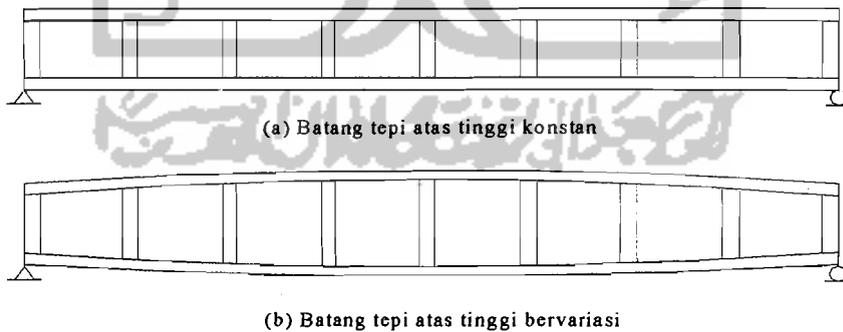


BAB III

LANDASAN TEORI

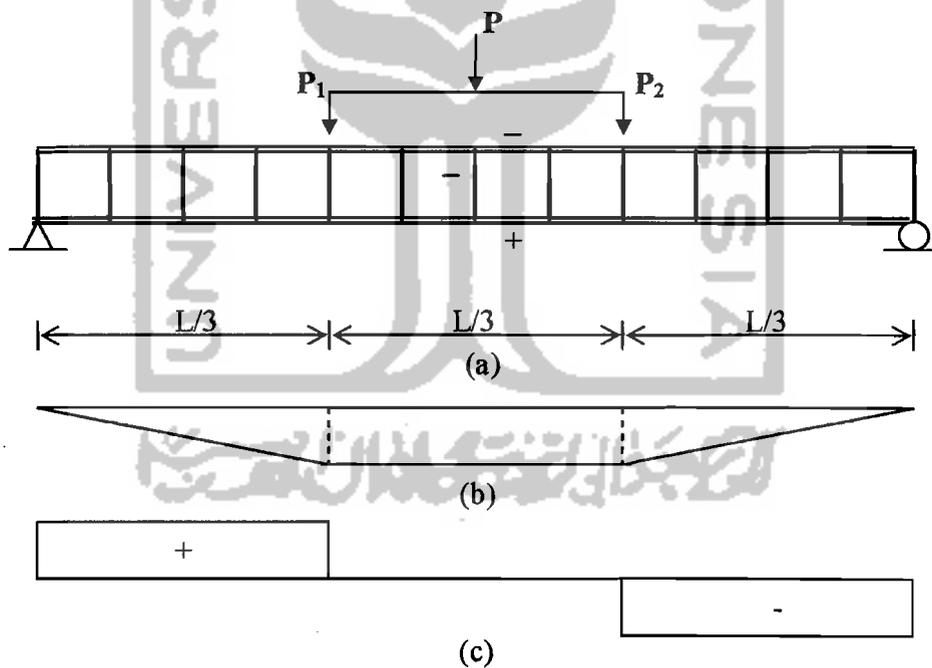
3.1 Pendahuluan

Balok *Vierendeel* adalah balok badan terbuka yang terdiri dari batang tepi atas dan batang tepi bawah yang dihubungkan secara kaku dengan batang transversal sehingga membentuk struktur dengan pola segi empat. Gambar 3.1 adalah contoh dari balok *vierendeel* sederhana. Gambar 3.1.a balok *vierendeel* dengan batang tepi atas tinggi konstan dan gambar 3.1.b balok *vierendeel* dengan batang tepi atas tinggi bervariasi.

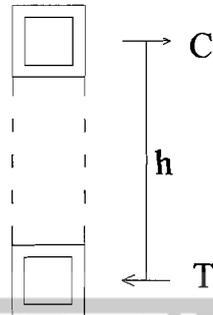


Gambar 3.1. Balok *Vierendeel* dengan tumpuan sederhana

Bila struktur tersebut menerima beban transversal yang tegak lurus dengan sumbu longitudinal (Gambar 3.2.a) maka dalam struktur akan terjadi aksi internal berupa momen (Gambar 3.2.b) dan gaya geser (Gambar 3.2.c), hal ini mengakibatkan terjadinya lentur pada balok. Sepertiga bentang tengah dimana tidak terjadi gaya geser akan menerima lentur murni sedangkan sepertiga bentang yang lain menerima lentur dan gaya geser. 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).



Gambar 3.2. (a). Peristiwa pembebanan pada balok *Vierendeel*
 (b). Diagram momen
 (c). Diagram geser



Gambar 3.3 Momen kopel gaya

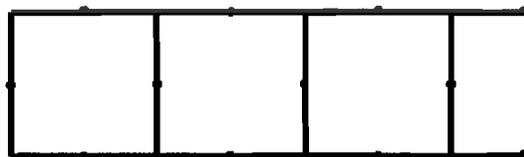
Mengacu pada Gambar (3.3), hubungan antara momen nominal balok *vierendeel* adalah persamaan (3.1):

$$M = C.h = T.h \quad (3.1)$$

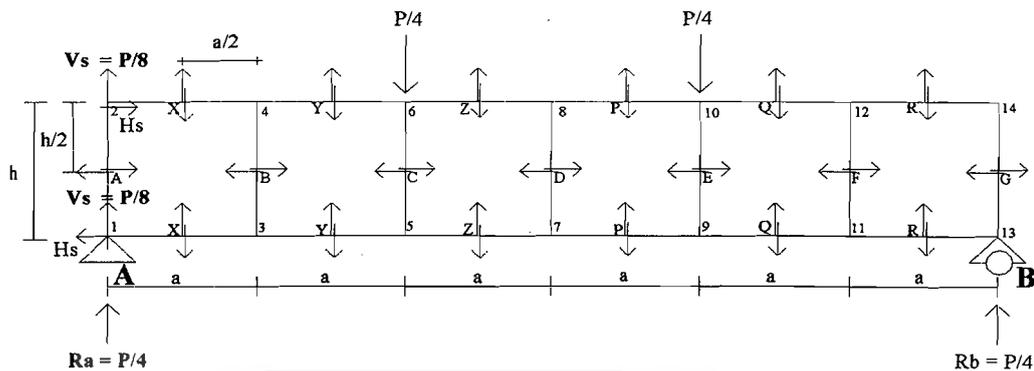
dari persamaan 3.1 tampak semakin tinggi batang transversal (h) maka gaya desak C semakin kecil.

