

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Analisa Momen Rencana**

Untuk menentukan dimensi penampang suatu struktur lentur ada beberapa hal yang harus diperhatikan, antara lain penentuan besar momen rencana. Pada struktur ini momen rencana dianalisa dengan dua tahap yaitu saat pelaksanaan (struktur dianggap struktur kantilever) dan saat service (struktur dianggap struktur menerus). Dari kedua tahap ini akan diambil momen yang terbesar sebagai momen rencana. Untuk perhitungan awal dilakukan dengan menganggap bahwa penampang adalah berbentuk prismatis dua dimensi, dengan memberikan beban-beban luar dan asumsi beban sendiri serta jenis perletakan gelagar maka perhitungan momen dapat dilakukan.

#### **3.2 Pembebanan menurut AASTHO LRFD *Bridge Specification***

Beban *gravity* adalah beban yang disebabkan oleh berat objek pada jembatan. Beban-beban seperti beban tetap dan beban berjalan, dan keduanya bekerja kearah bawah terhadap pusat bumi.

##### **3.2.1 Beban tetap (*permanent load*)**

Beban-beban yang termasuk beban tetap menurut AASTHO yaitu:

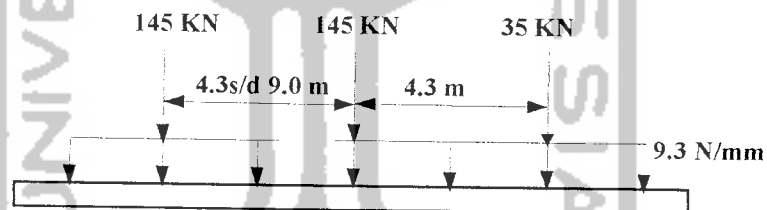
1. Beban mati dari komponen struktur dan perlengkapan nonstruktur (DC)
2. Beban mati dari permukaan aus dan kegunaannya (DW)

3. Beban mati dari timbunan tanah (EV)
4. Beban tekanan tanah (EH)
5. Beban tambahan tanah (ES)
6. Pengereman (DD)

### 3.2.2 Beban tidak tetap (*Transient load*)

#### a. *Truck* rencana

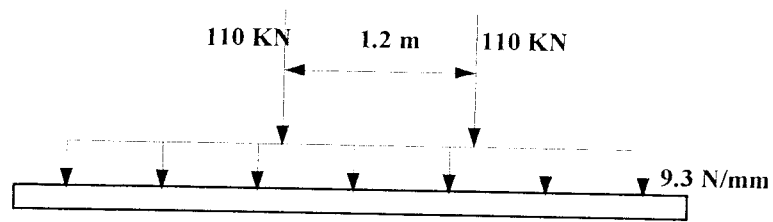
Merupakan konfigurasi pertama dari tiga jenis beban hidup seperti diilustrasikan pada Gambar 3.1, beban *truck* rencana adalah model beban yang menyerupai jenis *truck* semi *trailer*. Sumbu bagian depan mempunyai berat 35 kN, yang terletak 4,3 m dibelakang sumbu kemudi beratnya 145 kN dan sumbu trailer bagian belakang beratnya 145 kN yang diletakkan dengan susunan jarak yang berubah-ubah antara 4,3 m sampai dengan 9 m



Gambar 3.1 Beban rencana AASTHO untuk *truck*

#### b. *Tandem* rencana

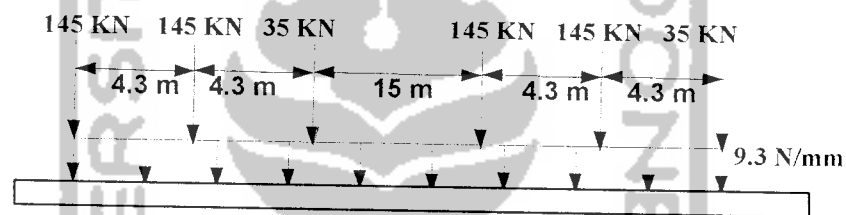
Konfigurasi kedua adalah beban *tandem* rencana dan diilustrasikan pada Gambar 3.2, terdiri dari dua sumbu dengan berat 110 kN masing-masing jaraknya 1,2 m.



Gambar 3.2 Beban rencana AASTHO untuk tandem

### c. Beban jalur rencana

Merupakan konfigurasi beban yang ketiga terdiri dari beban distribusi merata sebesar 9.3 N/mm dan diasumsikan menempati bagian 3 m secara melintang (Gambar 3.3)



Gambar 3.3 Beban rencana AASTHO untuk beban jalur

### 3.3 Analisa dan Persyaratan Gelagar

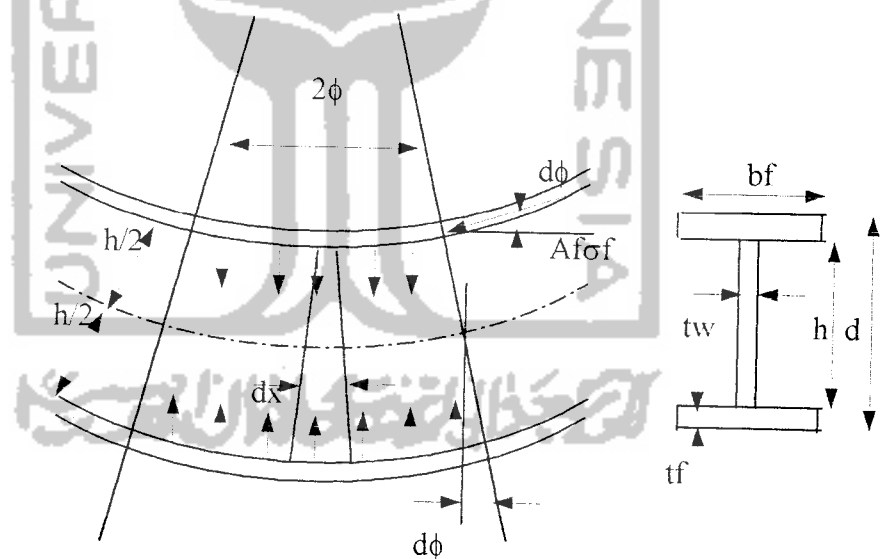
Berdasarkan hasil perhitungan momen rencana yang telah dihitung, maka penampang gelagar dapat direncanakan berdasarkan peraturan dan persyaratan yang digunakan. Penampang lintang gelagar dipilih agar secara layak dapat melakukan fungsinya. Persyaratan fungsi gelagar dapat diringkas sebagai berikut:

1. Kekuatan menahan momen lentur (modulus penampang  $S_x$  yang cukup).
2. Kekakuan vertikal untuk memenuhi setiap batasan *defleksi* (momen inersia  $I_x$  yang cukup).

3. Kekakuan lateral untuk mencegah tekuk torsi lokal dari *flens* tekan (penopang lateral cukup atau rasio  $L_b/r_T$  rendah).
4. Kekuatan menahan geser (luas pelat badan cukup).
5. Kekakuan untuk meningkatkan kekuatan pasca tekuk dan tekuk dari pelat badan (berkaitan dengan rasio  $h/t$  dan  $a/h$ ).

