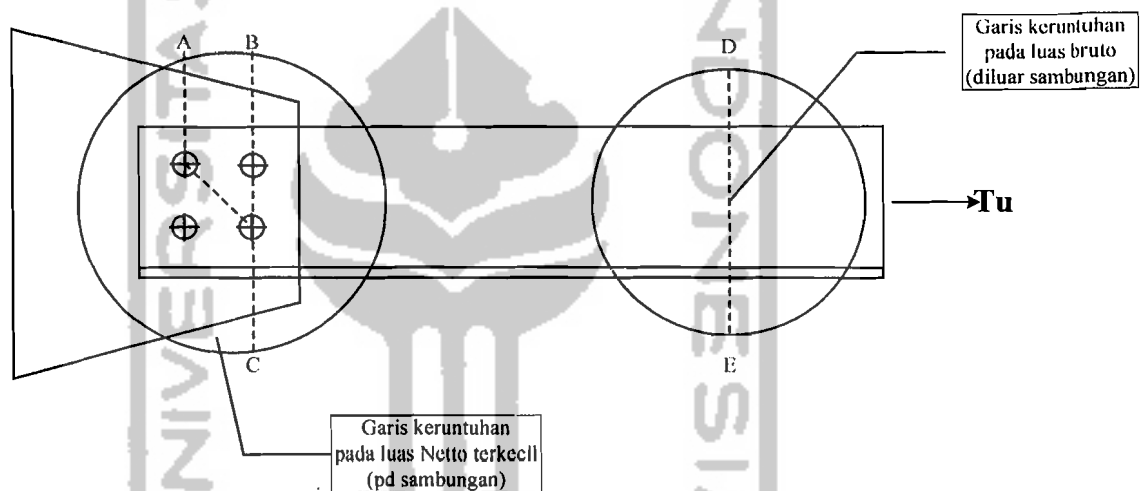
$$i_y = r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (3.10)$$

3.4 BATANG TARIK

Batang tarik adalah batang yang mendukung tegangan tarik aksial yang diakibatkan oleh bekerjanya gaya tarik aksial pada ujung-ujung batang (*Padosbajayo, 1992*). Batang tarik mungkin merupakan batang paling efisien, karena gaya tarik biasanya menimbulkan tegangan merata lagi pula tidak menimbulkan tekuk (*buckling*), ini berarti kekuatan bahan dapat dimanfaatkan secara optimal. Perencanaan komponen tarik merupakan persoalan yang paling sederhana dibanding perencanaan struktur lain, karena masalah *instabilitas* bukan merupakan masalah utama (*Salmon dan Johnson, 1992*).

Perencanaan batang tarik pada hakekatnya menentukan luas penampang lintang batang yang cukup untuk menahan beban yang bekerja. Keruntuhan batang tarik dapat terjadi pada dua tempat yaitu :

1. Keruntuhan pada penampang bruto yang jauh dari titik sambungan (kriteria pelelehan) seperti terlihat pada Gambar 3.10 potongan D – E.
2. Keruntuhan pada daerah dengan luas netto terkecil (kerusakan fraktur), retakan dari luas bersih efektif (yakni melalui lobang-lobang) pada sambungan seperti terlihat pada Gambar 3.10 potongan A – C dan B – C.



Gambar 3.10 Garis kemungkinan letak kerusakan elemen akibat gaya tarik

Kekuatan pada kondisi batas pelelehan akan mencapai kekuatan batas bila semua serat penampang melintang meleleh, sehingga kekuatan batang tarik bersifat merata pada seluruh tampang dan kuat tarik nominalnya dinyatakan oleh persamaan 3.11 (*Salmon dan Johnson, 1992*).

$$T_u = A_g \cdot F_y \quad (3.11)$$

Dengan A_g = luas penampang lintang bruto dan F_y = tegangan leleh

Kegagalan pada kondisi batas fraktur dengan anggapan batang tarik yang patah telah melampaui tegangan tariknya sehingga kuat tarik nominal batang tarik dapat diketahui menggunakan Persamaan (3.12). 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 (3.14). Sedangkan untuk batang tarik yang tidak berlubang atau dilas, luas penampangnya dihitung menurut Persamaan (3.13).

$$T_u = A_e \cdot F_u \quad (3.12)$$

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

$$A_e = U \cdot A_g \quad (3.13)$$

$$A_e = U \cdot A_n \quad (3.14)$$

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

Batang tarik perlu dibatasi kelangsingannya untuk menghindari lendutan yang terlalu besar. 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
(*Salmon dan Johnson, 1992*)

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

3.5 BATANG TEKAN

Batang tekan didefinisikan sebagai batang struktural yang menerima gaya tekan aksial. Pada struktur gedung, batang tekan sering dijumpai sebagai kolom, sedangkan pada struktur rangka batang (jembatan, kuda-kuda) dapat berupa batang tepi, batang diagonal, batang vertikal dan batang-batang pengekang (*bracing*) (*Padosbajayo, 1992*).

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. Dalam praktek, *tekuk* diartikan sebagai batas antara lendutan stabil dan tak stabil pada suatu batang tekan (*Salmon Johnson, 1992*).

Keruntuhan batang tekan dapat diklasifikasikan menjadi 2 kategori, yaitu :

1. Keruntuhan yang diakibatkan tegangan lelehnya terlampaui. Hal semacam ini terjadi pada batang tekan yang pendek (*stocky column*) dan penampangnya kompak. Penampang kompak adalah penampang yang mempunyai rasio kelangsingan atau rasio lebar terhadap tebal (b/t) kecil sehingga penampang tersebut tidak mengalami tekuk setempat (*local buckling*).
2. Keruntuhan akibat tekuk (*buckling*). Hal semacam ini terjadi pada batang tekan yang langsing (*slender column*). Kegagalan tekuk dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu tekuk lokal dan tekuk total (*overall buckling*). Tekuk total (*overall buckling*), batang tekan mengalami tekuk total bila penampang batang kompak dan langsing (KL/r besar). Tekuk lokal (*local buckling*), batang yang mengalami tekuk lokal memiliki penampang yang tidak kompak dan elemen penampangnya langsing (rasio b/t besar) (*Kusuma, 1983*).

3.5.1 Keruntuhan Akibat Tegangan Leleh Terlampaui

Batang tekan yang pendek dan mempunyai rasio kelangsingan atau rasio lebar terhadap tebal (b/t) kecil dapat dibebani sampai bahan meleleh atau bahkan mungkin hingga mencapai daerah pengerasan regangan (*Strain Hardening*). Pada kondisi ini tegangan kritis (F_{cr}) lebih besar dari tegangan leleh (F_y), sehingga tegangan tegangan kritis (F_{cr}) yang digunakan sama dengan tegangan leleh (F_y). Pada umumnya keruntuhan akibat tegangan leleh terlampaui dijumpai pada jenis batang dengan karakteristik tersebut.

Menurut *Salmon dan Johnson (1992)* 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. Kapasitas tekan ditentukan sebagai hasil kali tegangan leleh dan luas penampang seperti ditunjukkan oleh Persamaan (3.15).

$$P_u = A_g \times F_y \quad (3.15)$$

Dengan F_{cr} = tegangan kritis, F_y = tegangan leleh baja, P_u = kapasitas tekan dan , A_g = luas penampang *bruto*.

3.5.2 Keruntuhan Akibat Tekuk

3.5.2.1 Tekuk Total

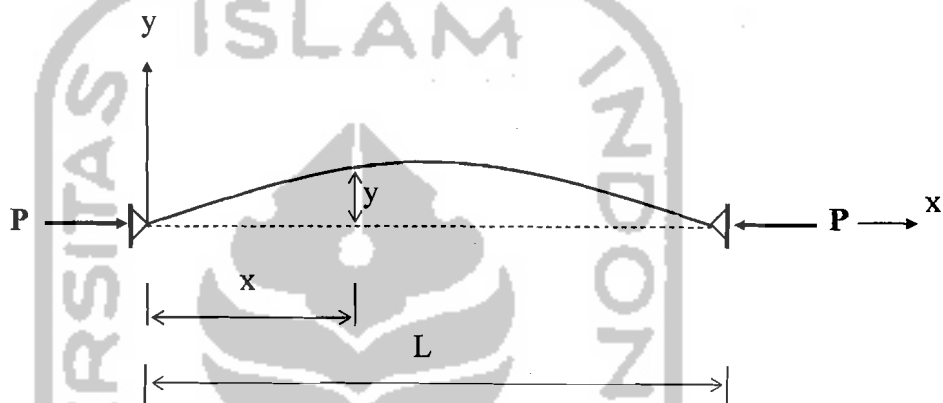
Pada keruntuhan akibat tekuk total dapat terjadi dalam keadaan elastis maupun inelastis.

a). Tekuk Elastis

Tekuk elastis terjadi pada kolom langsing. Kolom langsing adalah kolom yang memiliki kelangsingan lebih besar dari kelangsingan batas. Pada keruntuhan akibat tekuk elastis, tegangan yang terjadi pada seluruh penampang masih dalam keadaan elastis, sehingga biasa disebut tekuk elastis (*Padosbajayo, 1991*).