3.2 Metode Analisis Balok *Vierendeel*

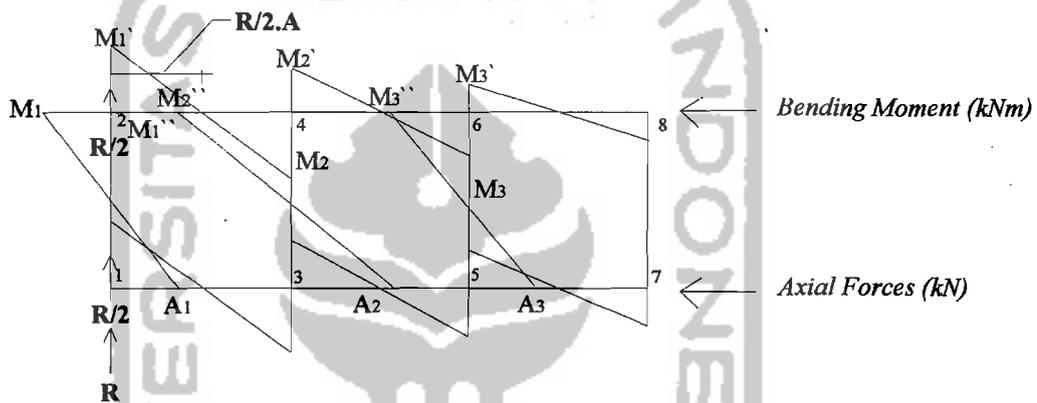
Analisis balok *vierendeel* dapat menggunakan metode portal seperti dikemukakan oleh *Wolfgang Schueller* yaitu dengan asumsi terbentuk sendi di tengah-tengah batang tepi dan batang transversal balok *vierendeel* seperti ditunjukkan Gambar 3.4.



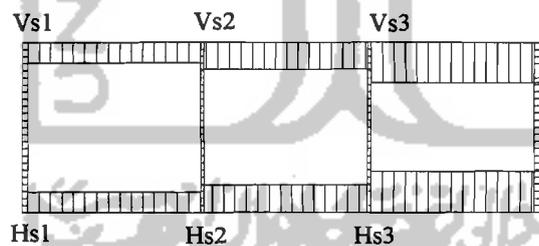
Gambar 3.4. Asumsi sendi pada tengah batang



Gambar 3.5. Analisis balok *vierendeel* dengan metode analisis statis



Gambar 3.6. Diagram momen lentur balok *vierendeel*



Gambar 3.7. Diagram gaya geser balok *vierendeel*

Analisis balok *vierendeel* dapat dilakukan dengan metode analisis statis. Karena balok simetris, maka perhitungan dilakukan hanya setengah bentang. Balok *vierendeel* seperti pada Gambar (3.5) dengan menggunakan persamaan kesetimbangan $\sum V = 0$ didapatkan reaksi R_A dan R_B . Besarnya gaya geser pada

potongan X-X adalah R_A . Nilai gaya geser ini dibagi sama rata pada batang atas dan batang bawah untuk mendapatkan gaya geser pada sendi X yaitu sebesar $\frac{R_A}{2}$. Kemudian dicari nilai gaya geser (V), gaya aksial (P), dan momen (M).

a. Menghitung Momen

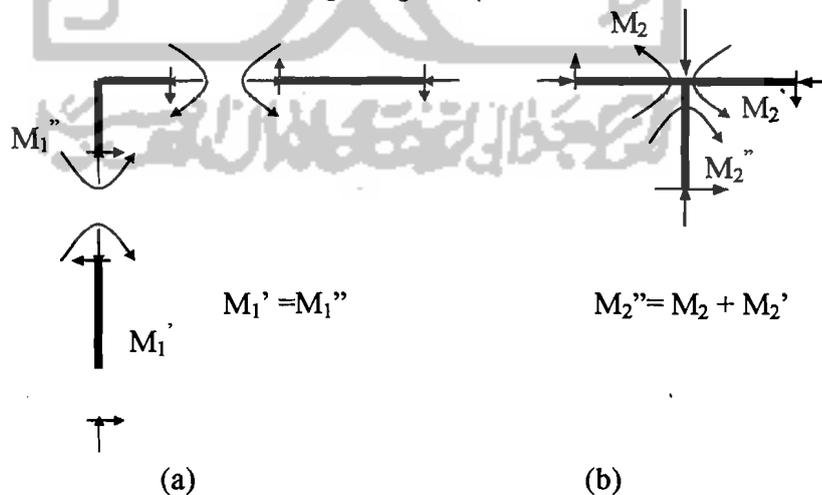
Perhatikan Gambar (3.6) besarnya momen horisontal didapat dengan mengalikan gaya geser pada masing-masing sendi dengan setengah kali panjang batang, yaitu:

$$M_1' = M_2 = V_s \times \frac{a}{2} = \frac{P}{4} \times \frac{a}{2} = \frac{Pa}{8} \quad (3.2)$$

$$M_2' = M_3 = V_s \times \frac{a}{2} = \frac{P}{4} \times \frac{a}{2} = \frac{Pa}{8} \quad (3.3)$$

Dengan kesetimbangan join dapat dicari besarnya momen pada batang vertikal (Gambar 3.8a dan 3.8b), yaitu:

$$M_2'' = M_2 + M_2' = \frac{Pa}{8} + \frac{Pa}{8} = \frac{Pa}{4} \quad (3.4)$$



Gambar 3.8. Momen pada perpotongan batang

b. Menghitung Gaya Geser

Perhatikan balok *vierendeel* pada Gambar (3.5) Dengan persamaan kesetimbangan $\sum V = 0$ didapat nilai reaksi $R_A = P/4$ dan $R_B = P/4$. Besarnya gaya geser vertikal (V_s) pada join 1 dan 2 adalah $V_{s1} = P/4$. Gaya geser horisontal (H_s) didapat dengan membagi momen vertikal pada join dengan setengah tingginya yaitu $\frac{h}{2}$. Pada setiap elemen batang anggap adanya sendi dengan jarak $\frac{a}{2}$ pada batang tepi atas dan $\frac{h}{2}$ pada batang transversal.

c. Menghitung Gaya Aksial

Gaya aksial pada balok *vierendeel* dapat dihitung dengan menjumlahkan gaya geser horisontal.

$$A_1 = H_{s1} \quad (3.5)$$

$$A_2 = H_{s1} + H_{s2} \quad (3.6)$$

$$A_3 = H_{s1} + H_{s2} + H_{s3} \quad (3.7)$$

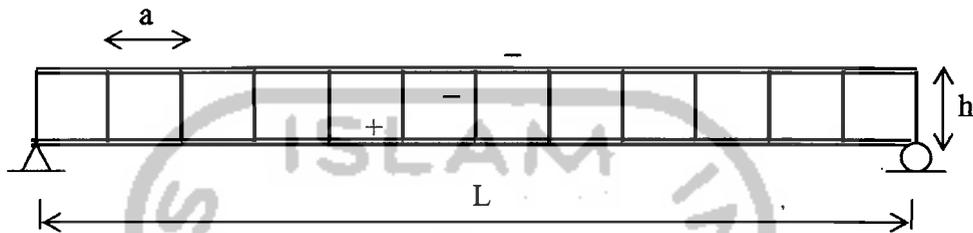
Dari analisa di atas dapat disimpulkan bahwa semakin panjang batang tepi atas (a) dan batang transversal (h), maka momen yang terjadi akan semakin besar.