### 3.3.1 Analisa dan Persyaratan Pelat Badan

Kelengkungan pelat badan yang mengalami lenturan akan menyebabkan tekanan-tekanan radial antara pelat badan dan pelat sayap. Jika pelat badan terlalu tipis seperti yang diukur oleh perbandingan  $h/t$ , maka pelat badan tersebut akan menekuk. Selanjutnya untuk menganalisa perilaku badan dan sayap akibat beban lentur, diperlihatkan dalam gambar sebagai berikut:



**Gambar 3.4** Tegangan desak yang terjadi akibat lenturan pada badan

Gambar 3.4 melukiskan pembebanan pelat badan gelagar yang dianggap pada sebuah pita (jalur) sebesar  $dx$  ( $h$ ). Maka tegangan tekuk elastis (Euler) untuk suatu pelat didapatkan sebesar (Salmon & Johnson, 1996):

$$F_{cr} = \frac{k_c \pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(h/t_w)^2} \quad (3.1)$$

gaya yang bekerja pada badan dari segmen yang ditinjau adalah:

$$A_f \sigma_f \sin \phi \cong A_f \sigma_f d\phi \quad (3.1a)$$

karena sudutnya sangat kecil maka setiap  $f_f$  harus mampu untuk mengatasi setiap tegangan residu  $F_r$  yang muncul pada badan, jadi regangan yang terjadi

$$\varepsilon_f = \varepsilon_r + \varepsilon_y = \frac{F_r + F_y}{E} \quad (3.1b)$$

dengan sudut  $\phi$  adalah

$$d\phi = \varepsilon_f \frac{dx}{h/2} = \frac{2(F_r + F_y)}{E} \frac{dx}{h} \quad (3.1c)$$

pada saat badan mengalami luluh maka gaya yang terjadi

$$A_f \sigma_f \tan \phi = A_f \sigma_f \phi \quad (3.1d)$$

untuk sudut yang kecil dan  $\phi$  dalam radian maka

$$f_c = \frac{\sigma_f A_f d\phi}{t_w dx} = \frac{2\sigma_f A_f \varepsilon_f}{t_w h} \quad (3.1e)$$

nilai ini harus tidak lebih besar dari pada gaya tekukan badan kritis sebesar

$$F_{cr} = \frac{k_c \pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left( \frac{t}{h} \right)^2 \quad (3.1f)$$

dengan mempersamakan persamaan (3.1e) dan (3.1f) akan didapat nilai

$$\frac{h}{t} = \left[ \frac{k_c \pi^2 E^2}{24(1 - \mu^2)} \frac{A_w}{A_f} \frac{1}{F_y (F_y + F_r)} \right]^{1/2} \quad (3.1g)$$

maka dengan mensubstitusikan nilai-nilai  $F_r = 114$  MPa, nilai ini sekarang digunakan untuk semua nilai  $F_y$  baja. Dengan mengasumsikan bahwa perbandingan  $A_w/A_f \cong 1/2$ , nilai banding *poisson* untuk baja  $\mu = 0,3$ ,  $E = 200000$  MPa, dan  $K_c = 1$  maka didapat nilai pembatas  $h/t$  dengan  $a/h > 1,5$  (AISC-LRFD) sebagai berikut:

$$\frac{h}{tw} \leq \frac{96500}{\sqrt{F_y (F_y + 114)}, MPa} \quad (3.2)$$

AISC memperbolehkan perbandingan  $h/tw$  yang agak lebih besar jika digunakan pengaku transversal pada perbandingan jarak antara  $a/h \leq 1,5$  sebesar

$$\frac{h}{tw} \leq \frac{5250}{\sqrt{F_y}, MPa} \quad (3.3)$$

Badan gelagar pelat biasanya memiliki rasio sebesar  $h/tw$ , tekuk mungkin terjadi akibat lentur pada bidang badan disebabkan karena rasio perbandingan  $h/tw$  yang besar. Dengan memasukkan nilai  $k$  yang sama maka akan dihasilkan nilai  $F_{cr}$  yang rendah sehingga tekuk mungkin terjadi akibat lentur pada bidang badan. Pada struktur nonprismatis akan menghasilkan nilai  $F_{cr}$  yang berbeda untuk tiap segmen. Dengan demikian kekuatan tekuk gelagar harus diperhitungkan sehingga kekuatan gelagar akan meningkat. Tekuk lentur semacam ini tidak terjadi bila :

$$\frac{h}{tw} \leq \frac{2550}{\sqrt{F_{cr}}, MPa} \quad (3.4)$$

Variasi dalam penampang lintang gelagar akan ditentukan sebagai fungsi dari tinggi pelat badan guna memberikan tinggi atau kedalaman penampang yang akan memberikan luas minimum. Luas bruto rata-rata  $A_g$  dari gelagar untuk seluruh bentangan dapat diekspresikan sebagai

$$A_g = 2C_1 A_f + C_2 h t \quad (3.5)$$

Dimana  $C_1$  = faktor untuk memperhitungkan pengurangan ukuran *flens* pada daerah yang lebih rendah dari momen maksimum.

$C_2$  = faktor untuk memperhitungkan pengurangan tebal pelat badan pada daerah pengurangan gaya geser.

Dalam menentukan tinggi gelagar optimum ada beberapa kasus antara lain:

- a) Kasus 1. tidak ada pembatasan tinggi, diinginkan  $h/t$  yang besar.

Asumsikan  $\beta_w = \text{konstan} = h/t$ ;  $t = h/\beta_w$

$$h = \sqrt[3]{\frac{3MC_1\beta_w}{f(3C_2 - C_1)}} \quad (3.6)$$

dan jika kita mengabaikan reduksi penampang didaerah yang tegangannya rendah,  $C_1 = C_2 = 1$  persamaan (3.6) menjadi

$$h = \sqrt[3]{\frac{3M\beta_w}{2f}} \quad (3.7)$$

dengan :  $M = M_u / \phi$  = momen beban layanan terfaktor dibagi dengan  $\phi = 0,9$  untuk LRFD.

$f$  = tegangan rata – rata pada *flens* dengan menggunakan  $F_{cr}$  sebagai nilai seret terluar bilamana kekuatan momen nominal tercapai.

b) Kasus 2. Tebal pelat badan minimum;  $t = \text{konstan}$ .

$$h = \sqrt{\frac{3M}{ft}} \quad (3.8)$$

c) Kasus 3. Geser besar yang mengendalikan luas pelat badan ;  $A_w = \text{konstan}$   
 $= \text{luas pelat badan, ht}$ .

$$A_g = 2C_1 \left( \frac{M}{fh} - \frac{A_w}{6} \right) + C_2 A_w \quad (3.9)$$

$C_1$  dapat bervariasi dari 0,7-0,9 bila digunakan dengan momen positif maksimum: 0,85 – 0,9 adalah rentang yang umum. Nilai  $C_2$  sebesar 1,05 bila digunakan dengan momen positif maksimum atau 0,95 bilamana digunakan dengan momen negatif maksimum. Kompleksnya  $C_1$  dan  $C_2$  untuk struktur menerus, maka cukup baik mengambil nilai  $C_1$  dan  $C_2 = 1$ .

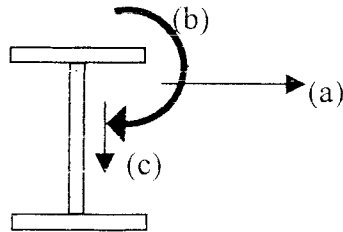
Dalam perencanaan ini menggunakan kasus satu untuk penentuan tinggi gelagar.

### 3.3.2 Analisa dan persyaratan sayap gelagar

Kekuatan geser dan lentur gelagar pelat pada umumnya berkaitan dengan badan balok yang ramping dapat menyebabkan tekuk *flens* tekan dalam arah vertikal karena kurangnya kekakuan badan balok untuk mencegah terjadinya tekuk sedemikian rupa. Batas maksimum pada kerampingan badan balok  $h/t_w$  akan didasarkan pada kekakuan yang dibutuhkan dalam bidang balok untuk mencegah terjadinya *flens* tekan mengalami tekuk secara vertikal. Perhatikan bahwa  $h_c$  tinggi bersih badan balok dalam suatu penampang tempa yang tak berpenumpu, merupakan kedalaman  $h$  pelat badan balok dalam penampang



berprofil I-las sehingga dibutuhkan suatu kekakuan lentur dari badan balok disepanjang sambungan *flens* ke badan untuk mencegah tekuk torsi pada *flens* (3.5b).



Gambar 3.5 a) tekuk lateral b) tekuk puntir c) tekuk vertikal

*Flens* merupakan suatu batang tekan yang independen dari bagian gelagar lainnya. Bila gelagar melengkung yang tampak pada gambar (3.4) akan memperbesar komponen-komponen gaya *flens* yang menyebabkan tekan pada pinggir-pinggir badan balok yang berdekatan dengan *flens* tersebut. Bila badan balok itu tetap stabil ketika terkena komponen-komponen gaya *flens* tekan tersebut, maka *flens* itu tidak dapat mengalami tekuk secara vertikal.