Menurut persamaan *Euler* yang dikemukakan oleh *Salmon dan Johnson (1992)*, Beban kritis batang tekan diturunkan dari persamaan sebuah batang lurus yang semua seratnya tetap elastis sehingga batang tersebut tidak mampu lagi menahan penambahan beban, batang tersebut memiliki dukungan sederhana pada ujung-ujungnya dan diberi gaya aksial tekan sentris.

Kuat tekan kolom langsung dijabarkan secara matematis oleh *Euler*. Pada sebuah batang lurus yang ujung-ujungnya sendi dikerjakan gaya tekan P , akibatnya batang melengkung seperti pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Batang tertekan

L = panjang bentang, y = lendutan

Di suatu titik sejarak x , momen lentur M_x (terhadap sumbu x) pada batang yang sedikit melengkung (batang tertekan) adalah

$$M_x = P \cdot y \quad (3.16a)$$

dalam keadaan kolom elastis dan deformasi yang terjadi kecil, hubungan momen (M), kelengkungan (d^2y / dx^2) dan factor kekakuan (EI) adalah

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M_x}{EI} \quad (3.16b)$$

Persamaan diferensialnya menjadi

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI}y = 0 \quad (3.16c)$$

Penyelesaian Persamaan (3.16c) menghasilkan beban tekuk *Euler (Euler buckling load)*, yaitu

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.17)$$

Bila masing-masing Persamaan (3.17) dibagi dengan luas penampang batang A, maka

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{AKL^2} \quad (3.18)$$

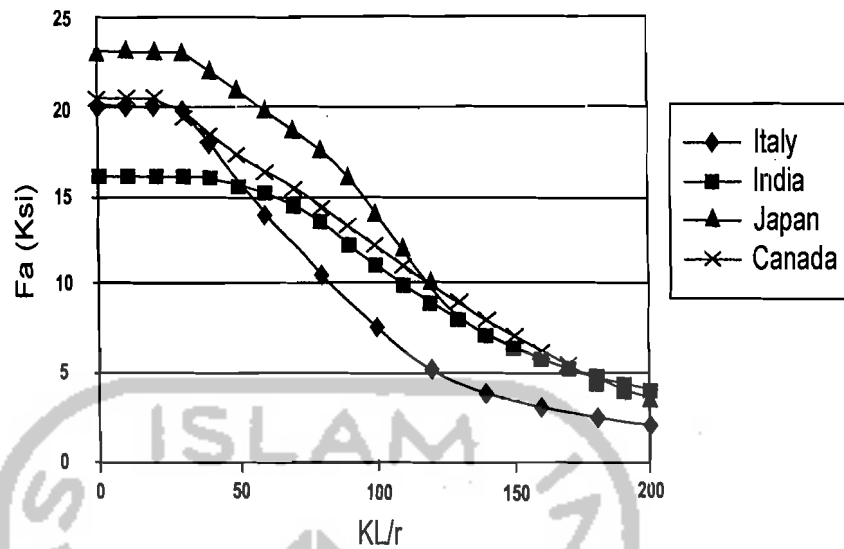
dimana I adalah inersia bahan, $I = A \cdot r^2$ atau $r^2 = I / A$, maka diperoleh tegangan tekan kritis Euler seperti terlihat pada Persamaan (3.19) berikut ini,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.19)$$

dengan E = modulus elastisitas baja, r adalah jari-jari inersia minimum dan L = panjang tekuk.

Berdasarkan Persamaan (3.19) terlihat bahwa kekuatan batang tekan berbanding terbalik dengan kuadrat kelangsingan (KL/r). Semakin besar kelangsingan elemen tekan tegangan kritisnya akan semakin kecil, sehingga beban yang dapat mengakibatkan elemen tekan mengalami tekuk semakin kecil

Penelitian hubungan antara tegangan yang terjadi pada kolom (Γ_a) dengan kelangsingan (KL/r) yang pernah dilakukan di beberapa negara yaitu: Italia, India, Jepang dan Kanada memiliki bentuk grafik yang hampir sama. Penurunan tegangan kritis relatif kecil pada KL/r kecil (0 s/d ± 40), penurunan tegangan kritis terjadi besar seiring dengan pertambahan KL/r untuk $KL/r = \pm 40$ sampai dengan ± 160 , dan kembali menjadi relatif datar untuk KL/r lebih dari ± 160 . Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Grafik hubungan KL/r dengan F_a di beberapa negara (*Tall, 1974*)

Tampak bahwa pada gambar diatas bahwa semakin kecil KL/r maka F_a akan meningkat.

b). Tekuk Inelastis

Dalam struktur nyata kolom-kolom biasanya mengalami tekuk dalam keadaan sebagian penampangnya elastis dan sebagian lagi tidak elastis, tekuk batang pada keadaan ini dinamakan tekuk tidak elastis (*inelastic buckling*). Banyak teori tekuk inelastis, salah satu diantaranya adalah *Tangen modulus theory* yang dikemukakan oleh *Engesser (Salmon dan Johnson, 1992)*. Berdasarkan teori ini tegangan kritis kolom dinyatakan dengan Persamaan 3.20.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \quad (3.20)$$

dengan E_t = modulus tangen yang nilainya berubah-ubah dan lebih kecil dari modulus elastis.

Karena $E_t < E$ maka tegangan kritis yang diperoleh berdasarkan Persamaan (3.20) selalu lebih kecil dibanding Persamaan (3.19). Persamaan (3.19) dan (3.20) menginformasikan tegangan kritis batang tekan berbanding terbalik

dengan kuadrat kelangsingan, semakin langsing suatu batang tegangan kritis semakin kecil. Persamaan (3.19) dan (3.20) berlaku untuk batang tekan yang elemen-elemen penampangannya tidak mengalami tekuk lokal.

Menurut *Chen dan Atsuta (1936)*, rasio kelangsingan (l/r) pada setiap tegangan dapat dicari dengan Persamaan 3.21 di bawah ini :

$$l/r = \pi \sqrt{\frac{E_t}{\sigma}} \quad (3.21)$$

Sehingga modulus tangent (E_t) diperoleh dengan Persamaan 3.22.

$$E_t = \frac{(l/r)^2 \sigma}{\pi^2} \quad (3.22)$$

Dimana E_t = modulus tangent, σ = tegangan yang terjadi

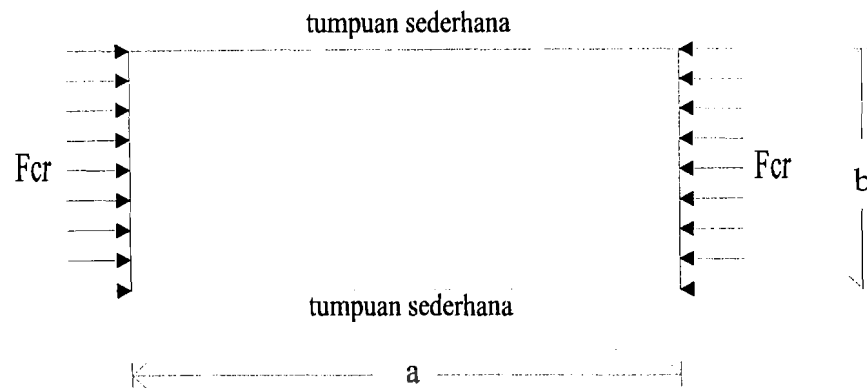
3.5.2.2 Tekuk Lokal Akibat Tekan

Menurut *Tall (1974)*, tekuk lokal adalah tekuk yang terjadi pada salah satu elemen penyusun tampang suatu struktur. Tekuk lokal 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 dikemukakan oleh *Salmon dan Johnson (1992)*, tegangan tekuk elastik teoritik atau tegangan kritis pelat yang tertekan dapat dilihat pada Gambar 3.13 dan dapat dinyatakan seperti Persamaan 3.23 berikut :

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (3.23)$$

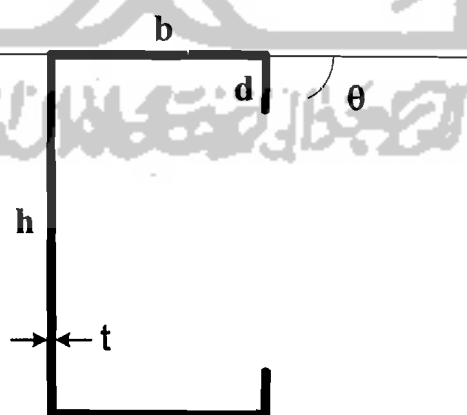
dengan : F_{cr} = tegangan kritis (Mpa), k adalah koefisien tekuk pelat, $\pi = 3,14$, E adalah modulus elastisitas baja (2.10^5 Mpa), μ adalah *rasio poisson* = 0,3, dan b/t adalah rasio lebar terhadap tebal pelat.