3.3 Batang Tekan

Batang tekan adalah batang-batang struktural yang mengalami gaya tekan aksial. Pada balok *vierendeel*, batang yang mengalami gaya tekan adalah batang tepi atas dan batang transversal.

Menurut Persamaan Euler seperti yang dikemukakan oleh *Salmon dan Johnson* (1980), kekuatan batang tekan dinyatakan dengan Persamaan (3.8) :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.8)$$



Gambar 3.9 Balok *vierendeel*

Pada balok *vierendeel* (Gambar 3.9) nilai beban tekuk kritis elastis (P_{cr}) dipengaruhi panjang batang tepi atas (a) dan tinggi batang transversal (h), sehingga Persamaan (3.8) dapat dinyatakan sebagai :

a. Batang Tepi Atas

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{a^2} \quad (3.9)$$

b. Batang Transversal

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{h^2} \quad (3.10)$$

Tampak dari Persamaan (3.9) dan (3.10) semakin panjang batang tepi atas dan semakin tinggi batang transversal maka nilai P_{cr} akan semakin kecil.

bila dinyatakan dalam tegangan tekan rata-rata dengan Inersia, $I = A_g \cdot r^2$ diperoleh Persamaan (3.11).

$$F_{cr} = \frac{P_{cr}}{A_g} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.11)$$

Pada batang tekan berlaku dua kondisi yaitu langsing dan tidak langsing (pendek), dimana kelangsingan merupakan rasio antara panjang batang dan jari-jari inersia tampang. Kelangsingan batas antara kolom langsing dan kolom pendek ditentukan berdasarkan asumsi bahwa, tegangan kritis maksimum untuk tekuk elastis adalah setengah kali tegangan leleh. (Padosbajayo, 1992)

Kelangsingan batas (C_c) menurut AISC ditentukan dengan Persamaan (3.12) :

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (3.12)$$

Batang langsing yang mengalami gaya tekan akan mengalami tekuk elastis, sedangkan pada batang pendek yang mengalami gaya tekan akan mengalami tekuk inelastis.

Untuk kondisi pada kolom langsing ($KL/r > C_c$), tegangan ijin yang berlaku masih sesuai dengan Persamaan Euler, yaitu Persamaan (3.13) :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.13)$$

Sedangkan untuk kolom pendek ($KL/r < C_c$), tegangan ijin menurut AISC adalah Persamaan (3.14) :

$$F_{cr} = F_y \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] \quad (3.14)$$

dengan :

KL/r = angka kelangsingan efektif

K = faktor panjang efektif

L = panjang kolom

C_c = rasio kelangsingan kolom (kondisi tekuk elastis dan tekuk inelastis)

F_y = tegangan leleh bahan

E = modulus elastisitas

Pada balok *vierendeel* panjang batang tepi atas (a) dan tinggi batang transversal (h) berbanding terbalik dengan nilai F_{cr} yaitu semakin panjang batang tepi atas dan semakin tinggi batang transversal maka nilai F_{cr} akan semakin kecil. Ketidakstabilan batang-batang yang mengalami lentur dibatasi oleh tekuk setempat pada sayap, tekuk setempat pada badan dan tekuk puntir lateral. Tegangan kritis gelagar plat dari baja merupakan fungsi dari Persamaan (3.15):

$$F_{cr} = f \left\{ \frac{b}{2t_f}, \frac{h}{t_w}, \frac{a}{h} \right\} \quad (3.15)$$

dengan : F_{cr} = tegangan kritis

f = tegangan yang terjadi

b = lebar sayap

t_f = tebal sayap

h = tinggi badan

t_w = tebal badan

a = jarak antar pengaku

Menurut *Salmon dan Johnson* (1996), tegangan tekuk elastik teoritik atau tegangan kritik plat yang tertekan dapat dinyatakan dengan Persamaan (3.16) :

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (3.16)$$

dengan :

F_{cr} = tegangan kritis

k = koefisien tekuk

π = 3,14

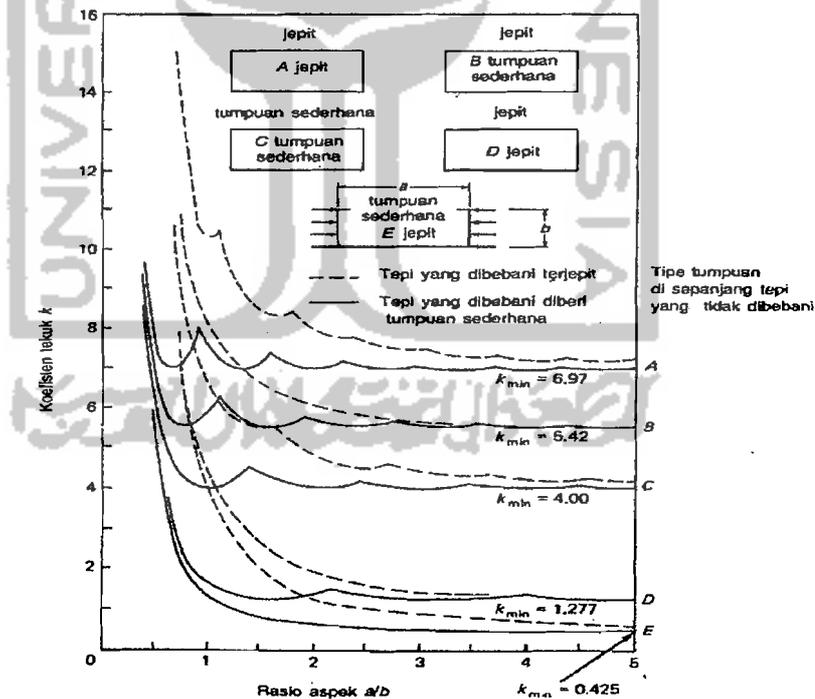
E = modulus elastis

μ = 0,30 (*rasio poisson*)

b = lebar sayap

t = tebal sayap

Nilai k tergantung pada tipe tegangan, kondisi tumpuan tepi, dan rasio panjang terhadap lebar (rasio aspek) dari plat yang bersangkutan. Gambar (3.10) menunjukkan variasi k terhadap rasio aspek a/b untuk berbagai kondisi tumpuan tepi ideal (*Salmon dan. Johnson, 1996*).