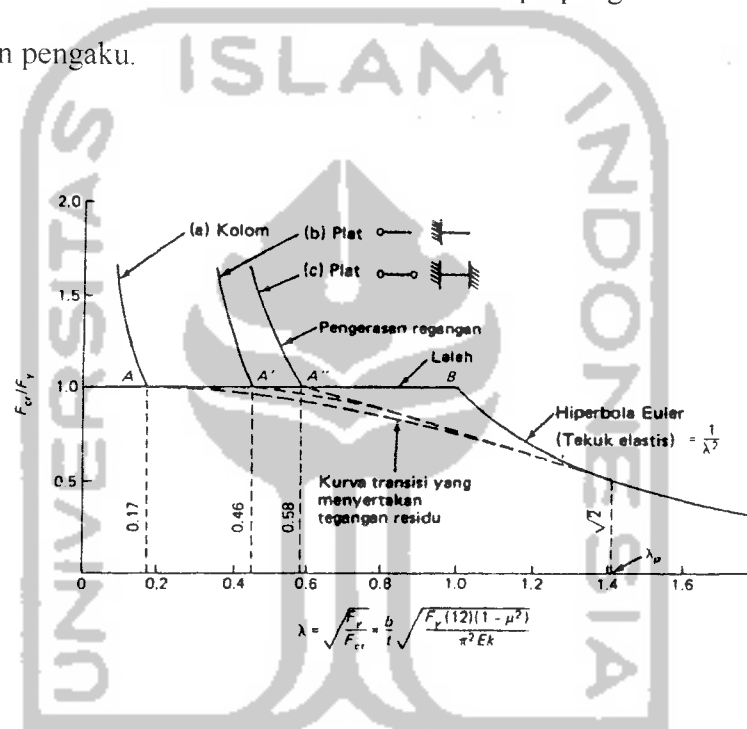
Tekuk setempat pada elemen plat dapat mengakibatkan tegangan menjadi tidak merata dan mengurangi kekuatan keseluruhan oleh karena itu AISC menetapkan tegangan tekuk kritis  $F_{cr}$  tidak boleh lebih kecil dari tegangan leleh baja  $F_y$  pada elemen plat. Dengan kata lain tekuk dicegah sebelum tegangan leleh sebesar  $F_y$  tercapai. Batasan untuk mencegah tekuk dengan persamaan Euler sebagai berikut

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \geq F_y \quad (3.10)$$

Jika  $F_{cr}/F_y$  didefinisikan sebagai  $1/\lambda_c^2$ , untuk plat:

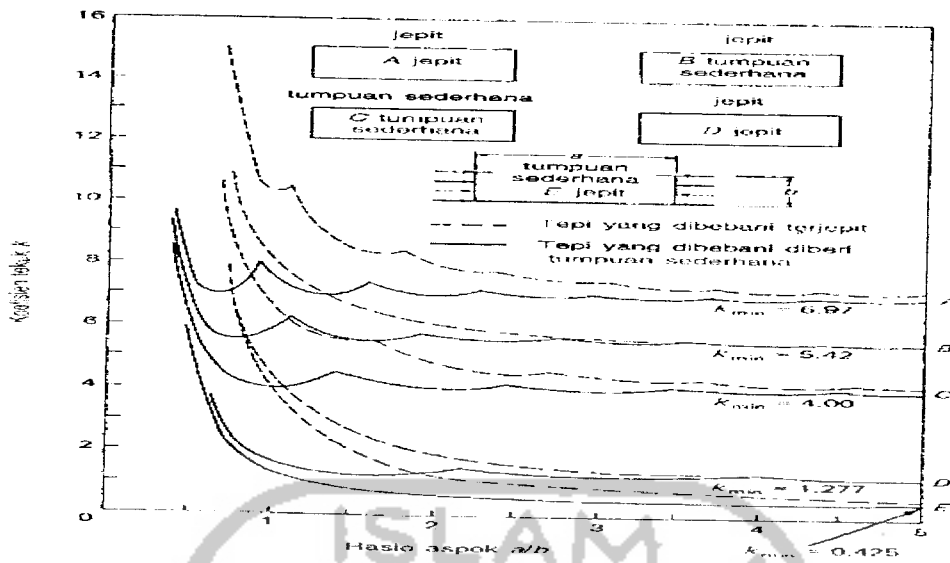
$$\lambda_c = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y(12)(1-\mu^2)}{\pi^2 E k}} \quad (3.11)$$

dengan  $\lambda_c$  adalah parameter kerampingan,  $E$  adalah modulus elastisitas,  $\mu$  adalah angka poisson untuk baja dan rasio lebar dengan ketebalan pada plat ( $b/t$ ). Nilai  $\lambda_c$  harus dibatasi agar tidak melampaui  $\lambda_0$  bila dikehendaki tercapainya pengerasan dengan tanpa adanya tekuk plat. Dari Gambar (3.6)  $\lambda_c$  hendaknya tidak melampaui sekitar 0,46 untuk elemen tekan tanpa pengaku dan 0,58 untuk elemen dengan pengaku.



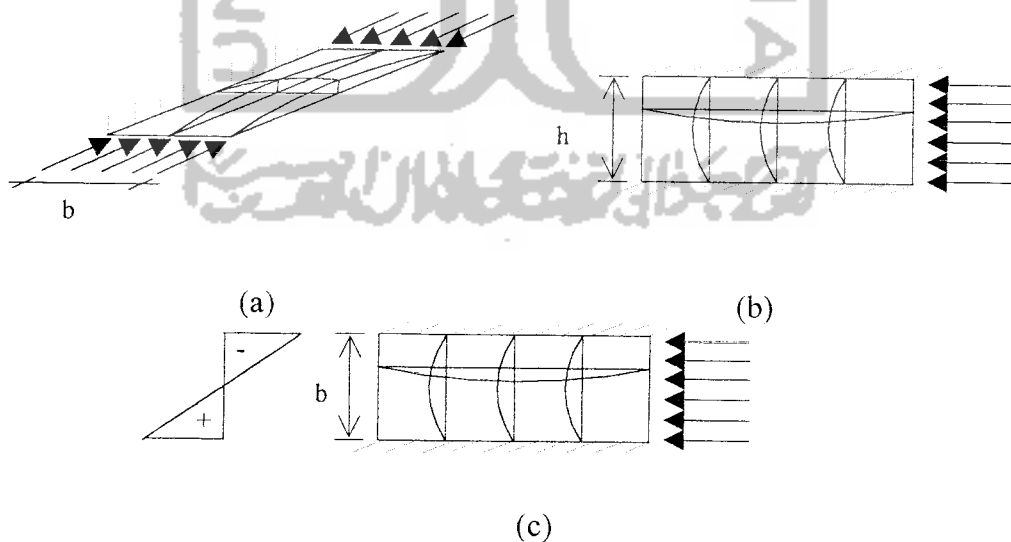
**Gambar 3.6** Perbandingan tekuk plat dengan tekuk kolom

Dan untuk nilai  $k$  adalah konstanta yang tergantung pada jenis tegangan dan kondisi tumpuan tepi. Nilai  $k$  dapat dilihat pada Gambar(3.7) yang memperlihatkan variasi  $k$  terhadap segi  $a/b$  untuk kondisi tepi ideal yang umum yaitu jepit, tumpuan sederhana dan bebas.



Gambar 3.7 Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada plat segi empat datar

Untuk kondisi tumpuan tepi jepit-bebas seperti Gambar (3.8a) nilai  $k = 0,425$  sedangkan untuk kondisi tumpuan tepi jepit-jepit seperti Gambar (3.8b) nilai  $k = 4$ . Untuk plat yang tertekuk dengan kondisi tumpuan jepit-jepit yang memikul tegangan lentur seperti ditunjukkan pada Gambar (3.8c), mempunyai nilai  $k$  minimum adalah 23,9



Gambar 3.8 (a) Tekuk pada sayap (jepit-bebas)

(b) Tekuk horizontal pada badan (jepit-jepit)

(c) Distribusi tegangan lentur pada kondisi tumpuan jepit-jepit

Dengan  $\mu = 0,3$  untuk baja, dan  $E = 2.10^5$  Mpa

$$\frac{b}{t} \leq 425 \sqrt{\frac{k}{F_y}} \quad (Mpa) \quad (3.12)$$

Untuk elemen yang tidak diperkuat, bila  $k = 0,425$  (harga terkecilnya), menghasilkan

$$\frac{b}{t} \leq \frac{127}{\sqrt{F_y}} \quad (Mpa) \quad (3.13)$$

karena tegangan tidak berpengaruh pada daerah platis dan ketidaksempurnaan bahan kecil pengaruhnya, maka batasan persamaan diatas terlalu berat.