Gambar 3.13 Pelat yang tertekan

Dari persamaan (3.23) tampak bahwa nilai F_{cr} dipengaruhi oleh koefisien tekuk pelat (k), rasio lebar terhadap tebal (b/t) dan rasio panjang terhadap lebar pelat atau aspek rasio (a/b). Semakin besar rasio b/t dan rasio a/b maka semakin kecil kekuatan pelat, sehingga menyebabkan tekuk lokal baik pada sayap maupun badan. Kerusakan akibat tekuk dapat dicegah dengan cara memperkecil rasio lebar terhadap tebal (b/t) dan meningkatkan koefisien tekuk pelat (k).

Elemen plat penyusun rangka kuda-kuda yang memakai profil *Lipped Channel* bentukan dingin seperti Gambar 3.14 memiliki rasio b/t yang besar sehingga memungkinkan terjadinya tekuk lokal.



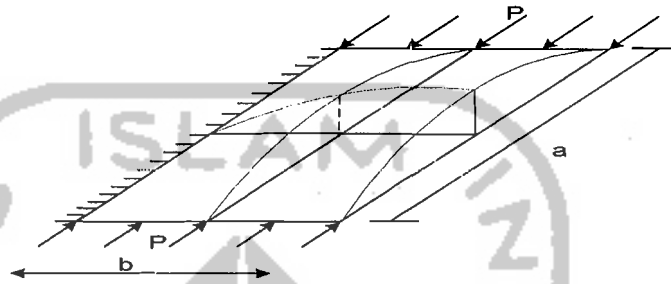
Gambar 3.14 Profil *Lipped Channel*

Dengan h adalah tinggi badan profil, b = lebar sayap, d = panjang lip, θ = sudut lip (*radians*), dan t = tebal.

Menurut *Schafer (1997)*, ada tiga ragam tekuk local elemen dengan anggapan masing-masing elemen diperlakukan secara terpisah, yaitu :

1. Tekuk Lokal Lip

Bibir profil *Lipped Channel* dianggap sebagai pelat yang salah satu sisinya bebas dan sisi lainnya dianggap sebagai dukungan sederhana dan menerima tekanan murni.



Gambar 3.15 Tekuk lokal pada lip

Nilai k untuk kondisi yang ditunjukkan pada Gambar 3.15 diperoleh $k = 0,425$. Tegangan kritis bibir (*lip*) pada profil *Lipped Channel* adalah

$$F_{cr-lip} = k_{lip} \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \times \left(\frac{t}{d}\right)^2 \quad (3.24)$$

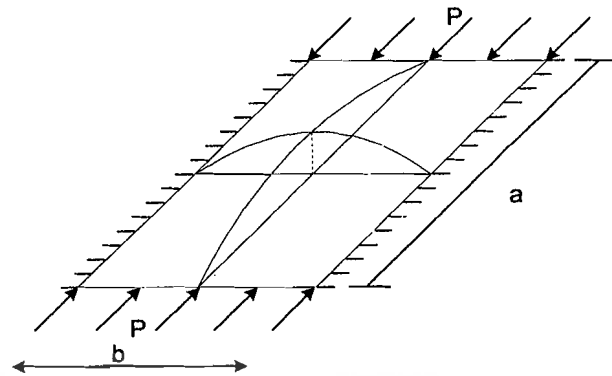
$$P_{cr-lip} = F_{cr-lip} \times A_{lip} \quad (3.25)$$

2. Tekuk Lokal Sayap

Tegangan kritis untuk sayap dengan asumsi kedua sisi pelat ditumpu sederhana seperti kondisi yang ditunjukkan pada Gambar 3.16 , maka nilai koefisien tekuk pelat (k) = 4, jadi tegangan kritis sayap profil *Lipped Channel* adalah :

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

$$P_{cr-sayap} = F_{cr-sayap} \times A_{sayap} \quad (3.26)$$



Gambar 3.16 Tekuk lokal pada sayap dan badan

3. Tekuk Lokal Badan

Pelat badan dianggap sebagai pelat yang kedua sisinya ditumpu sederhana dan menerima tekanan murni, maka nilai koefisien tekuk pelat (k) untuk kondisi yang ditunjukkan pada Gambar 3.16 diperoleh $k = 4$, jadi tegangan kritis pelat badan profil *Lipped Channel* adalah :

$$F_{cr-badan} = k_{badan} \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \times \left(\frac{t}{h}\right)^2 \quad (3.25)$$

$$P_{cr-badan} = F_{cr-badan} \times A_{badan} \quad (3.26)$$

3.5.3 Perhitungan Koefisien Tekuk Pelat (k)

Nilai koefisien tekuk pelat komponen rangka batang dapat diketahui hanya pada komponen yang mengalami kerusakan akibat tekuk (akibat tekuk local maupun tekuk menyeluruh). Pola kegagalan tekuk dapat diketahui dari hasil eksperimen.

Pada kondisi tekuk menyeluruh nilai koefisien tekuk (k) dipengaruhi oleh kelangsingan batang profil yang digunakan. Dari persamaan 3.19 nilai koefisien tekuk (K) untuk tekuk menyeluruh dapat ditulis:

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{F_{cr} (L/r)^2}} \quad (3.27)$$

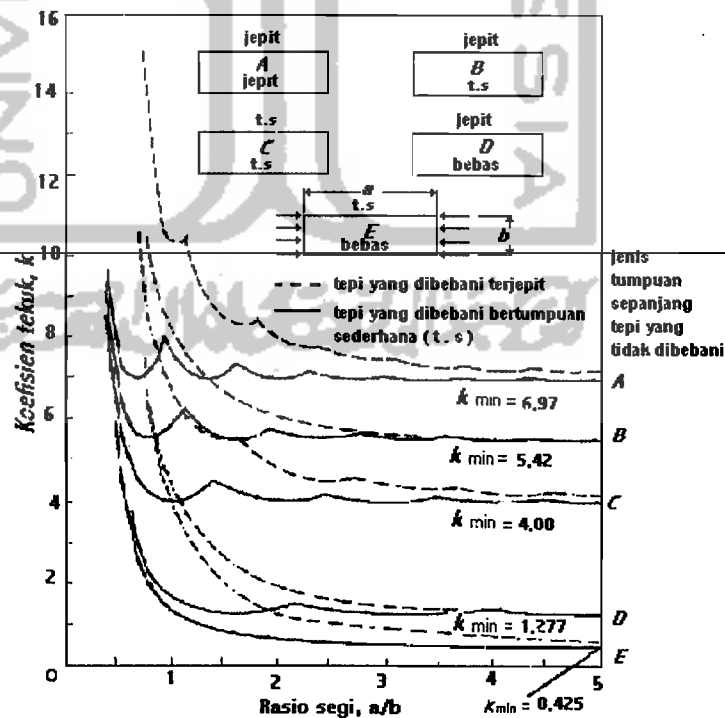
dimana F_{cr} adalah gaya batang dibagi luas profil (P_{cr} / A).

Pada kegagalan akibat tekuk lokal, nilai koefisien tekuk pelat (k) untuk elemen tekan dipengaruhi oleh kondisi tepi elemen pelat dan rasio panjang terhadap lebar pelat (a/b). Dari Persamaan 3.20 nilai koefisien tekuk (k) untuk tekuk lokal dapat ditulis menjadi :

$$k = \frac{F_{cr} \cdot 12 \cdot (1 - \mu^2) (b/t)^2}{\pi^2 \cdot E} \quad (3.28)$$

Nilai koefisien tekuk (k) untuk pelat yang memikul tekanan merata dengan berbagai kondisi tumpuan elemen pelat (jepit, sendi dan bebas) ditunjukkan pada Gambar 3.17.