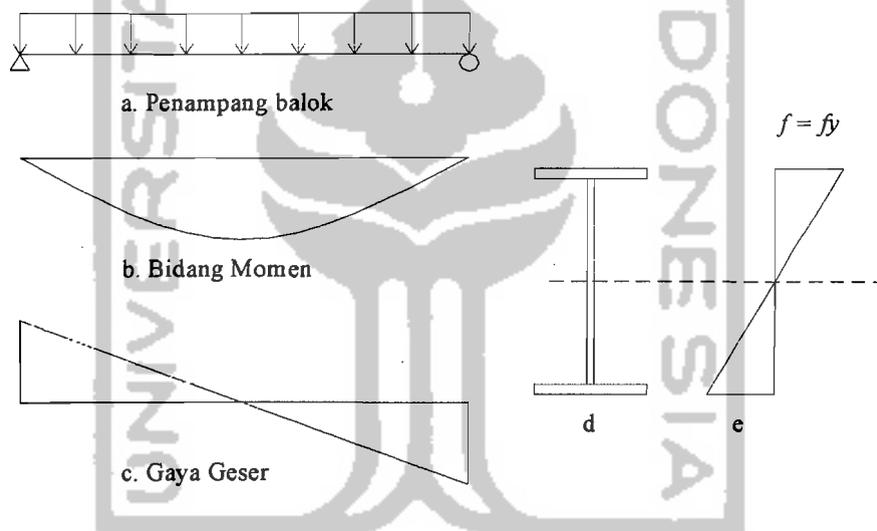


Gambar 3.10 Koefisien tekuk elastis untuk tekuk pada plat segi empat datar (Diambil dari George Gerard dan Herbert Becker, 1957)

3.4 Batang Lentur

Batang lentur sering didefinisikan sebagai balok, adalah elemen struktur yang memikul beban yang bekerja tegak lurus dengan sumbu longitudinalnya. Kekuatan lentur terhadap sumbu kuat bahan menjadi pokok perhatian yang penting, sehingga profil-profil yang dipilih umumnya adalah yang berbentuk I.

Penampang balok akibat momen akan mengalami lentur seperti yang ditunjukkan pada Gambar (3.11).



Gambar 3.11 Distribusi Tegangan Lentur pada Balok Penampang I

Dalam keadaan elastis distribusi tegangan lentur dinyatakan dengan Persamaan (3.17) :

$$\sigma = f_b = \pm \frac{M \cdot y}{I} \quad (3.17)$$

Dimana (I/y) disebut juga sebagai modulus potong (S), sehingga Persamaan (3.17) menjadi Persamaan (3.18):

$$f_b = \pm \frac{M}{S} \quad (3.18)$$

dengan :

f_b = tegangan pada serat yang ditinjau

M = momen lentur

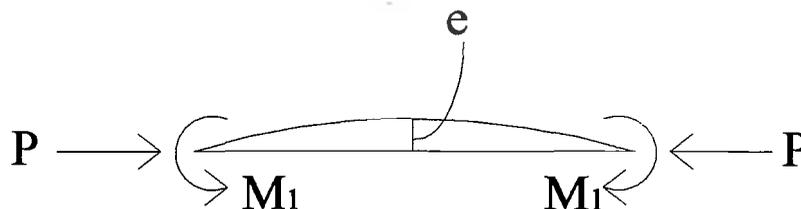
Y = jarak serat yang ditinjau ke garis netral

I = momen inersia dari penampang

Dengan memperbesar momen inersia penampang balok maka tegangan di serat terluar pada penampang balok (f_b) menjadi kecil.

3.5 Kombinasi Tekan Lentur

Suatu batang yang menderita beban tekan aksial dan momen lentur secara bersamaan dinamakan batang dengan kombinasi tekan-lentur. Akibat momen lentur batang tersebut berperilaku sebagai balok, dilain pihak akibat adanya desak aksial menjadikan batang tersebut berperilaku sebagai kolom (Padosbajayo, 1992), seperti yang ditunjukkan pada Gambar (3.12).



Gambar 3.12 Balok-kolom

Akibat gaya aksial (P) menyebabkan balok melentur sehingga timbul e dimana $P \cdot e$ disebut juga sebagai momen sekunder (ΔM). Momen yang terjadi pada balok tersebut dapat dinyatakan sebagai :

$$M = M_1 + \Delta M \quad (3.19)$$

$$\Delta M = P \cdot e \quad (3.20)$$

$$M_1 = \left(\frac{1}{1 - \frac{P}{P_e}} \right) \cdot M \quad (3.21)$$

dengan :

P = gaya aksial

M_1 = pembesaran momen (amplifikasi)

ΔM = momen sekunder

3.6 Tekuk Puntir Lateral

Kekuatan maksimum suatu balok akan mencapai kekuatan momen plastisnya. Entah kekuatan momen plastis tersebut tercapai atau tidak, ada tiga kegagalan yang mungkin terjadi yaitu tekuk lokal sayap tekan, tekuk lokal badan balok dan tekuk puntir lateral. Tekuk lokal sangat tergantung pada bentuk penampang.

a. Penampang Kompak

Kekuatan nominal M_n untuk penampang kompak yang secara lateral stabil dapat dinyatakan sebagai :

$$M_n = M_p$$

b. Penampang Non-kompak

Kekuatan nominal M_n untuk penampang non-kompak adalah kekuatan momen yang tersedia bila serat terluarnya berada pada tegangan leleh F_y . Karena adanya tegangan sisa, kekuatannya dapat dinyatakan sebagai :

$$M_n = M_r = (F_y - F_r)S$$

c. Penampang Ramping

$$M_n = M_r (\lambda_r / \lambda)^2$$

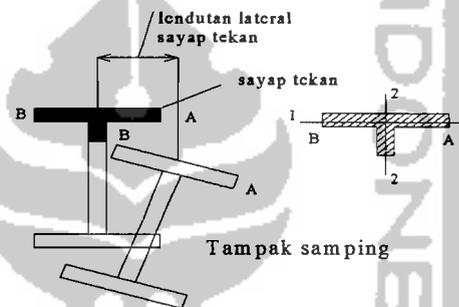
d. Penampang Semi Kompak

Kekuatan nominal penampang kompak sebagian diinterpolasi secara linear diantara M_p dan M_r dinyatakan sebagai :

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_r}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \leq M_p$$

Tekuk puntir lateral merupakan suatu keadaan batas yang mungkin dapat mengontrol kekuatan suatu balok. Untuk memahami tekuk puntir lateral dapat dilihat penjelasan berikut. Batang yang menerima beban merata akan melendut seperti Gambar (3.13). Seharusnya tegangan di A dan B sama besar tetapi karena batang-batang tidak begitu sempurna (misal tidak begitu lurus), maka tegangan

yang terjadi di A dan B berlainan. Dianggap sayap desak batang sebagai kolom dimana akibat lentur terhadap sumbu 1-1 akan menekuk terhadap sumbu lemah 1-1, tetapi badan balok memberikan dukungan untuk mencegah tekuk ini. Jika beban ditambah terus maka sayap desak balok akan menekuk terhadap sumbu kuat 2-2. Tekuk mendadak sayap terhadap sumbu kuatnya dalam arah lateral disebut "lateral buckling". Jadi tekuk puntir lateral atau Kip adalah gejala tertekannya sayap profil akibat beban luar sehingga menyebabkan sayap menekuk kearah samping (lateral) disertai puntir. (Padosbajayo, 1992).