Untuk elemen yang diperkuat, bila  $k = 4$ , yaitu harga minimum dengan menganggap pengekangan rotasi tepi plat sebagai kondisi sendi, menetapkan batas untuk elemen tekan yang diperkuat sebagai

$$\frac{b}{t} \leq \frac{500}{\sqrt{F_y}} \quad (Mpa) \quad (3.14)$$

Untuk  $E = 200.000$  MPa dan angka poisson  $\mu = 0,3$ , maka batasan untuk elemen tekan yang memikul tegangan lentur dan kondisi jepit-jepit seperti pada Gambar (3.8c) adalah

$$\frac{b}{t} \leq 131.5 \sqrt{\frac{F_y}{250}} \quad (Mpa) \quad (3.15)$$

Dari persamaan-persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar rasio perbandingan lebar dan tebal ( $b/t$ ) maka tegangan kritis  $F_{cr}$  semakin kecil.

Maka untuk meningkatkan  $F_{cr}$  dengan cara mengubah koefisien tekuk  $k$  yang bergantung pada kondisi tumpuan tepi plat. Untuk kondisi tumpuan jepit-bebas dengan nilai minimum 0,425 apabila dirubah menjadi kondisi tumpuan jepit-jepit dengan  $k$  minimum 4 akan menghasilkan kenaikan tegangan kritis sebesar lebih kurang dapat meningkatkan nilai tegangan kritis  $F_{cr}$  hampir 10 kali lipat.

Untuk penyederhanaan dalam desain adalah lazim untuk menggantikan dengan sistem yang sesungguhnya dari gambar (3.9a) dengan suatu sistem pengganti, gambar (3.9b), yang memungkinkan momen digantikan oleh suatu kopel dengan gaya kopel yang bekerja pada sentroid *flens*. Gaya-gaya ini kemudian dapat diperlakukan sebagai suatu beban aksial. Jika jarak antara gaya-gaya *flens* adalah kira-kira  $(h + d)/2$ , maka gaya dari kopel tersebut adalah

$$C = T = \frac{M}{(h + d)/2} \quad (3.16)$$

luas efektif dimana gaya ini bekerja adalah sama dengan luas pelat *flens*  $A_f$  ditambah luas tambahan  $A'_f$  yang mewakili keefektifan pelat badan dalam menahan momen.

Tegangan rata-rata pada luas efektif total adalah

$$f_{rata-rata} = \frac{gaya}{luas} = \frac{M}{(h + d)/2} \left( \frac{1}{A_f + A'_f} \right) \quad (3.17)$$

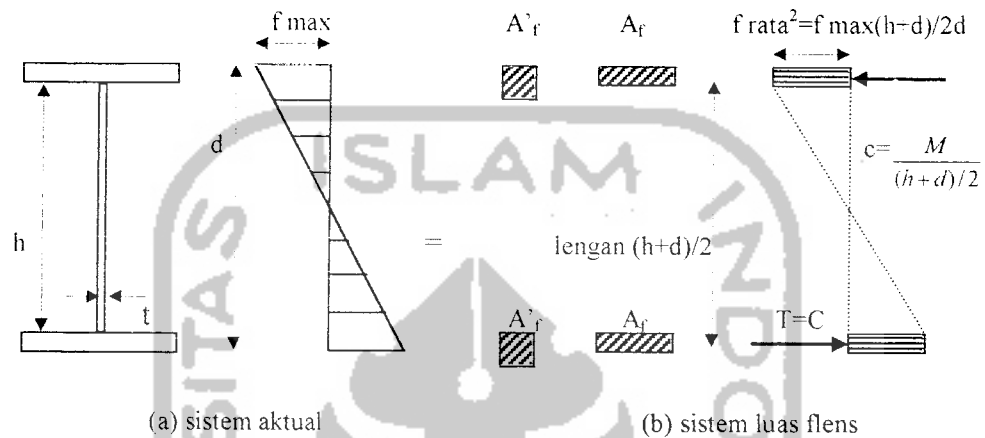
luas  $A'_f$  harus diambil sedemikian rupa sehingga momen lentur yang ditahan oleh pelat badan adalah sama baik untuk sistem sesungguhnya maupun sistem penggantinya:

$$M_{sistem\ sesungguhnya} = f_{maks} \left( \frac{h}{d} \right) \frac{th^2}{6} \quad (3.18)$$

$$M_{\text{sistem pengganti}} = f_{\text{maks}} \left( \frac{h+dd}{2d} \right) A'_f \left( \frac{h+d}{2} \right) \quad (3.19)$$

dengan menyamakan persamaan (3.18) dan (3.19) memberikan

$$A'_f = \frac{h}{d} \left( \frac{th^2}{6} \right) \left( \frac{2d}{h+d} \right) \left( \frac{2}{h+d} \right) = \frac{th}{6} \left( \frac{2h}{h+d} \right)^2 \quad (3.20)$$



**Gambar 3.9** Penurunan rumus luas flens

yang jika  $A_w = th$ , dan suku pangkat dua diabaikan menjadi

$$A'_f = \frac{A_w}{6} \quad (3.21)$$

dengan menyelesaikan persamaan (3.17) untuk  $A_f$  memberikan

$$A_f = \frac{M}{[(h+d)/2] f_{\text{rata-rata}}} - A'_f \quad (3.22)$$

dengan persamaan (3.20) dan  $f_{\text{rata-rata}} = f_{\text{maks}} (h+d)/2d$ , memberikan

$$A_f = \left[ \frac{M}{f_{\text{maks}} h} \left( \frac{d}{h} \right) - \frac{A_w}{6} \right] \left( \frac{2h}{h+d} \right)^2 \quad (3.23)$$

dengan menganggap suku kuadrat sama dengan satu yang mengestimasi agak berlebihan nilai  $A_f$  sementara dengan  $d/h=1$  mengestimasi lebih rendah nilai tersebut. Untuk desain pendahuluan penyederhanaan ini adalah untuk

memberikan ekspresi sederhana untuk luas pelat *flens* yang diperlukan (Salmon & Johnson, 1996) adalah:

$$A_f = \frac{M}{fh} - \frac{A_w}{6} \quad (3.24)$$

dengan  $f$  adalah tegangan rata-rata di *flens*. Setelah luas sayap ditentukan maka dapat ditentukan lebar sayap dan tebal sayap. Agar tidak terjadi tekuk setempat (*local buckling*) menurut AISC rasio lebar terhadap tebal sebagai berikut:

$$\frac{b}{2t_f} \leq \frac{171}{\sqrt{F_y, MPa}} \quad (3.25)$$

### 3.3.3 Kekuatan lentur nominal

Kuat lentur nominal  $M_n$  gelagar pelat badan yang ramping dikontrol oleh keadaan batas pelelehan pada *flens* tarik atau keadaan batas tekuk pada *flens* tekan sebagai berikut (Salmon & Johnson, 1996):

untuk pelelehan *flens* tarik :

$$M_n = F_{yt} S_{xt} R_{pg} \quad (3.26)$$

untuk tekuk *flens* tekan :

$$M_n = F_{cr} S_{xc} R_{pg} R_e \quad (3.27)$$

dimana untuk *nonhybrid*  $R_e = 1$ , *hybrid*  $R_e = 1 - 0,1 (1,3 + \beta) (0,81 - \alpha)$

dan (AISC-LRFD) menentukan faktor reduksi sebagai berikut :

$$R_{PG} = 1 - 0,0005 \alpha_r \left( \frac{h_c}{t_w} - \frac{2550}{\sqrt{F_{cr}, MPa}} \right) \leq 1,0 \quad (3.28)$$

dengan  $\alpha_r = A_w/A_f$ , dimana  $A_f$  adalah luas *flens* tekan

$H_c$  = dua kali jarak dari sumbu netral kemuka dalam *flens* tekan minus *filet* atau radius sudut

$\beta = A_w/A_f$ , rasio luas penampang lintang penampang terhadap luas penampang salah satu *flens*