Untuk pelat yang kedua sisinya merupakan tumpuan jepit (A) nilai $k_{\min} = 6,97$, 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. 17 Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada pelat segi empat datar (Salmon dan Johnson, 1992)

Nilai k untuk pelat yang salah satunya tidak diperkuat, dalam hal ini dimiliki oleh bibir (*Lip*) mendekati nilai 0,425 dan untuk pelat yang kedua sisinya ditumpu oleh tumpuan sederhana memiliki nilai $k = 4$, nilai $k = 4$ dimiliki oleh sayap dan badan. Dengan demikian tampak bahwa nilai k untuk bibir 1/10 dari nilai k yang dimiliki oleh sayap dan badan maka nilai k akan mendekati konstan.

Menurut *Schafer (1997)*, dengan adanya ragam interaksi tekuk lokal, nilai koefisien tekuk pelat untuk tekuk lokal dapat dicari dengan analisa potongan, terbatas pada sayap dan bibir (tepi).

1. Koefisien Tekuk Pelat Sayap Tepi

Nilai koefisien tekuk (k) untuk tekuk lokal sayap tepi untuk analisa potongan, terbatas pada sayap tepi (bibir).

$$k_{\text{sayap tepi}} = -11,07 \left(\frac{d}{b} \right)^2 + 3,95 \left(\frac{d}{b} \right) + 4 \quad (3.29)$$

2. Koefisien Tekuk Pelat Sayap Badan

Jika $h/b = 1$ maka nilai $k = 4$. Jika $h/b > 1$ maka nilai k kurang dari 4 dalam kaitannya dengan tekuk pada badan. Jika $h/b < 1$ maka nilai k lebih dari 4 dalam kaitannya dengan pengekangan oleh badan pada sayap. Nilai k untuk tekuk lokal sayap/badan yaitu seperti Persamaan 3.30 dan 3.31.

$$k_{\text{sayap badan}} = \left[\left[2 - \left(\frac{b}{h} \right)^{0.4} \right] \cdot 4 \cdot \left(\frac{b}{h} \right)^2 \right] \quad \text{jika } \frac{h}{b} \geq 1 \quad (3.30)$$

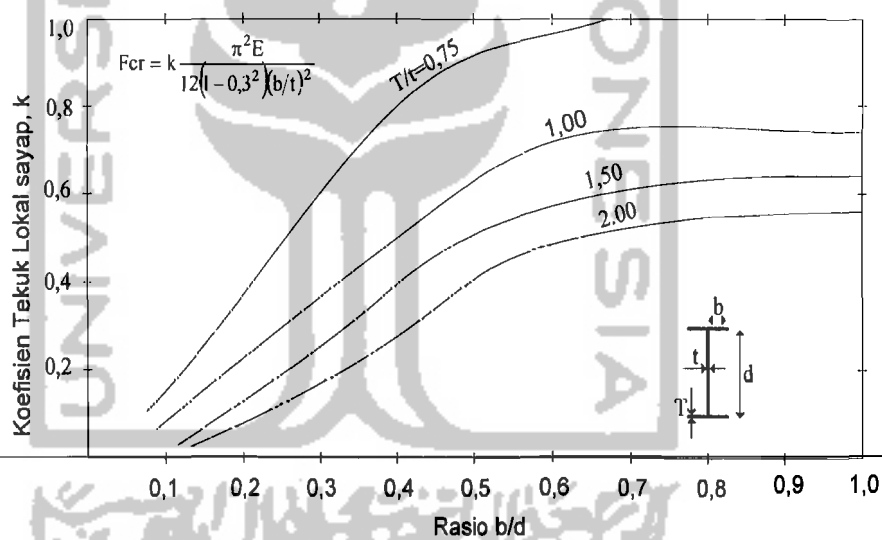
$$\left[\left[2 - \left(\frac{b}{h} \right)^{0.2} \right] \cdot 4 \right] \quad \text{jika } \frac{h}{b} < 1 \quad (3.31)$$

Tegangan tekuk lokal sayap untuk batang diambil yang minimum dari $F_{cr \text{ sayap tepi}}$ dan $F_{cr \text{ sayap badan}}$. Ini memberikan perkiraan yang baik dari tegangan tekuk lokal batang aktual.

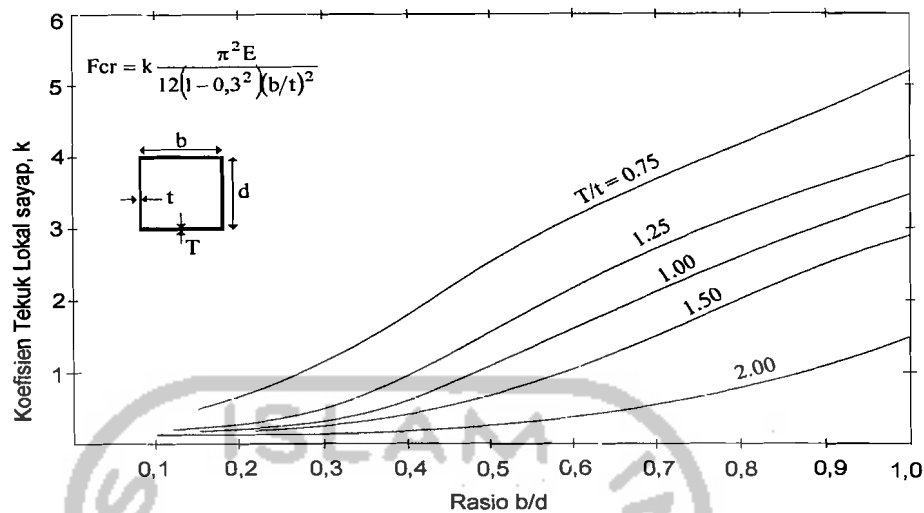
Persamaan diatas memperlihatkan variasi koefisien tekuk k dan nilai F_{cr} untuk kondisi tepi yang berbeda-beda pada profil *Light Lipped Channel*.

Koefisien tekuk pelat k dipengaruhi oleh jenis dukungan pada pelat tersebut. Secara umum, elemen tekuk pelat dibedakan menjadi 2 kategori yaitu, elemen yang diperkuat (elemen yang bertumpu pada dua tepi yang sejajar arah tegangan tekan) dan elemen yang tidak diperkuat (elemen yang bertumpu pada satu tepi bebas dan satu tepi lainnya yang sejajar arah tegangan tekan).

Kerusakan akibat tekuk dapat dicegah dengan cara memperkecil rasio lebar terhadap tebal (b/t) sehingga meningkatkan koefisien tekuk (k). Nilai-nilai koefisien tekuk elastis k untuk penampang I dan penampang kotak pada tekanan yang sama ditunjukkan pada Gambar 3.18 dan gambar 3.19. Menurut **Trahair** dan **Bradford (1988)**, tegangan kritis dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.23 dengan mengganti tebal pelat sebagai tebal sayap t .



Gambar 3.18 Koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang I pada kondisi tekan. (**Trahair dan Bradford 1988**)



Gambar 3.19 Koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang kotak pada kondisi tekan. (Trahair dan Bradford, 1988)

Pada Gambar 3.18 dan Gambar 3.19 dapat dilihat nilai koefisien tekuk lokal pada pelat tipis penampang I dan penampang kotak. Nilai koefisien tekuk pada pelat dipengaruhi oleh rasio lebar sayap terhadap tinggi badan (b/d) dan tebal sayap terhadap tebal badan (T/t). Dari kedua gambar diatas dapat dijelaskan bahwa untuk mendapatkan nilai koefisien tekuk yang besar diperlukan lebar sayap yang semakin panjang dan tebal sayap yang semakin besar sehingga akan tercapai nilai koefisien tekuk yang besar. Penggunaan pelat kotak lebih baik dibandingkan penggunaan pelat I sebab nilai koefisien tekuk pada pelat kotak lebih besar dibandingkan dengan pelat I.

3.5.4 Hubungan Antara Tekuk Local Dan Tekuk Keseluruhan

Panjang batang efektif yang dapat memikul tekan dapat dicari dengan persamaan Euler yaitu bila tekuk keseluruhan sama dengan tekuk lokal. Tekuk lokal dan tekuk keseluruhan dapat terjadi secara bersamaan apabila tegangan kritis batang sama dengan tegangan kritis rangka keseluruhan, namun demikian terjadinya tekuk lokal dan tekuk keseluruhan secara bersamaan sangat kecil kemungkinannya.

F_{cr} batang = F_{cr} keseluruhan (dalam satuan Mpa)

$$k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} = \frac{\pi^2 E}{(LK/r)^2} \quad (3.32)$$

$$\left(\frac{LK}{r}\right)^2 = \frac{12(1-\mu^2)(b/t)^2}{k} \quad (3.33)$$

$$L = \sqrt{\frac{r^2 \cdot [12(1-\mu^2)](b/t)^2}{k \cdot K^2}} \quad (3.34)$$

Dari persamaan di atas diperoleh nilai L , apabila $L_{pakai} > L_{rumus}$ maka mengalami tekuk menyeluruh, jika $L_{pakai} < L_{rumus}$ maka mengalami tekuk lokal.