Gambar 3.13 Balok lentur menerima beban

Kapasitas balok berdasarkan tekuk puntir lateral sebagaimana dikemukakan oleh Salmon adalah :

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 C_w I_y + E I_y GJ} \quad (3.22)$$

Untuk menyesuaikan gradien momen, Persamaan (3.22) di atas dapat dikalikan dengan suatu faktor C_b . Dengan demikian, secara umum menjadi Persamaan (3.23):

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 C_w I_y + E I_y GJ} \quad (3.23)$$

dimana :

C_w = konstanta warping torsi, mm^6

C_b = Efek gradien momen

$$C_b = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0.3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2.3 \quad (3.24)$$

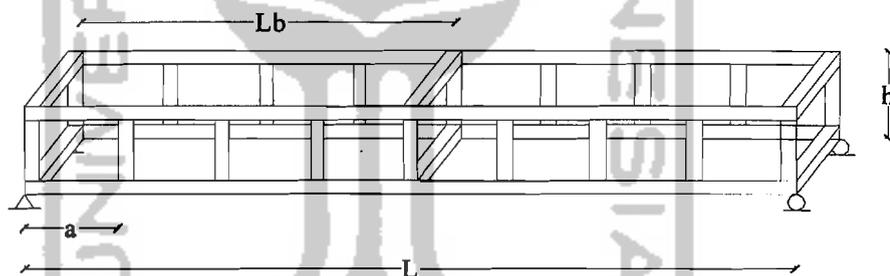
E = modulus elastisitas, MPa

G = modulus geser

J = konstanta torsi, mm^4

I_y = momen inersia terhadap sumbu y, mm^4

L_b = panjang tak berpenopang lateral, mm



Gambar 3.14 Balok *vierendeel* dengan dukungan lateral

Nilai M_{cr} dipengaruhi oleh C_w yaitu konstanta warping torsi yang dapat dinyatakan

dengan :

$$C_w = \frac{I_y h^2}{4} \quad (3.25)$$

dimana : $I_y =$ momen inersia terhadap sumbu y , mm^4

$h =$ jarak antara pusat flens, mm

Untuk balok *vierendeel* nilai I_y kecil karena tidak bergantung pada tinggi batang vertikal balok *vierendeel* tersebut dan dinyatakan dengan $I_y \text{ vierendeel} = 2I_y \text{ profil}$. Semakin besar nilai I_y yang tergantung pada luas penampang, maka C_w pada Persamaan (3.25) akan semakin besar. Selanjutnya semakin besar nilai C_w maka nilai M_{cr} akan semakin besar juga. Nilai h pada Persamaan (3.25) dianggap konstan dan diasumsikan dengan $h = 2h_{\text{profil}}$.

Konstanta torsi (J) juga mempengaruhi besarnya nilai M_{cr} yaitu jika penampang balok tersusun dari pelat-pelat yang tipis, maka penampang ini memiliki kekakuan torsi yang kecil karena harga J dipengaruhi oleh t^3 yang dinyatakan sebagai :

$$J = \frac{1}{3}bt^3 \quad (3.26)$$

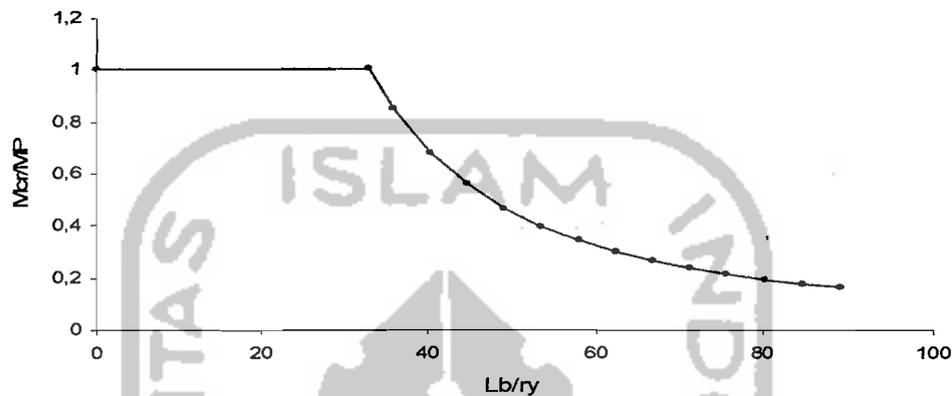
dimana b adalah dimensi panjang dan t adalah dimensi tebal. Untuk balok *vierendeel* yang komponen penyusunnya mempunyai dimensi panjang dan tebal berbeda, maka Persamaan (3.26) dapat ditulis sebagai :

$$J = \sum \frac{1}{3}b_i t_i^3 \quad (3.27)$$

dimana b_i dan t_i pada Persamaan (3.27) masing-masing adalah panjang dan tebal komponen penyusun balok *vierendeel* tersebut.

Besarnya momen kritis (M_{cr}) dari Persamaan (3.23) dipengaruhi oleh panjang tak berpenopang lateral (L_b) yaitu dengan semakin panjangnya (L_b), maka kapasitas lenturnya akan semakin kecil. Dengan mensubstitusikan nilai

$M_{cr}=M_p$ pada Persamaan (3.23) akan diperoleh jarak (L_b) dimana pada jarak tersebut terjadi momen plastis. Hal ini dapat dilihat pada grafik Gambar (3.15).



Gambar 3.15 Grafik hubungan M_{cr}/M_p dan L_b/r_y .