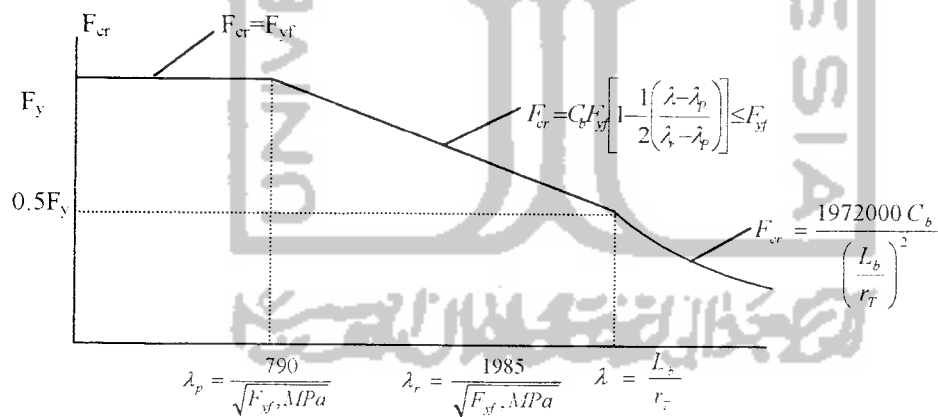
$\alpha = F_{yw}/F_{yf}$ , rasio tegangan leleh baja badan terhadap tegangan leleh baja *flens*

$R_e$  = faktor reduksi untuk memperhitungkan leleh pada pelat badan

$R_{PG}$  = faktor reduksi untuk memperhitungkan tekuk lentur badan

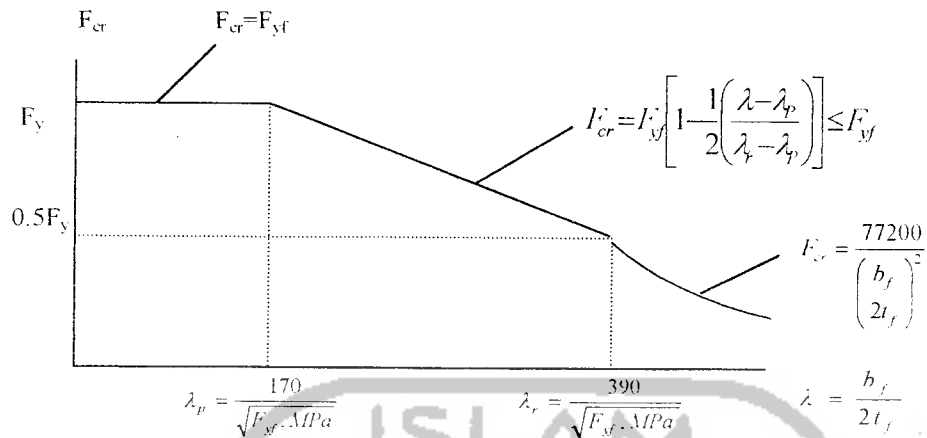
Penentuan “ tegangan kritis”  $F_{cr}$  yang akan digunakan dapat diperoleh dengan membagi kekuatan nominal  $M_n$  dengan modulus penampang  $S_x$ . Untuk badan yang ramping  $F_{cr}$  maksimumnya adalah  $F_{yf}$ , tegangan leleh pada *flensnya*.

Untuk keadaan batas tekuk puntir lateral memberikan :



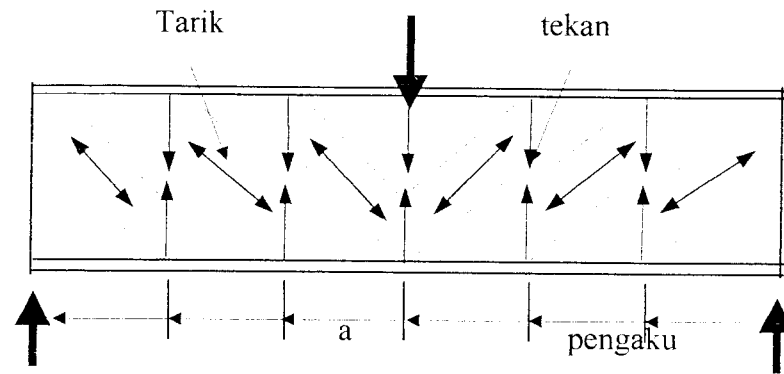


Untuk keadaan batas tekuk lokal *flens* memberikan



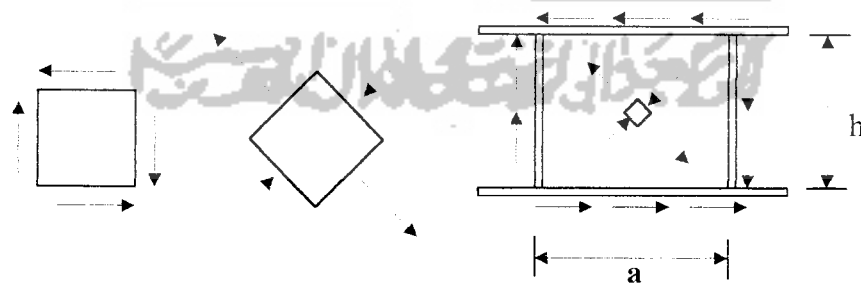
### 3.3.4 Kekuatan Geser Nominal

Gelagar pelat yang mengalami lentur dan diperkaku dengan pelat pengaku akan berperilaku dimana gaya tarik ditahan oleh badan sedangkan gaya tekan ditahan oleh pengaku. Dengan adanya *flens* dan pengaku transversal pada pelat *girder* akan memiliki kekuatan pasca tekuk yang besar. Menurut *Basler*, kemampuan suatu gelagar pelat untuk berperilaku seperti rangka batang (*truss*) telah dikenal sejak 1808, perilaku dimana gaya tarik ditahan oleh aksi membran badan gelagar sedangkan gaya tekan dipikul oleh pengaku transversal ini disebut sebagai “aksi medan tarik”. Adapun perilaku aksi medan tarik yang terjadi pada gelagar pelat dapat dilihat pada gambar 3.10



**Gambar 3.10** Aksi madan tarik pada gelagar berpengu

Tipikal pada penampang berprofil I, pelat badan memikul sebagian geser. Sifat gelagar pelat yang memiliki pelat badan yang tipis ( $h_w/t_w > 2550/\sqrt{F_y}$ ), stabilitas merupakan hal utama yang harus diperhatikan. Suatu panel pelat badan dengan panjang  $a$  diantara pengaku transversal dan tinggi bersihnya diantara tumpuan pelat longitudinal (antara *flens-flens*, *flens* dan pengaku longitudinal, atau antara pengaku-pengaku longitudinal) seperti diperlihatkan pada gambar 3.11. Daerah-daerah yang gesernya tinggi dan momen lenturnya rendah, kekuatan tekuk panel dapat diselidiki dengan mengasumsikan hanya dikenai geser saja (geser murni), seperti dalam gambar 3.11.



- a) elemen dalam geser murni      b) tegangan utama pada elemen dalam geser murni      c) tegangan utama pada panel dalam geser murni

**Gambar 3.11** Teori geser klasik yang dikenakan pada panel badan gelagar pelat.

Tegangan tekuk elastik (Euler) untuk sembarang pelat diberikan pada persamaan sebagai berikut:

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

dimana untuk kasus geser murni persamaan diatas dapat ditulis dengan (salmon & Johnson, 1996) :

$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left( \frac{\text{dimensi pendek}}{t} \right)^2} \quad (3.29)$$

$$\text{dimana } k = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (3.30)$$

Untuk stabilitas elastik diperlukan Cv, Cv sebagai rasio tegangan geser  $\tau_{cr}$  pada saat tekuk terhadap tegangan leleh  $\tau_y$

$$Cv = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 E k}{\tau_y (12)(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.31)$$

dengan memasukan  $E = 200000 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0,3$ ,  $\tau_y = 0,6 F_{yw}$ , maka didapat:

untuk tekuk elastis, dimana  $\frac{h}{t_w} > 615 \sqrt{\frac{k}{F_{yw}, \text{MPa}}}$

$$Cv = \frac{303000k}{(h/t)^2 F_{yw}, \text{MPa}} \quad (3.32)$$

untuk tekuk tak elastis, dimana  $615 \sqrt{\frac{k}{F_{yw}, \text{MPa}}} \geq \frac{h}{t_w} \geq 491 \sqrt{\frac{k}{F_{yw}, \text{MPa}}}$

$$Cv = \frac{491}{(h/t_w)} \sqrt{\frac{k}{F_{yw}, \text{MPa}}} \quad (3.33)$$

Kekuatan geser nominal  $V_n$  dari suatu gelagar berdasarkan tekuk tak elastis atau elastis badan adalah sebagai berikut (Salmon & Johnson, 1996):

$$\text{Untuk } h/tw < 491 \sqrt{\frac{k}{F_{yw, MPa}}}$$

$$V_n = 0,6 F_{yw} A_w \quad (3.34)$$

$$\text{Untuk } h/tw > 491 \sqrt{\frac{k}{F_{yw, MPa}}}$$

$$V_n = 0,6 F_{yw} A_w \left( C_v + \frac{1 - C_v}{1,15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \quad (3.35)$$