Dengan asumsi tumpuan pada batang adalah sendi-rol maka $K = 1$, sehingga

$$\left(\frac{L}{r}\right) = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{F_{crplaf}}} \quad (3.35)$$

dengan memasukkan rumus F_{cr} ke Persamaan (3.35), maka

$$\left(\frac{L}{r}\right) = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2}\right)}} \quad (3.36)$$

$$\left(\frac{L}{r}\right) = (b/t) \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \quad (3.37)$$

Dengan μ baja 0,3 sehingga

$$\left(\frac{L}{r}\right) = \frac{3,3045(b/t)}{\sqrt{k}} \quad (3.38)$$

$$k = \left(\frac{3,3045(b/t)(r)}{L}\right)^2 \quad (3.39)$$

Dari persamaan tersebut di atas memperlihatkan bahwa nilai kekakuan suatu batang tekan selalu berbanding terbalik dengan kuadrat panjang batang, sehingga pada profil baja yang sama semakin panjang batang tersebut maka nilai kekakuan dari batang tersebut akan semakin kecil.

Pada profil baja yang sama apabila semakin panjang batang tersebut maka KL/r akan semakin besar sehingga F_{cr} keseluruhan akan semakin kecil bahkan bisa

lebih kecil dari $F_{cr \text{ batang}}$ sehingga keruntuhan rangka diakibatkan oleh tekuk keseluruhan. Sebaliknya, pada profil baja yang sama apabila semakin pendek batang tersebut maka KL/r akan semakin kecil sehingga $F_{cr \text{ keseluruhan}}$ akan semakin besar bahkan bisa lebih besar dari $F_{cr \text{ batang}}$, sehingga keruntuhan rangka diakibatkan oleh tekuk lokal.

3.6 TEGANGAN KRITIS METODE AISC

American Institute Of Steel Construction (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 seperti Persamaan 3.40. Faktor bentuk dipengaruhi oleh bentuk penampang.

$$Q = Q_a \cdot Q_s \quad (3.40)$$

Faktor bentuk untuk elemen penampang yang tidak diperkuat adalah Q_s . Gambar 3.20 menunjukkan kekuatan pelat untuk elemen tekan yang tidak diperkuat dengan satu tepi sendi dan tepi lainnya bebas (*AISC-1978*). Faktor bentuk Q_s untuk sayap diperhitungkan apabila :

$$\left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{250}{\sqrt{F_y}}\right) \text{ MPa} \quad (3.41)$$

Besar Q_s menurut AISC adalah :

$$Q_s = 1,415 - 0,002694 \cdot \left(\frac{b}{t}\right) \sqrt{F_y} \text{ MPa} \quad (3.42)$$

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

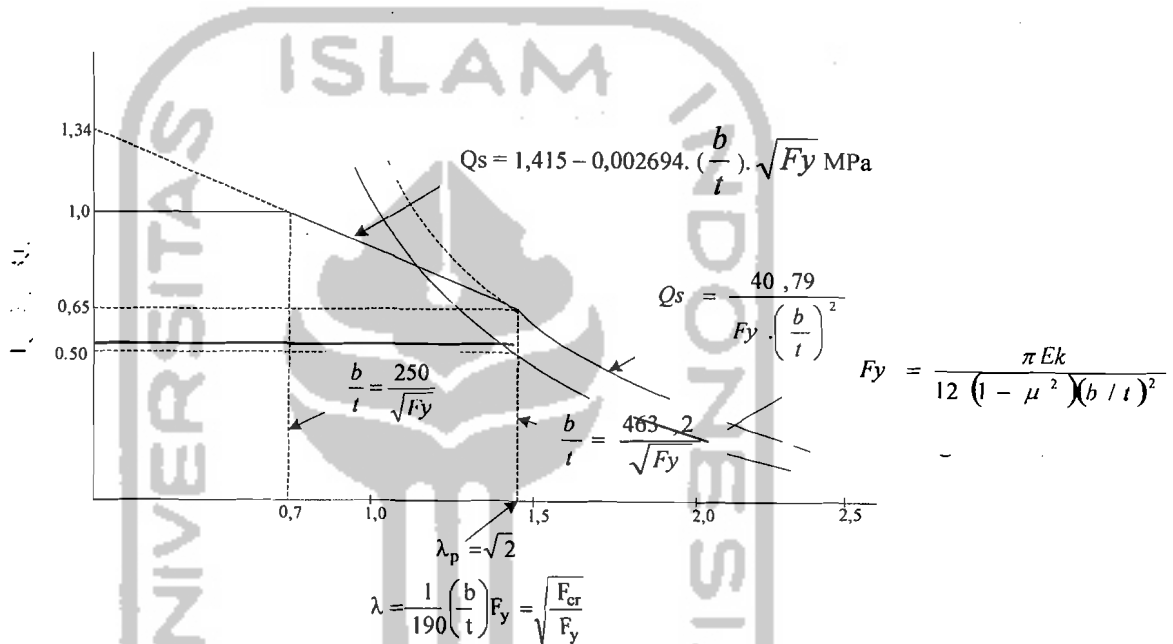
Faktor bentuk untuk elemen penampang yang diperkuat adalah Q_a . Besar Q_a menurut AISC adalah :

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_{bruto}} \quad (3.43)$$

Luas efektif diambil dari lebar efektif, besar lebar efektif menurut penelitian AISC yang dilakukan pada baja ringan adalah,

$$\frac{b_E}{t} = \frac{21}{\sqrt{f}} \left(1 - \frac{4,18}{(b/t)\sqrt{f}} \right) \text{MPa} \tag{3.44}$$

Dengan f adalah tegangan yang bekerja pada elemen.



Gambar 3.20 Kekuatan pelat untuk elemen tekan yang tidak diperkuat dengan satu tepi sendi dan tepi lainnya bebas (AISC, 1978)

Besar tegangan kritis menurut AISC dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan tegangan kritis kolom seperti pada persamaan dibawah ini.

$$F_{cr} = QF_y \left[1 - \frac{QF_y}{4\pi E} \left(\frac{KL}{r} \right)^2 \right] \tag{3.45}$$

Apabila

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{QF_y}} \tag{3.46}$$

Maka,

$$F_{cr} = QF_y \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2Cc^2} \right] \quad (3.47)$$

Apabila KL/r lebih dari C_c maka tegangan kritis yang terjadi :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.48)$$

3.7 PENGARUH SUDUT MIRING ATAP TERHADAP KESTABILAN RANGKA

Sebuah struktur rangka batang secara umum dapat dipandang terdiri atas bermacam-macam bagian, yaitu rangka utama (kuda-kuda) dan komponen pengeang (*bracing*). Persyaratan setiap komponen rangka harus cukup kuat dan kaku. Salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan dan kekakuan sebuah struktur rangka batang adalah sudut miring atap.

Sudut miring atap akan berpengaruh terhadap tinggi rangka dan panjang batang tepi pada rangka dengan batang tepi sejajar, terutama batang tepi yang memikul tekan yaitu batang tepi atas. Pada rangka yang menerima beban sebesar P pada puncaknya maka pada batang tepi atasnya akan menerima gaya tekan (-) dan hal ini berpengaruh terhadap panjang efektif (L_1) komponen tekan tersebut. Panjang batang tepi atas dapat berpengaruh terhadap masalah *instabilitas* atau tekuk yang dapat menyebabkan terjadinya kegagalan dini (*premateur collapse*) pada komponen tekan tersebut.

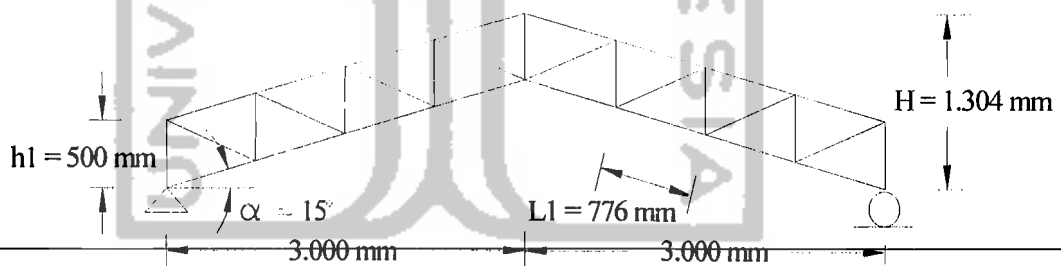
Gaya transversal P juga menimbulkan deformasi aksial pada setiap komponen rangka, dimana batang tekan mengalami perpendekan dan batang tarik mengalami perpanjangan. Deformasi aksial setiap komponen rangka menimbulkan lendutan arah transversal. Struktur cukup kaku bila lendutan pada struktur tersebut lebih kecil dari lendutan yang dipersyaratkan. Rangka dengan

sudut miring semakin besar akan mengakibatkan rangka bertambah tinggi dan batang tepi sejajar bertambah panjang.