3.7 Persyaratan Topangan Lateral dalam Rentang Tak Elastis

Jika kekakuan EI_y dan GJ ditentukan dengan memperhitungkan daerah inelastis dan daerah elastis, Persamaan keseimbangan tekuk puntir lateral untuk momen murni dapat dipakai untuk daerah plastis. Karena jarak antara titik sokongan samping pada balok yang direncanakan untuk mengembangkan momen plastis relatif dekat, suku yang melibatkan kekakuan puntir GJ dapat diabaikan. Dengan demikian Persamaan (3.23) menjadi:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 E}{L_b^2} \sqrt{C_w I_y} \quad (3.28)$$

Karena M_{cr} harus mencapai M_p , M_{cr} pada Persamaan (3.28) diganti dengan

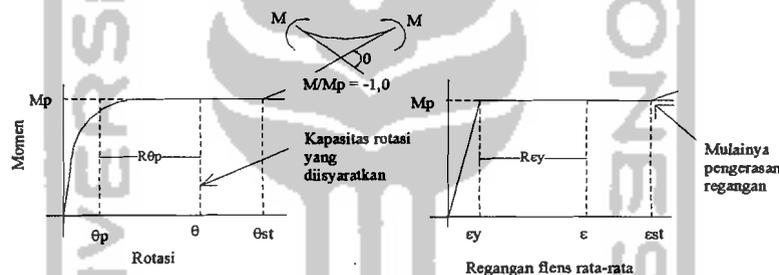
$M_p = Z_x F_y$. Juga $C_w = I_y h^2 / 4$ dan $I_y = A r_y^2$. Maka dihasilkan angka kelangsingan maksimum seperti pada Persamaan (3.29):

$$\frac{L}{r_y} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{L b^2} \left(\frac{h A}{Z} \right)} \quad (3.29)$$

yang akan berlaku untuk momen lentur seragam.

Pengujian pada *University of Texas* telah menetapkan batas dengan menggunakan provisi untuk gradien momen, sebagai Persamaan (3.30):

$$\frac{L_b}{r_y} = \frac{24800 + 15200 M_1 / M_p}{F_y, MPa} \quad (3.30)$$



Gambar 3.16 Persyaratan deformasi untuk pembentukan kekuatan plastis.

3.8 Sokongan Samping

Apabila stabilitas balok terhadap tekuk puntir lateral tidak terpenuhi, maka penyokong samping dapat digunakan untuk menahan perpindahan lateral dan torsi balok. Agar dapat berfungsi efektif, penyokong harus memiliki kekakuan dan kekuatan yang memadai. Dengan adanya penyokong samping maka panjang kritis balok menjadi lebih kecil sehingga daya dukungnya menjadi lebih besar.

Secara tradisional, dalam peraturan baja pada umumnya (AS 1250 – 1981, BS 449 – 1969) diisyaratkan bahwa penyokong samping dan sambungannya harus mampu memikul gaya tekan aksial yang besarnya :

$$F = 0,025.Fb / n \quad (3.31)$$

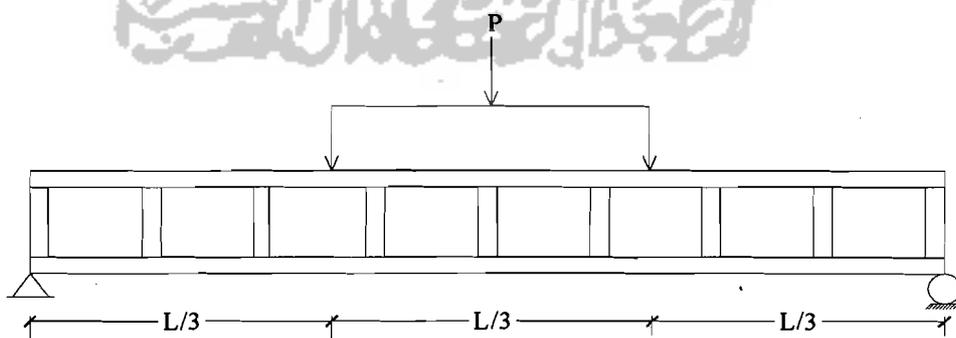
dimana Fb pada Persamaan (3.26) ialah gaya tekan maksimum pada sayap tekan kritis dan n adalah jumlah bentang balok.

3.9 Hubungan Beban-Lendutan

Lendutan terjadi apabila balok melentur akibat menahan beban. Untuk menghitung besarnya lendutan pada balok dapat menggunakan berbagai metode salah satunya adalah metode integrasi ganda. Metode integrasi ganda dapat dilihat pada Persamaan (3.32) berikut :

$$EIy = \iint M dx dx + c_1 x + c_2 \quad (3.32)$$

Sehingga untuk pembebanan seperti Gambar (3.17) dibawah ini besarnya lendutan dapat dihitung dengan Persamaan (3.33), Persamaan (3.34), dan Persamaan (3.35) adalah:



Gambar 3.17 Balok *viereendeel*

$$\text{Untuk lendutan pada } 1/3 \text{ bentang : } \Delta_1 = \frac{5PL^3}{162EI} \quad (3.33)$$

$$\text{Untuk lendutan pada } 1/2 \text{ bentang : } \Delta_2 = \frac{23PL^3}{648EI} \quad (3.34)$$

$$\text{Untuk lendutan pada } 2/3 \text{ bentang : } \Delta_3 = \frac{5PL^3}{162EI} \quad (3.35)$$

Dimana:

Δ = defleksi balok

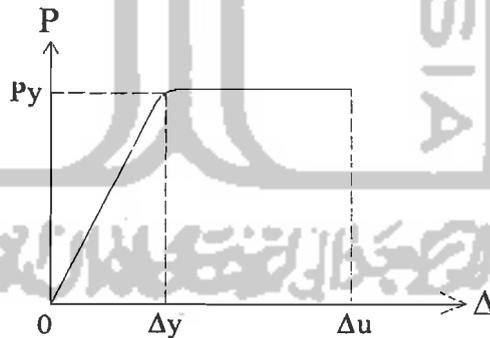
I = momen inersia penampang

P = beban

E = Modulus elastisitas

L = panjang bentang

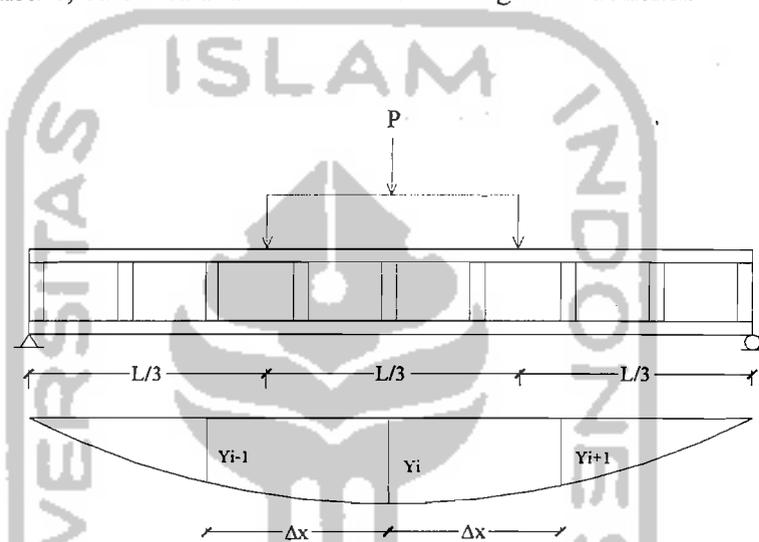
Hubungan beban lendutan pada balok yang menerima beban lentur dapat disederhanakan seperti pada Gambar (3.18)



Gambar 3.18 Hubungan beban-lendutan

3.10 Hubungan Momen-Kelengkungan

Balok adalah salah satu diantara elemen-elemen struktur yang paling banyak dijumpai pada setiap struktur. Momen lentur timbul pada balok sebagai akibat adanya beban pada balok. Apabila balok *viereendeel* dengan tumpuan sederhana seperti terlihat pada Gambar (3.17) mengalami dua beban transversal terpusat simetris, balok itu akan melentur atau mengalami defleksi.