### 3.3.5 Kombinasi Lentur dengan Geser

Pada sebagian besar kasus, kekuatan nominal  $M_n$  dalam lentur tidak dipengaruhi oleh geser, demikian pula kekuatan geser nominal  $V_n$  tidak dipengaruhi oleh momen. Pada badan gelagar yang sangat tipis dimana tekuk lentur dapat terjadi, tegangan lentur didistribusikan sedemikian rupa sehingga *flensnya* dapat memikul bagian yang lebih besar. Namun kekuatan geser badan gelagar tidak direduksi sebagai akibat tekuk lentur karena sebagian besar kekuatan geser berasal dari aksi medan tarik dengan hanya sedikit kontribusi dari bagian badan yang berdekatan dengan *flens*. Pada badan gelagar yang lebih pendek-tebal tekuk lentur tidak mungkin terjadi, namun geser yang tinggi pada badan dalam kombinasi dengan lentur dapat menyebabkan lelehnya badan yang berdekatan dengan *flens*, sekali lagi mengakibatkan transfer sebagian momen lentur seharusnya diterima badan gelagar ke *flens*.

Pada saat terkena momen lentur yang tinggi, pelat badan dekat *flens* meleleh dan tidak mampu memikul geser. Didaerah pertengahan tinggi badan gelagar, geser itu menyebabkan leleh sehingga bagian badan ini tidak mampu memikul momen lentur. Bila kekuatan geser gelagar pelat tergantung pada keikutsertaan aksi medan tarik, badan gelagar itu harus memenuhi kriteria interaksi, untuk geser yang dikombinasikan dengan tarik dari lentur.

Dengan mengetahui bahwa dalam desain sebuah gelagar  $V^n$  dan  $M^n$  merupakan kekuatan yang dibutuhkan secara kombinasi maka suku ini diganti masing-masing dengan  $V_u/\phi$  dan  $M_u/\phi$ . Faktor resistansi  $\phi$  untuk hubungan gerak tarik ini adalah 0.9, nilai yang digunakan untuk lentur. Dengan demikian hubungan interaksi untuk LRFD adalah:

1. Untuk  $V_u/\phi V_n \leq 0.6$ , persyaratan noninteraksi dasar berlaku

$$M_u \leq \phi M_n \quad (3.36)$$

2. Untuk  $M_u/\phi M_n \leq 0.75$ , persyaratan noninteraksi dasar berlaku

$$V_u \leq \phi V_n \quad (3.37)$$

3. Bila persamaan (3.36) dan (3.37) tidak berlaku yakni geser terfaktor  $V_u$  melampaui  $0.6 \phi V_n$  atau momen terfaktor  $M_u$  melampaui  $0.75 \phi M_n$  maka persamaan yang berlaku adalah (AISC-LRFD):

$$\frac{M_u}{\phi M_n} + 0.625 \left( \frac{V_u}{\phi V_n} \right) \leq 1.375 \quad (3.38)$$

Asumsi bahwa ketidaksamaan yang berkaitan dengan  $0.6 \phi V_n$  dan  $0.75 \phi M_n$  untuk persamaan (3.37) dan (3.38) adalah tidak dipenuhi memberikan serangkaian

persamaan dibawah ini, yang masing-masing diikuti dengan persyaratan dasar terkait yang harus dipenuhi

$$V_u > \phi 0.6 V_n \quad (3.39a)$$

$$M_u < \phi M_n \quad (3.39b)$$

$$M_u > \phi 0.75 M_n \quad (3.40a)$$

$$V_u < \phi V_n \quad (3.40b)$$

Bila masing-masing pasangan dibagi maka akan diperoleh

$$\frac{V_u}{M_u} \geq \frac{0.6V_n}{M_n} \quad (3.41)$$

$$\frac{M_u}{V_u} \geq \frac{0.75M_n}{V_n} \quad (3.42)$$

bila persamaan (3.41) dan (3.42) dimasukkan bersamaan akan diperoleh:

$$\frac{0.6V_n}{M_n} \leq \frac{V_u}{M_u} \leq \frac{V_n}{0.75M_n} \quad (3.43)$$

bila rasio  $V_u/M_u$  terletak dalam rentang persamaan (3.42), persamaan (3.38) harus dipenuhi.

#### a. Pengaku Dukungan/landasan

Pengaku dukungan hampir selalu dipakai dalam perencanaan AISC antara lain pada tiap tumpuan dan pada tempat-tempat yang menahan beban terpusat. Pengaku ini harus memanjang penuh kejarak antar *flens* dan mempunyai sebuah dukungan yang rapat melawan *flens* yang mengantarkan beban tersebut. Lebar pengaku harus memanjang kira-kira ketepi luar *flens*. Apabila beban terpusat seperti reaksi ujung atau kolom yang ditumpu oleh gelagar pelat melampaui leleh

pelat badan lokal, kekuatan pelipatan pelat badan, atau kekuatan tekuk pelat badan kearah samping, maka harus disediakan pengaku dukung. Pengaku tumpu yang mentransmisikan beban tekan didesain sebagai kolom. Panjang efektif KL dari kolom adalah kurang dibandingkan kedalaman  $h$  dari pelat badan karena kekangan yang diberikan oleh *flens*. Panjang efektif KL menurut LRFD harus diambil sama dengan  $0.75h$ . Rasio kelangsingan dihitung sebagai

$$\frac{KL}{r} = 0.75 \frac{h}{r} \quad (3.44)$$

dengan  $h$  = kedalaman pelat badan

$r$  = jari-jari girasi

luas efektif  $A_e$  yang diperlukan dihitung menggunakan kekuatan kolom  $P_n$ .

Persyaratan kekuatan menurut LRFD adalah

$$\phi_c P_n \geq P_u \quad (3.45)$$

dengan  $\phi$  = faktor resistansi = 0.85

$P_n = F_{cr} A_e$

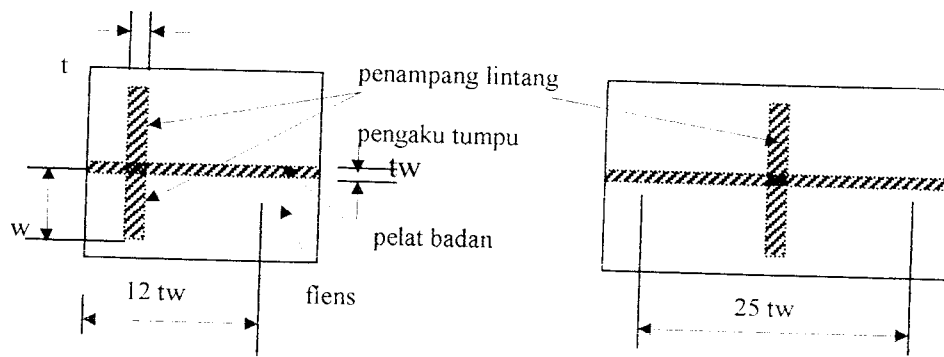
$P_u$  = beban tekan terpusat terfaktor

$F_{cr}$  = tegangan tekuk kolom

$A_e$  = luas kolom yakni yang mencakup luas pelat pengaku dan luas pelat badan daerah pengaruhnya.