Mengacu pada persamaan tegangan yang terjadi pada komponen tekan pada batang tepi atas rangka (Persamaan 3.19), bahwa kapasitas tekan dalam memikul gaya tekan selalu berbanding terbalik dengan kuadrat panjang efektif batang. Rangka yang memiliki bentang efektif (L_1) pendek, bila diberi beban aksial cenderung akan mengakibatkan lendutan menjadi kecil sehingga kekuatan dan kekakuan struktur cenderung meningkat. Jika sudut miring atap besar, maka rangka semakin tinggi sehingga gaya aksial (P) yang dapat didukung struktur rangka relatif besar.

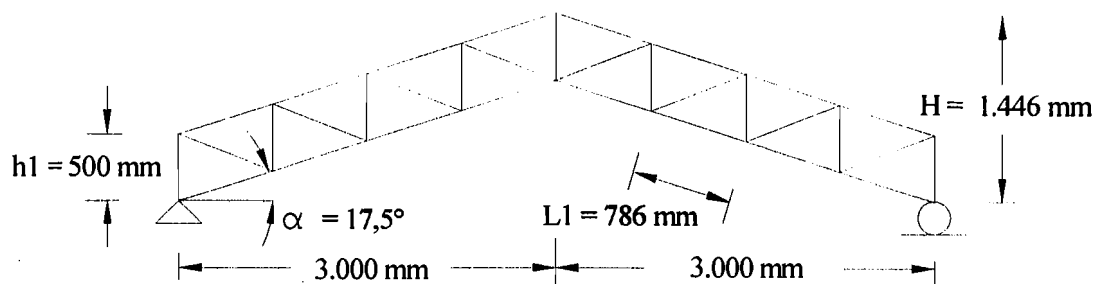
Pada penelitian ini dipakai variasi tinggi terhadap bentang pada rangka batang tepi sejajar (tinggi rangka bervariasi dengan panjang bentang konstan, sudut miring atap yang digunakan : 15° , $17,5^\circ$, 20° dan $22,5^\circ$ seperti terlihat pada Gambar 3.21, 3.22, 3.23, dan 3.24.

3.7.1 Rangka Batang Tepi Sejajar Dengan Sudut Miring Atap 15°



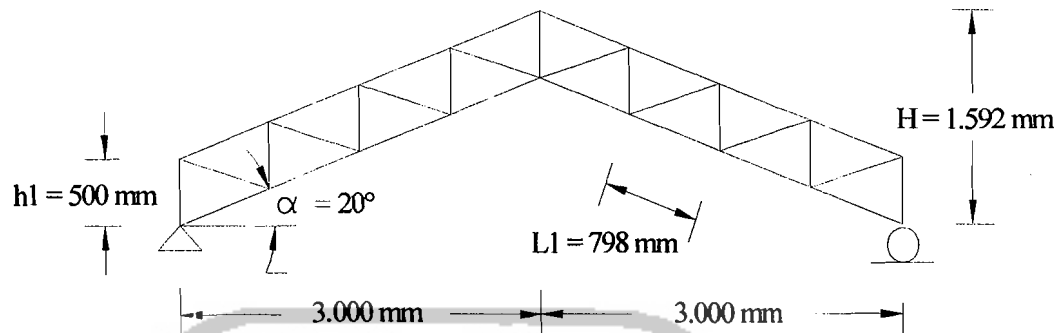
Gambar 3.21 Rangka batang tepi sejajar dengan sudut miring atap 15°

3.7.2 Rangka Batang Tepi Sejajar Dengan Sudut Miring Atap $17,5^\circ$



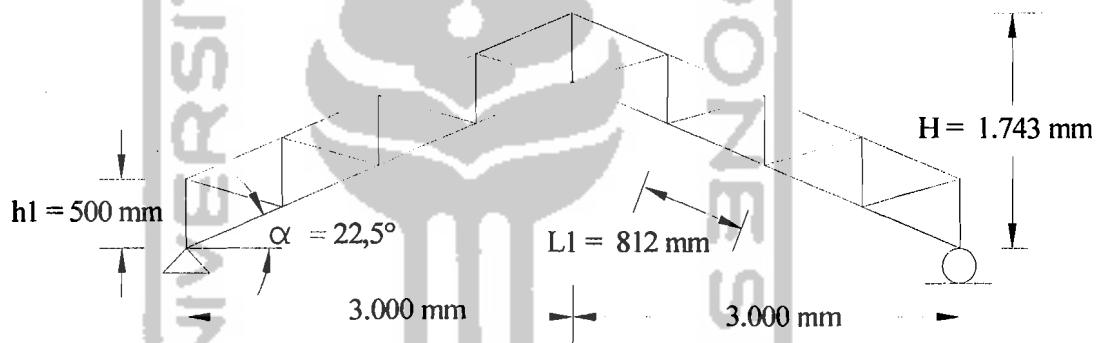
Gambar 3.22 Rangka batang tepi sejajar dengan sudut miring atap $17,5^\circ$

3.7.3 Rangka Batang Tepi Sejajar Dengan Sudut Miring Atap 20°



Gambar 3.23 Rangka batang tepi sejajar dengan sudut miring atap 20°

3.7.4 Rangka Batang Tepi Sejajar Dengan Sudut Miring Atap 22,5°

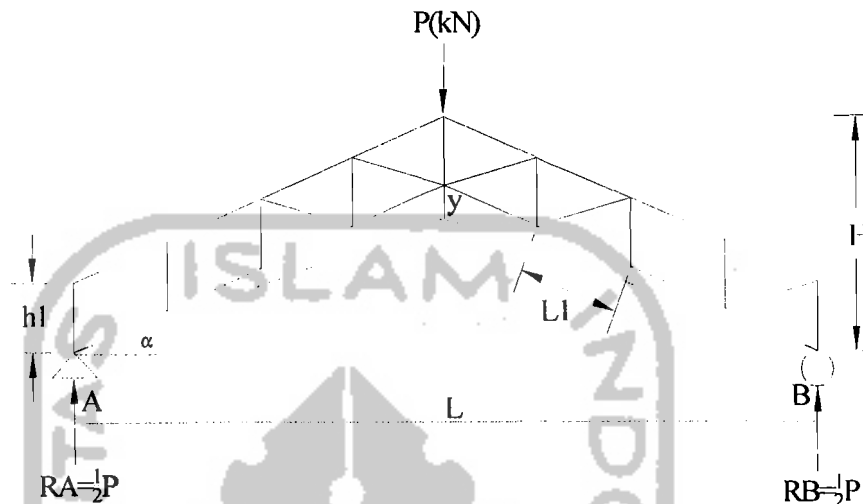


Gambar 3.24 Rangka batang tepi sejajar dengan sudut miring atap 22,5°

3.8 HUBUNGAN BEBAN - LENDUTAN

Beban dapat menyebabkan timbulnya lentur, maka pada suatu rangka yang diberi beban pasti mengalami lendutan seperti terlihat pada Gambar 3.25. Rangka dengan batang tepi sejajar memiliki nilai modulus elastisitas dan inersia (EI) konstan sehingga untuk analisis lendutan, rangka diasumsikan sebagai balok yang mempunyai tumpuan sederhana. *Lynn S. Beedle (1958)* mengemukakan bahwa balok dengan dukungan sederhana yang diberi beban memiliki satu titik yang momennya maksimum. Semakin besar beban yang diberikan semakin besar pula

momennya. Jika beban semakin besar, material akan terdeformasi semakin cepat dan defleksi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 3. 25 Rangka yang mengalami lendutan (y) akibat beban aksial (P)

Lendutan yang terjadi pada balok dapat dihitung dengan banyak cara, salah satu diantaranya adalah metode integrasi ganda terhadap persamaan kelengkungan, sebagaimana yang dikemukakan *Singer dan Pytel (1985)*. Besarnya lendutan pada struktur rangka dapat didekati dengan persamaan diferensial kurva elastis balok yang ditunjukkan pada Persamaan (3.49).