Gambar 3.19 Defleksi pada balok *viereendeel*

Dari pengujian kuat lentur balok badan terbuka, didapatkan defleksi pada titik $i = Y_i$, titik Y_{i+1} dan titik Y_{i-1} seperti pada Gambar (3.19). Pendekatan kemiringan menggunakan metode *central difference*.

Perhatikan Gambar (3.18) dy/dx didekati dengan Persamaan (3.36)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.36)$$

turunan kedua Persamaan (3.36) adalah:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta_x) \frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1}) \frac{d}{dx}(2\Delta_x)}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.37)$$

karena $(2\Delta_x)$ adalah konstanta maka

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

sehingga Persamaan (3.37) menjadi

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta_x) \frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.38)$$

selanjutnya dari Persamaan (3.38) didapatkan

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.39)$$

Persamaan (3.39) disederhanakan menjadi Persamaan (3.40) :

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

Persamaan diferensial untuk balok elastis adalah

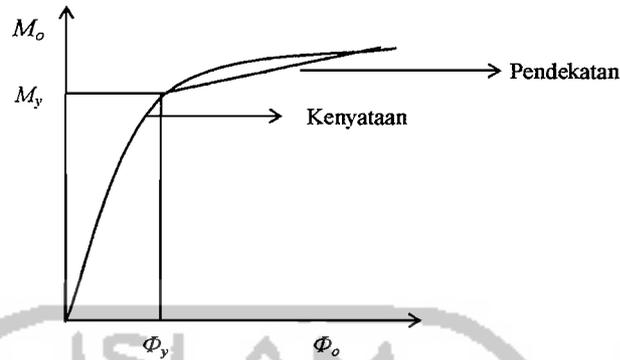
$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \phi = \frac{M}{EI} \quad (3.41)$$

$$M = EI \cdot \phi$$

maka Persamaan (3.41) dapat ditulis menjadi Persamaan (3.42):

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

Hubungan momen (M) dan kelengkungan (ϕ) ditunjukkan pada Gambar (3.20)

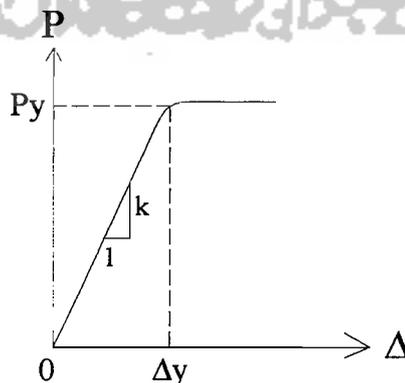


Gambar 3.20 Hubungan momen-kelengkungan.

3.11 Kekakuan

Menurut Gere dan Timoshenco (1985), kekakuan (k) adalah gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu satuan deformasi. Seperti pada Gambar (3.21), dapat dilihat bahwa beban P yang bekerja pada struktur dapat menyebabkan terjadinya deformasi Δ . Kemiringan dari lengkung yang dihasilkan disebut sebagai kekakuan dirumuskan dengan Persamaan (3.44)

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (3.44)$$

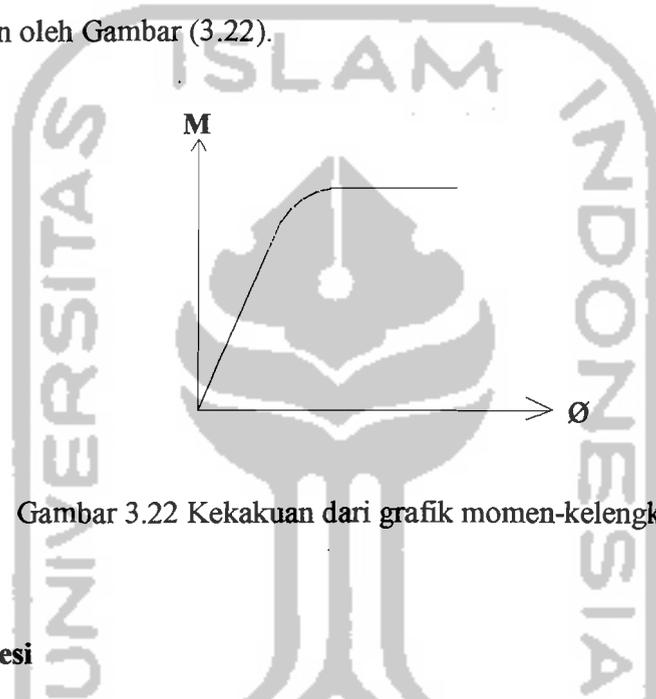


Gambar 3.21 Kekakuan dari grafik beban-deformasi

Sedangkan kekakuan lentur EI didefinisikan sebagai momen per satuan unit kelengkungan yang dirumuskan sebagai Persamaan (3.45):

$$EI = \frac{M}{\Phi} \quad (3.45)$$

Kekakuan lentur ini didapat dari grafik hubungan momen-kelengkungan yang ditunjukkan oleh Gambar (3.22).



Gambar 3.22 Kekakuan dari grafik momen-kelengkungan

3.12 Regresi

Pada penelitian sering didapat data hasil pengujian diberikan dalam nilai diskret atau Tabel. Ada dua hal yang diharapkan dari data diskret tersebut, yaitu :

1. Mendapatkan bentuk kurva yang dapat mewakili data diskret tersebut.
2. Mengestimasi nilai data pada titik-titik di antara nilai-nilai yang diketahui.

Kedua aplikasi tersebut dikenal sebagai *curve fitting*. Ada dua metode pendekatan di dalam *curve fitting* yang didasarkan pada jumlah kesalahan yang terjadi pada data, yaitu :

1. Regresi kuadrat terkecil.

Regresi kuadrat terkecil dilakukan apabila data menunjukkan adanya kesalahan cukup besar. Untuk itu dibuat kurva tunggal yang mempresentasikan *trend* secara umum data yang ada. Regresi kuadrat terkecil untuk kurva dengan garis lurus menggunakan metode regresi linier. Sedangkan untuk kurva lengkung menggunakan metode fungsi eksponensial, Persamaan berpangkat (transformasi *log* dan transformasi *ln*), dan regresi polinomial.