Jadi luas efektif yang diperlukan adalah( Salmon & Johnson, 1996):

$$A_{e\text{perlu}} = \frac{P_u}{\phi_c F_{cr}} \quad (3.46)$$



a) pengaku ujung

b) pengaku interior

**Gambar 3.12** Penampang lintang efektif pengaku tumpu

Karena lebar  $w$  pelat pengaku ditentukan oleh lebar *flens* gelagar pelat, tebal minimum untuk mencegah tekuk lokal adalah

$$t_{\min} = \frac{w}{250/\sqrt{k_y}} \quad (3.47)$$

Persyaratan tumpu yang harus dipenuhi oleh LRFD adalah

$$\phi R_n \geq P_u \quad (3.48)$$

dengan  $\phi = 0.75$

$R_n$  = kekuatan tumpu nominal =  $2,0 F_y A_{pb}$

$A_{pb}$  = luas kontak pengaku yang menumpu pada *flens*

### b. Pengaku antara

Gelagar pelat biasanya didesain dengan disertai pengaku antara. Ada dua parameter stabilitas untuk badan gelagar yaitu  $h/tw$  dan  $a/h$ , bila parameter stabilitas ini dipertahankan cukup rendah maka tekuk akibat geser dapat dihindari atau tegangan geser dapat dipertahankan di bawah tegangan tekuk kritis  $\tau_{cr}$ . Balok



tempa memiliki rasio  $h/tw$  yang rendah sehingga tekuk akibat geser tidak akan terjadi. Bila jarak antar pengaku  $a$  membuat  $a/tw$  cukup rendah dan ukurannya cukup memungkinkan mereka bekerja sebagai elemen tekan dalam sebuah rangka, kekuatan pasca tekuk (aksi medan tarik) akan tersedia dan dapat dimanfaatkan dalam desain.

AISC menentukan bahwa pengaku antara tidak diperlukan apabila dipenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

$$\frac{h}{tw} \leq 260 \quad (3.49)$$

$$\text{dan } Vn \leq Cv(0.6Fyw)Aw \quad (3.50)$$

dimana rasio tegangan geser ( $Cv$ ) diperoleh dari persamaan (3.32) dan (3.33) dengan memasukan nilai  $k = 5$  menjadi:

$$Cv = \frac{1100}{\frac{h}{tw} \sqrt{Fyw, MPa}} \quad (\text{tekuk tak elastis}) \quad (3.51)$$

$$\text{bila } \frac{1100}{\sqrt{Fyw, MPa}} \leq \frac{h}{tw} \leq \frac{1400}{\sqrt{Fyw, MPa}}$$

$$Cv = \frac{1516900}{(h/tw)^2 Fyw, MPa} \quad (\text{tekuk elastis}) \quad (3.52)$$

$$\text{bila } \frac{h}{tw} > \frac{1400}{\sqrt{Fyw, MPa}}$$

### Kriteria penempatan jarak antar pengaku

Bila geser terfaktor  $Vu$  melampaui  $\phi Vn$ , dengan  $\phi = 0.9$  dan  $Vn$  diberikan oleh persamaan (3.50) dengan  $k = 5$  pengaku dibutuhkan. Pengaku selalu

dibutuhkan bila  $h/t_w$  melampaui 260. Penggunaan pengaku antara dapat mereduksi rasio  $a/h$  dan memperbesar  $V_n$ . Persamaan (3.50) berlaku untuk situasi dengan dan tanpa pengaku antara bila sasarannya adalah untuk mencegah tekuk yang diakibatkan oleh geser dengan kekuatan nominal total  $V_n$  diberikan pada persamaan (3.35) sebagai berikut:

$$V_n = 0.6 F_y w A_w \left( C_v + \frac{1 - C_v}{1.15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right)$$

Penggunaan aksi medan tarik tidak diijinkan bila persamaan (3.53) terlampaui dan bila batas  $a/h$  terlampaui maka harus digunakan  $k = 5$ .

$$\frac{a}{h} \leq \left( \frac{260}{h/t_w} \right)^2 \leq 3.0 \quad (3.53)$$

#### Persyaratan kekakuan

Pengaku *intermediate* harus cukup *rigid* untuk menjaga pelat badan gelagar pada pengaku itu agar tidak terdefleksi keluar bidang pada saat tekuk badan gelagar terjadi. Persyaratan kekakuan menurut LRFD adalah sebagai berikut:

$$I_{st} \geq j a t_w^3$$

Dimana  $I_{st}$  = momen inersia luas penampang lintang sebuah pengaku transversal terhadap pusat ketebalan badan gelagar bila pengaku itu terdiri dari sepasang pelat, dan diambil terhadap muka pengaku yang berkontak dengan badan gelagar bila pengaku pelat tunggal digunakan.

$$J = \frac{2.5}{(a/h)^2} - 2 \geq 0.5 \quad (3.54)$$

### Persyaratan kekuatan

Pengaku antara memikul beban tekan hanya setelah tekuk pelat badan terjadi. Pada saat aksi medan tarik yang menyerupai *truss* pasca tekuk meningkat, gaya pengaku meningkat pula. Gaya maksimum dalam pengaku yaitu  $P_s$  yang tercapai bersamaan dengan tercapainya kekuatan geser nominal  $V_n$  diberikan oleh persamaan dibawah ini:

$$P_s = 0.15 F_{yw} (1 - C_v) a t_w \quad (3.55)$$

Luas pengaku yang dibutuhkan adalah gaya  $P_s$  dibagi dengan tegangan leleh  $F_{yst}$  baja pengaku sebagai berikut (AISC-LRFD):

$$A_s \text{ perlu} = \frac{F_{yw}}{F_{yst}} \left( 0.15 D A_w (1 - C_v) \frac{V_u}{\phi V_n} - 18 t_w^2 \right) \quad (3.56)$$

dimana  $C_v$  = harga – harga dari persamaan 3.51 dan 3.52

- $D$  = faktor untuk memperhitungkan pembebanan eksentrik pada pengaku
- = 1 untuk pengaku yang berpasangan pada masing – masing sisi badan gelagar
- = 1.8 untuk pengaku sisi tunggal
- = 2.4 untuk pengaku pelat tunggal

$F_{yst}$  = tegangan leleh yang dispesifikasikan untuk baja pengaku

### 3.3.6 Perencanaan Sambungan Las

Pengelasan merupakan proses penggabungan material-material (biasanya logam) dengan pemanasan sampai ke temperatur yang sesuai sehingga bahan-bahan tersebut melebur menjadi satu material. Proses pengelasan yang digunakan adalah *shielded metal arc welding* (SMAW) yaitu las busur logam berpelindung yang merupakan salah satu tipe paling tua, paling sederhana dan paling luwes untuk pengelasan baja struktur. Proses pemanasannya dicapai dengan penggunaan sebuah busur listrik diantara elektroda berpelapis dan material yang sedang digabungkan. Selama proses pengelasan elektroda berpelapis tersebut akan termakan pada saat logam ditransfer dari elektroda ke material dasar. Kawat elektroda berfungsi sebagai bahan pengisi sedangkan lapisan pada elektroda berfungsi sebagai berikut:

1. Menghasilkan gas pelindung untuk mencegah masuknya udara dan menstabilkan busur.
2. Memasukan material-material lain seperti pendeoksidasi untuk memperbaiki struktur butiran logam las.
3. Menghasilkan suatu selimut terak diatas kolam lelehan dan memadatkan las untuk melindunginya dari pengaruh oksigen dan nitrogen di udara.

Tipe sambungan tergantung pada berbagai faktor seperti ukuran dan bentuk batang yang akan membentuk sambungan, tipe pembebanan, besarnya luas sambungan yang akan dilas. Pada gelagar pelat digunakan tipe sambungan T yang secara khusus tipe ini bermanfaat karena memungkinkan bagian-bagian dibuat dari pelat-pelat datar yang dapat digabungkan dengan las *groove* atau las *fillet*.

Untuk tipe las digunakan las *fillet* (*fillet weld*) yang hemat dan mudah dipabrikasi. Las *fillet* secara khusus berguna bagi pengelasan dilapangan karena pinggiran bagian-bagian yang disambungkan jarang membutuhkan persiapan khusus seperti pemotongan miring atau pengirisan tegak.