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (3.49)$$

karena nilai EI konstan, maka Persamaan (3.49) dapat diintegrasikan menjadi Persamaan (3.50) yang merupakan persamaan kemiringan kurva lendutan balok.

$$\frac{dy}{dx} = \int \frac{M}{EI} dx + C_1 \quad (3.50)$$

besarnya lendutan pada rangka dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan kemiringan kurva lendutan seperti ditunjukkan pada Persamaan (3.51) menjadi Persamaan (3.52).

$$y = \int \int \frac{M}{EI} dx dx + \int C_1 dx + C_2 \quad (3.51)$$

$$y = \Delta = \int \int \frac{M}{EI} dx dx + \int C_1 dx + C_2 \quad (3.52)$$

Mengacu pada persamaan diferensial kurva elastis balok, lendutan (Δ) yang terjadi akibat beban terpusat di puncak struktur dapat didekati dengan Persamaan (3.53)

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1/2 Px - P(x - 1/2 L)}{EI} \quad (3.53)$$

Integral Persamaan (3.53) adalah

$$y = \frac{\frac{1}{4} Px^2 - \frac{P}{2} \left(x - \frac{1}{2} L\right)^2 + C_1}{EI} \quad (3.54)$$

Integral Persamaan (3.54) adalah

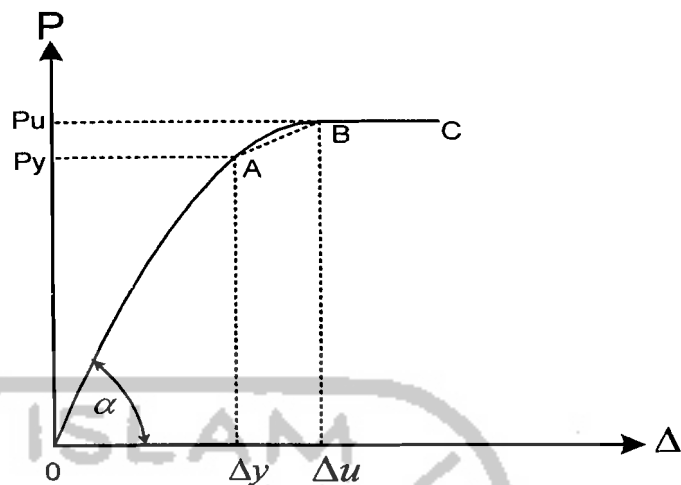
$$y = \frac{\frac{1}{12} Px^3 - \frac{P}{6} \left(x - \frac{1}{2} L\right)^3 + C_1 x + C_2}{EI} \quad (3.55)$$

Dari persamaan 3.55, maka lendutan (Δ) yang terjadi pada tengah bentang rangka ($x = \frac{1}{2} L$) dapat dihitung dengan Persamaan (3.56)

$$\Delta = \frac{P.L^3}{48 EI} \quad (3.56)$$

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

Menurut *Timoshenko (1987)*, kekakuan (k) didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu satuan defleksi. Dimana kekakuan struktur adalah rasio beban terhadap lendutan yang terjadi. Pada Gambar 3.25 terlihat bahwa beban P yang bekerja pada struktur dapat menyebabkan terjadinya defleksi Δ . Besarnya lendutan sesuai dengan beban yang bekerja pada struktur. Kemiringan dari lengkung yang dihasilkan disebut sebagai kekakuan.



Gambar 3. 26 Grafik hubungan beban (P) - lendutan(Δ)

Pada Gambar 3.26 terlihat bahwa kekakuan struktur nampak linier sampai pada beban P_u . Selanjutnya struktur hanya mampu menerima beban konstan. Sedangkan lendutan yang terjadi terus bertambah sampai struktur tersebut hancur. Dari hubungan beban (P) - lendutan (Δ) akan membentuk sudut sebesar α , dimana nilai kekakuan bisa diketahui menggunakan Persamaan (3.57).

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{P_y}{\Delta_y} \quad (3.57)$$

Dari hubungan persamaan kekakuan batang ($k = P_y/\Delta_y$) dapat diketahui bahwa semakin besar lendutan yang terjadi maka nilai kekakuan batang menjadi berkurang dengan demikian kekuatan batang dalam menerima beban juga semakin kecil. Persamaan (3.57) merupakan nilai kekakuan struktur berdasarkan uji lentur.

Menggunakan substitusi Persamaan (3.56) ke dalam Persamaan (3.57), nilai kekakuan struktur rangka batang tepi sejajar seperti pada Gambar 3.25 dapat didekati menggunakan Persamaan (3.58) di bawah ini:

$$k = \frac{c \cdot E I}{L^3} \quad (3.58)$$

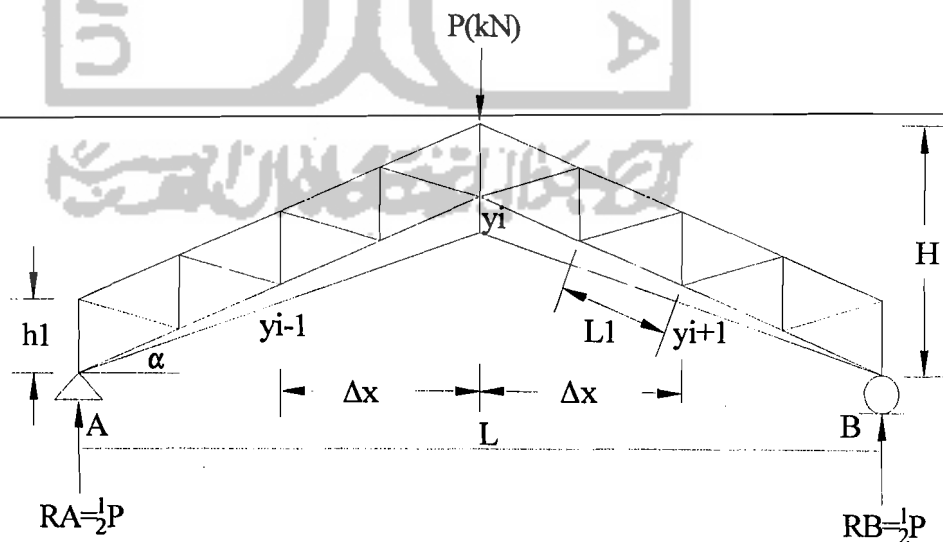
dengan: c = konstanta; I = Inersia bahan; E = modulus elastisitas; L = panjang bentang struktur rangka.



Menurut penelitian yang dilakukan oleh *American Society for testing and material* (ASTM) yang ditulis oleh *Timoshenko (1987)*, bahwa kekakuan rangka hingga beban patah dinyatakan oleh garis O – A pada diagram beban-lendutan dari Gambar 3.26 atau disebut juga dengan daerah elastis. Dengan penambahan beban pada rangka maka rangka akan menjadi plastis sebagian dimana ditunjukkan pada garis A – B, hingga pada akhirnya rangka menjadi plastis sempurna dimana ditunjukkan pada garis B-C, setelah itu rangka atau struktur tidak mampu lagi memikul tambahan beban.

3.9 HUBUNGAN MOMEN KELENGKUNGAN

Apabila suatu material diberi beban maka material itu secara langsung akan terdefleksi. Semakin besar beban yang diberikan pada suatu material semakin besar pula defleksi yang terjadi pada material tersebut seperti pada Gambar 3.27. Pemberian beban arah transversal terpusat (P) pada struktur rangka batang akan mengakibatkan terjadinya momen dan defleksi. Perilaku struktur yang mengalami lentur dapat diketahui dari hubungan momen-kelengkungan.



Gambar 3. 27 Rangka yang diberi beban aksial (P)

Kelengkungan adalah kurva defleksi dari struktur yang diakibatkan oleh beban yang bekerja pada struktur tersebut, seperti pada Gambar 3.27 struktur rangka mengalami lendutan sebesar Δ . Menurut *Singer dan Pytel (1985)*, kelengkungan yang terjadi pada struktur dapat didekati menggunakan Persamaan (3.59) berikut :

$$\kappa = \frac{d^2 y / dx^2}{(1 + (dy/dx)^2)^{3/2}} = \phi = \frac{M}{EI} \quad (3.59)$$

karena lendutan dianggap kecil, sehingga kurva elastis mendekati datar, harga dan kemiringan kurva (dy/dx) pada setiap titik sangat kecil sehingga Persamaan (3.59) dapat ditulis kembali menjadi Persamaan (3.60).