2. Interpolasi

Apabila data diketahui sangat benar maka pendekatan yang dilakukan adalah membuat kurva atau sejumlah kurva yang melalui setiap titik

Pada penelitian ini digunakan bentuk paling sederhana dari regresi kuadrat terkecil yaitu kurva yang mewakili titik-titik percobaan berupa garis lurus, yang disebut regresi linier.

3.13 Alat Sambung Las

Proses pengelasan adalah proses penyambungan bahan yang menghasilkan peleburan bahan dengan memanaskannya hingga suhu yang tepat, dengan atau tanpa pemberian tekanan dan dengan atau tanpa pemakaian bahan pengisi dengan pembangkit panas berupa : listrik, kimiawi, optis, mekanis dan semikonduktor. Proses pengelasan baja struktural biasanya menggunakan busur listrik (nyala).

Pada penelitian ini digunakan berbagai ketentuan mengenai pengelasan yang diuraikan sebagai berikut :

1. Pengelasan busur nyala logam terlindung.

Pengelasan busur nyala logam terlindung, SMAW (*shielded metal arc welding*) atau proses elektroda tongkat merupakan jenis pengelasan yang sederhana. Pemanasan dilakukan dengan busur listrik nyala antara elektroda yang dilapisi dan bahan yang akan disambung hingga elektroda yang dilapisi habis karena logam pada elektroda dipindahkan ke bahan dasar selama pengelasan dan 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 senyawa flour, karbonat, oksida, paduan logam dan selulosa, yang berfungsi sebagai :

- a. menghasilkan gas pelindung untuk mencegah masuknya udara dan membuat busur stabil
- b. memberikan bahan lain, seperti unsure pengurai oksida, untuk memperhalus struktur butiran pada logam las,
- c. menghasilkan lapisan terak dan memadatkan las untuk melindungi dari oksigen dan nitrogen dalam udara serta memperlambat pendinginan.

Bahan elektroda ditentukan oleh berbagai spesifikasi American Welding Society dengan identifikasi seperti E60XX dan E70XX yang masing-masing menunjukkan kekuatan tariknya 60 dan 70 ksi. Huruf X menyatakan faktor-faktor seperti posisi pengelasan sumbur listrik yang disarankan jenis lapisan dan jenis karakteristik busur nyala.

Pada penelitian ini dipakai elektroda RD 460 dengan diameter 2.6 mm dan panjang 350 mm. RD 460 adalah jenis kawat las high titania oxide yang mempunyai percikan las yang kecil, terak mudah terlepas dan memberikan hasil finishing yang halus. Spesifikasinya adalah AWS A 5.1 E6013. Untuk pemanasan elektroda ini menggunakan arus listrik AC-DC 70-110 A

2. Jenis las dan sambungan las

Pada penelitian ini dipergunakan jenis las sudut (*fillet weld*) karena ekonomis secara keseluruhan, mudah dibuat. Jenis las ini merupakan jenis las yang paling banyak dipakai dibandingkan jenis las dasar yang lain.

Jenis sambungan yang dipakai umum dan mempunyai keuntungan mudah disesuaikan, mudah disambung dan mudah digunakan untuk menyambung.

Kekuatan Nominal Las Sudut

Kekuatan desain per satuan panjang las sudut didasarkan resensi geser melalui leher las sebagai Persamaan (3.46) berikut,

$$\phi R_{nw} = 0.75 t_e (0.6 F_{EXX}) \quad \text{las sudut} \quad (3.46)$$

dan tidak boleh kurang dari kekuatan patahan (rupture) geser dan logam dasarnya

Persamaan (3.47) :

$$\phi R_{nw} = 0.75 t_e (0.6 F_U) \quad \text{logam dasar} \quad (3.47)$$

dimana t_e adalah dimensi leher efektif yang ditunjukkan pada Gambar (3.23a) dan (3.23.b), untuk ukuran leher yang sama maka t_e dapat dihitung dengan Persamaan (3.48) :

$$t_e = 0.707a \quad (3.48)$$

untuk ukuran leher yang tidak sama maka t_e dapat dihitung dengan Persamaan (3.49):

$$t_e = \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3.49)$$

dimana: t_e = dimensi leher efektif

F_{EXX} = kuat tarik material elektroda

t = tebal material dasar di sepanjang las

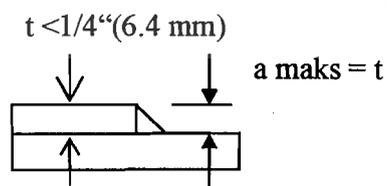
F_U = kuat tarik maksimum logam dasar

ϕ = 0.75 (faktor resistensi las sudut)

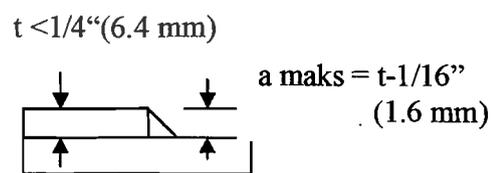
AISC menyatakan daya tahan las sudut yang diijinkan E60XX dalam desain untuk las sudut seperti pada Tabel (3.1) berikut ini.

Tabel 3.1 Daya Tahan Las Sudut yang Diiijinkan (kip/inci)

Ukuran Las (inci)	E60XX SMAW (ksi)	E60 SAW (ksi)
1/16	1.59	2.25
1/8	2.38	3.37
3/16	3.18	4.50
1/4	3.98	5.62
5/16	4.77	6.75



Gambar 3.23.a Ukuran las maksimum untuk $t < 1/4'' (6.4 \text{ mm})$



Gambar 3.23.b Ukuran las maksimum untuk $t > 1/4'' (6.4 \text{ mm})$

3.14 Hipotesis

Dengan memperhatikan latar belakang, tujuan penelitian, tinjauan pustaka, dan landasan teori bahwa apabila suatu struktur balok badan terbuka dalam hal ini balok *vierendeel* diberi beban sentris (P) maka akan terjadi lendutan. Besarnya lendutan dipengaruhi oleh beban (P), panjang bentang (L), modulus elastisitas (E), dan momen inersia penampang (I).

Pembebanan pada balok *vierendeel* juga dapat menyebabkan terjadinya tekuk, baik itu tekuk lokal maupun tekuk lateral disertai puntir. Dari grafik non dimensional hubungan (M_{cr}/M_p) dan (L_b/r_y) dapat diambil kesimpulan bahwa semakin panjang jarak tak berpenopang lateral (L_b), maka kapasitas lentur balok *vierendeel* akan semakin berkurang dan sebaliknya.