Kekuatan las *fillet* mungkin ditentukan oleh kekuatan elektroda las atau kekuatan geser material dasar. Kekuatan desain per satuan panjang las *fillet* didasarkan atas resistensi geser melalui leher las sebagai berikut:

$$\phi R_{nw} = 0,75 t_e (0,6 F_{EXX}) \quad \text{Las } \textit{fillet} \quad (3.57)$$

$$\phi R_{nw} = 0,75 t (0,6 F_u) \quad \text{Logam dasar} \quad (3.58)$$

dengan  $t_e$  = dimensi leher efektif =  $0,707 \cdot a$

$t$  = tebal material dasar disepanjang las

$a$  = ukuran nominal las

$F_{EXX}$  = kekuatan tarik material las

$F_u$  = kekuatan tarik logam dasar

Tidak satupun ukuran las yang didesain dengan kekuatan lebih besar dari pada kekuatan material dasar didekatnya sehingga kapasitas per satuan panjang logam disamakan dengan kapasitas geser per satuan panjang material dasar untuk SMAW akan diperoleh:

$$a_{\text{eff max}} = \frac{0,6 \cdot F_u \cdot t}{2 \cdot (0,707) \cdot 0,6 \cdot F_{EXX}} = 0,707 \frac{F_u \cdot t}{F_{EXX}} \quad (3.59)$$

Pada pelat girder ada dua model sambungan yaitu sambungan antara *flens* dengan pelat badan dan pengaku dengan pelat badan. Sambungan *flens* ke pelat badan harus memperhitungkan aliran geser horizontal terfaktor.

$$\text{Aliran geser} = \frac{Vu.Q}{I_x} \quad (3.60)$$

dengan  $Q = A_f \cdot (h/2 + t_f/2)$

$Vu$  = geser terfaktor pada penampang

$Q$  = momen statis *flens* terhadap sumbu netral

$I_x$  = momen inersia penampang terhadap sumbu x

Sambungan pengaku dengan pelat badan seharusnya didesain untuk memberikan kekuatan aliran geser  $f_{nv}$  yang diberikan oleh :

$$f_{nv} = 0,045 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{F_y^3}{E}} \quad (3.61)$$

dengan  $h$  = tinggi penampang

$F_y$  = tegangan leleh baja pada badan

$E$  = modulus elastis baja

### 3.3.7 Analisa terhadap lendutan

Lendutan terjadi jika suatu balok menahan beban yang menyebabkan lentur maka suatu balok akan mengalami lendutan. Lendutan sering kali harus dihitung untuk memeriksa kemungkinan melebihi batas yang diizinkan. Hal ini terjadi pada waktu perencanaan bangunan dan juga dapat membantu pada saat pelaksanaan di lapangan. Dengan demikian tinjauan terhadap lendutan merupakan bagian dari proses perancangan. Perhitungan lendutan menggunakan metode pengintegrasian persamaan momen lentur ( Gere and Timoshenko, 1987). Persamaan kurva lendutan yang mengandung unsur momen lentur dapat diintegrasikan untuk memperoleh lendutan  $v$  sebagai fungsi  $x$ . Berhubung persamaan diferensial

tersebut adalah tingkat dua, pengintegrasian yang diperlukan adalah dua kali. Langkah pertama perhitungan adalah menuliskan persamaan untuk momen lentur dengan mempergunakan diagram benda bebas dan keseimbangan statis. Untuk setiap bagian, persamaan untuk  $M$  diganti dengan persamaan diferensial. Kemudian persamaan tersebut diintegrasikan untuk mendapatkan kemiringan  $v'$ , dan konstanta integrasi akan muncul pada proses ini. Integrasi kedua akan memberikan lendutan  $v$  dan konstanta lainnya akan tampak pada hasil pengintegrasian ini. Jadi ada dua konstanta integrasi untuk setiap bagian balok. Konstanta-konstanta ini dapat ditentukan dari kondisi-kondisi batas sehubungan dengan  $v$  dan  $v'$  pada perletakan balok dan dari kondisi kontinuitas  $v$  dan  $v'$  pada titik-titik dimana bagian-bagian balok tersebut bertemu. Kemudian konstanta-konstanta hasil evaluasi tersebut dapat disubstitusikan kembali ke dalam persamaan-persamaan untuk  $v$ , sehingga menghasilkan persamaan akhir untuk kurva lendutan

### 3.3.8 Perencanaan Gelagar Nonprismatis

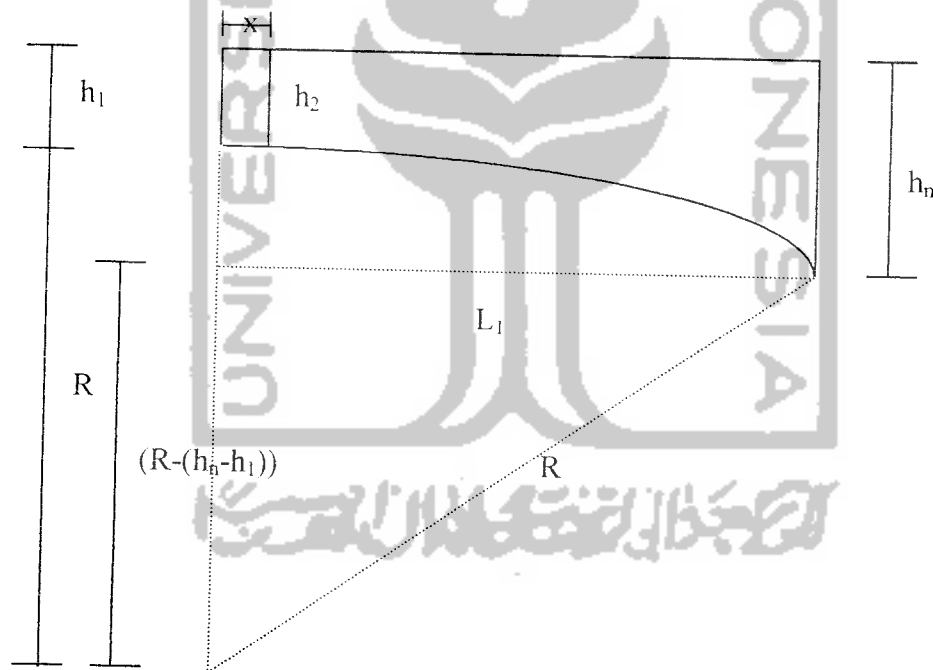
Untuk merencanakan gelagar nonprismatis, mula-mula didesain luas badan dan luas sayap berdasarkan persyaratan yang telah ditetapkan oleh AISC untuk gelagar prismatis berdasarkan asumsi awal terhadap tinggi badan, selanjutnya tinggi gelagar divariasikan dengan memasukkan pengaruh momen yang terjadi.

Adapun prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. mula-mula ditentukan tinggi pelat dengan memakai persamaan (3.7)
2. dari nilai tersebut ditentukan tebal badan,
3. kemudian menentukan luas sayap yang diperlukan untuk momen positif dan momen negatif,

4. kemudian dengan mengulangi perhitungan sesuai dengan momen yang terjadi untuk setiap bentang akan didapat nilai  $h$  (tinggi pelat) yang bervariasi,
5. kemudian dilakukan perhitungan jari-jari lingkaran.

mengacu pada Gambar (3.13), maka nilai  $R^2 = (R - (h_n - h_1))^2 + L_1^2$ , dengan memasukkan nilai  $(h_n - h_1)$  dan  $L_1$  dari hasil perhitungan dan perencanaan maka akan diperoleh nilai  $R$ . Dengan mengacu pada persamaan  $h_i = (R + h_1) - \sqrt{R^2 - X^2}$ , sehingga diperoleh nilai  $h_2$  dengan nilai  $X$  adalah jarak segment dari perencanaan pelat nantinya (nomor nodal) sehingga untuk nilai  $h$  dan seterusnya dapat dicari.



**Gambar 3.13** Sket mencari tinggi gelagar



### 3.4 Hipotesis

Berdasarkan dari uraian pada bab sebelumnya bahwa penampang gelagar ditentukan berdasarkan besar momen yang bekerja, dimana momen yang bekerja pada gelagar menerus disepanjang bentang bervariasi. Karena besar momen yang bekerja bervariasi maka diperlukan tinggi penampang yang bervariasi pula. Semakin besar momen yang bekerja maka tinggi penampang yang diperlukan semakin besar begitu pula sebaliknya semakin kecil momen yang bekerja maka tinggi penampang yang diperlukan semakin kecil. Dengan demikian kami berasumsi bahwa dengan perencanaan jembatan gelagar nonprismatis akan diperoleh suatu penampang yang efisien yang mampu menahan beban-beban yang bekerja.