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (3.60)$$

Timoshenko (1987), mengemukakan bahwa faktor kekakuan (EI) didefinisikan sebagai rasio momen dan kelengkungan. Sehingga persamaan momen (M) menjadi :

$$M = EI \cdot \phi \quad (3.61)$$

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3.62)$$

Persamaan untuk kekakuan lentur (EI) ditunjukkan,

$$EI = \frac{M}{(d^2 y / dx^2)} \quad (3.63)$$

Untuk menghitung nilai kekakuan lentur (EI) digunakan lendutan yang didapat dari hasil pengujian kuat lentur pada titik-titik pembebanan yang berurutan pada jarak (Δx) yang sama. dengan melalui pendekatan kemiringan menggunakan metode *Central Difference*, pada Gambar 3.27 dy/dx didekati dengan persamaan berikut :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.64)$$

turunan kedua Persamaan 3.64 adalah

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x)(d/dx)(y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1})(d/dx)(2\Delta x)}{(2\Delta x)^2} \quad (3.65)$$

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

$$\frac{d}{dx}(2\Delta x) = 0 \quad (3.66)$$

Sehingga Persamaan 3.67

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta x)(d/dx)(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta x)^2} \quad (3.67)$$

Selanjutnya dari Persamaan 3.67 didapatkan

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.68)$$

Kemudian Persamaan 3.68 disederhanakan menjadi

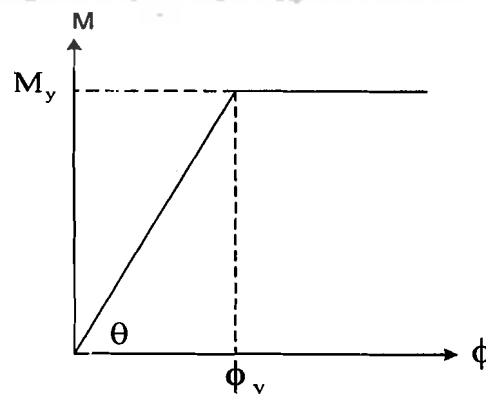
$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta_x)^2} \quad (3.69)$$

bila $\frac{d^2 y}{dx^2} = \phi$, maka Persamaan (3.69) dapat ditulis kembali menjadi Persamaan (3.70) berikut ini:

$$\phi = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (3.70)$$

Persamaan (3.70) merupakan persamaan kelengkungan, dimana kelengkungan ($d^2 y / dx^2$) pada suatu titik dapat diukur dengan lendutan yang terjadi pada 3 titik yang berurutan ($y_{i-1}; y_i; y_{i+1}$) yang masing-masing berjarak sama (Δx).

Hubungan momen (M) dan kelengkungan (curvature)(ϕ) ditunjukkan pada Gambar 3. 28.

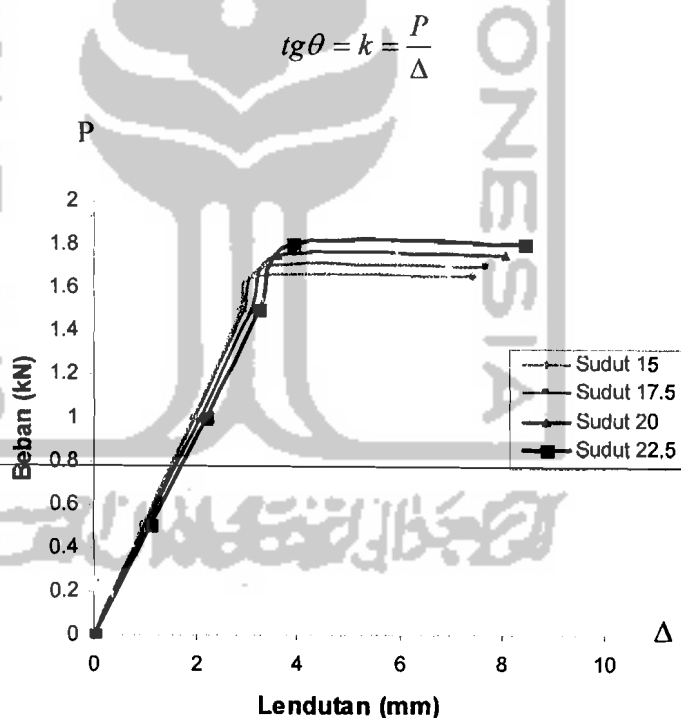


Gambar 3. 28 Hubungan momen (M) dan kelengkungan (ϕ)

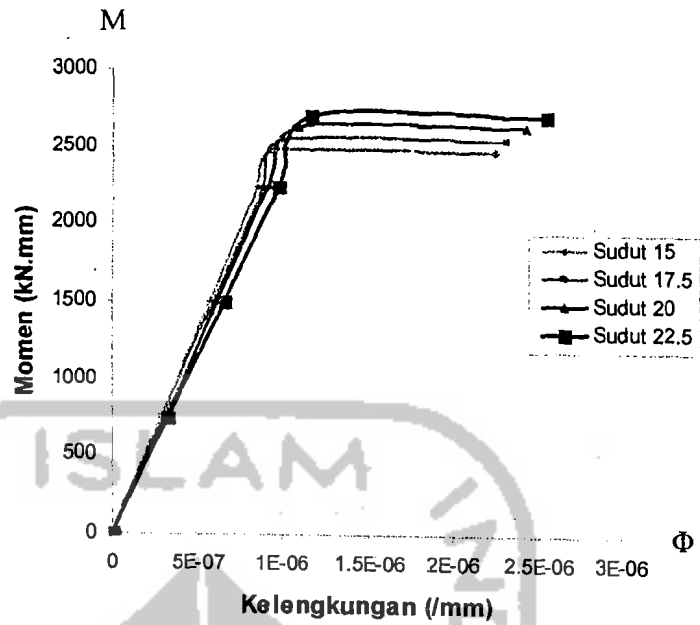
Dari grafik hubungan beban-lendutan dan momen-kelengkungan secara keseluruhan dapat dijelaskan bahwa rangka kuda-kuda akan mengalami degradasi kekuatan yang dipengaruhi oleh nilai kekakuan (k) atau faktor kekakuan (EI).

3.10 HIPOTESIS

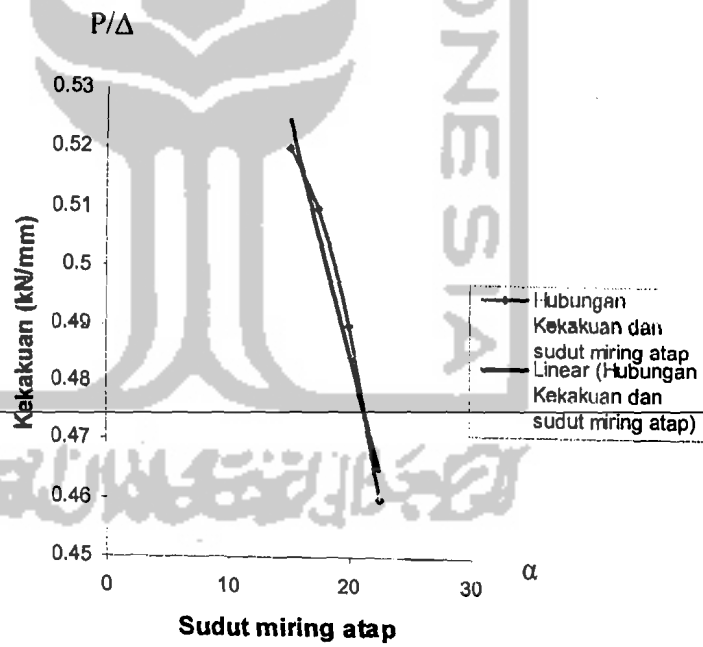
Berdasarkan landasan teori diatas dapat diambil hipotesis sebagai berikut : *Kapasitas pikul* beban suatu batang tekan selalu berbanding terbalik dengan kuadrat panjang batang, sebanding dengan modulus elastisitas dan momen inersia penampang. Apabila suatu struktur rangka atap dengan bentang dan jumlah batang pengisi vertikal tetap diberi beban terpusat (P), maka kemungkinan akan terjadi lendutan (Δ) yang besarnya dipengaruhi oleh sudut miring atap, sehingga dapat mempengaruhi kekakuan struktur rangka atap tersebut.



Gambar 3.29 Hubungan beban (P) dan lendutan (Δ)



Gambar 3.30 Hubungan momen (M) dan kelengkungan (ϕ)



Gambar 3.31 Hubungan kekakuan dan sudut miring atap

Dari Gambar 3.29, Gambar 3.30 dan Gambar 3.31 terlihat bahwa

1. Semakin besar beban yang dipikul oleh rangka, semakin besar lendutan yang terjadi.
2. Semakin besar sudut miring atap, beban yang dapat didukung oleh batang tekan semakin besar.
3. Semakin kecil sudut miring atap (bentang efektif rangka pendek), rangka semakin kaku.



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA