

STRUKTUR BAJA 1

MODUL 4

Sesi 4

Batang Tekan (*Compression Member*)

Materi Pembelajaran :

9. Tekuk Lentur Torsi.

- a) Tekuk Lentur Torsi Profil Siku Ganda dan Profil T.
- b) Tekuk Lentur Torsi Profil Dengan Dua Sumbu Simetri.
- c) Bentuk Penampang yang mengalami Torsi dan Warping.
- d) Konstanta Torsi dan Warping Untuk Beberapa Bentuk Penampang.
- e) CONTOH SOAL : EVALUASI.
- f) CONTOH SOAL : PERENCANAAN.

Tujuan Pembelajaran :

- *Mahasiswa dapat mengetahui dan memahami tekuk lentur torsi pada profil tersusun siku ganda, profil T, profil dengan sumbu simetri, konstanta torsi dan konstanta warping, evaluasi dan perencanaan batang tekan dengan profil tersusun siku ganda dan pelat koppel.*

DAFTAR PUSTAKA

- a) Agus Setiawan, "Perencanaan Struktur Baja Dengan Metode LRFD (Berdasarkan SNI 03-1729-2002)", Penerbit AIRLANGGA, Jakarta, 2008.
- b) Canadian Institute of Steel Construction, 2002.
- c) Charles G. Salmon, Jhon E. Johnson, "STRUKTUR BAJA, Design dan Perilaku", Jilid 1, Penerbit AIRLANGGA, Jakarta, 1990.
- d) "PERATURAN PERENCANAAN BANGUNAN BAJA (PPBBI)", Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan, 1984.
- e) SNI 03 - 1729 – 2002. Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung.
- f) William T. Segui, "Steel Design", THOMSON, 2007.

BATANG TEKAN

(COMPRESSION MEMBER)

9. Tekuk Lentur Torsi.

Apabila batang tekan yang memikul tekan aksial mulai tidak stabil pada seluruh panjangnya, dan bukan tekuk lokal, maka batang akan tertekuk dengan tiga kemungkinan seperti berikut :

- Tekuk lentur.

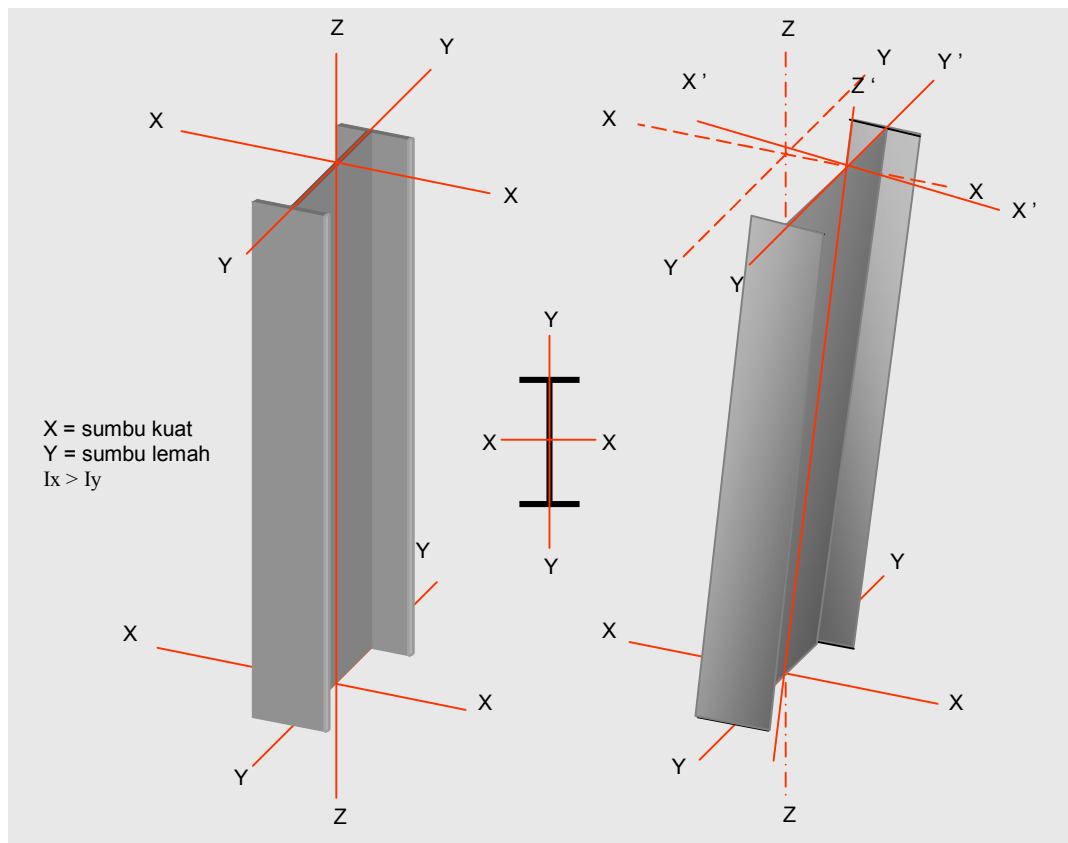
Tekuk lentur adalah dimana batang tekan melentur pada arah jari-jari inerti minimum, ini berlaku untuk seluruh jenis penampang, lihat gambar (20). Kegagalan struktur dengan tekuk lentur seperti ini telah dibahas pada modul sebelumnya.

- Tekuk Torsi.

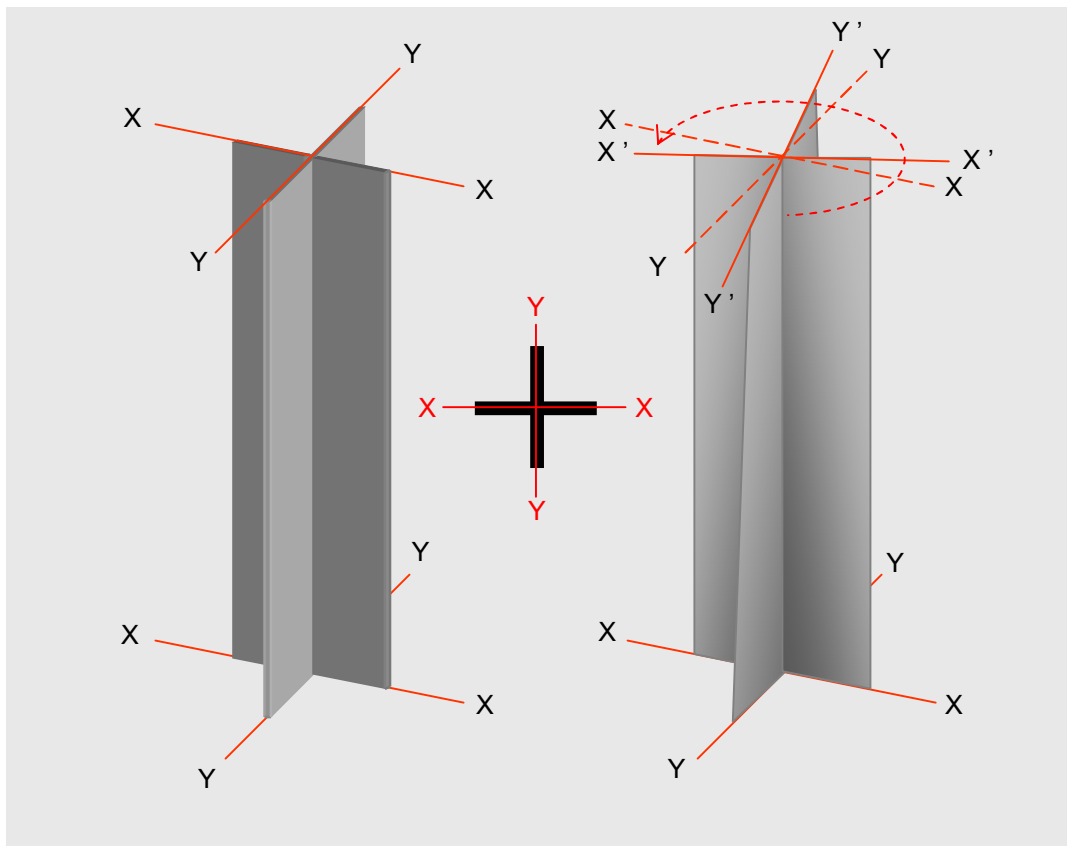
Kegagalan seperti ini terjadi dengan berputarnya penampang sepanjang sumbu longitudinal batang. Dapat terjadi pada penampang simetris melintang dengan element penampang yang langsing (pelat tipis), gambar (21).

- Tekuk Lentur Torsi.

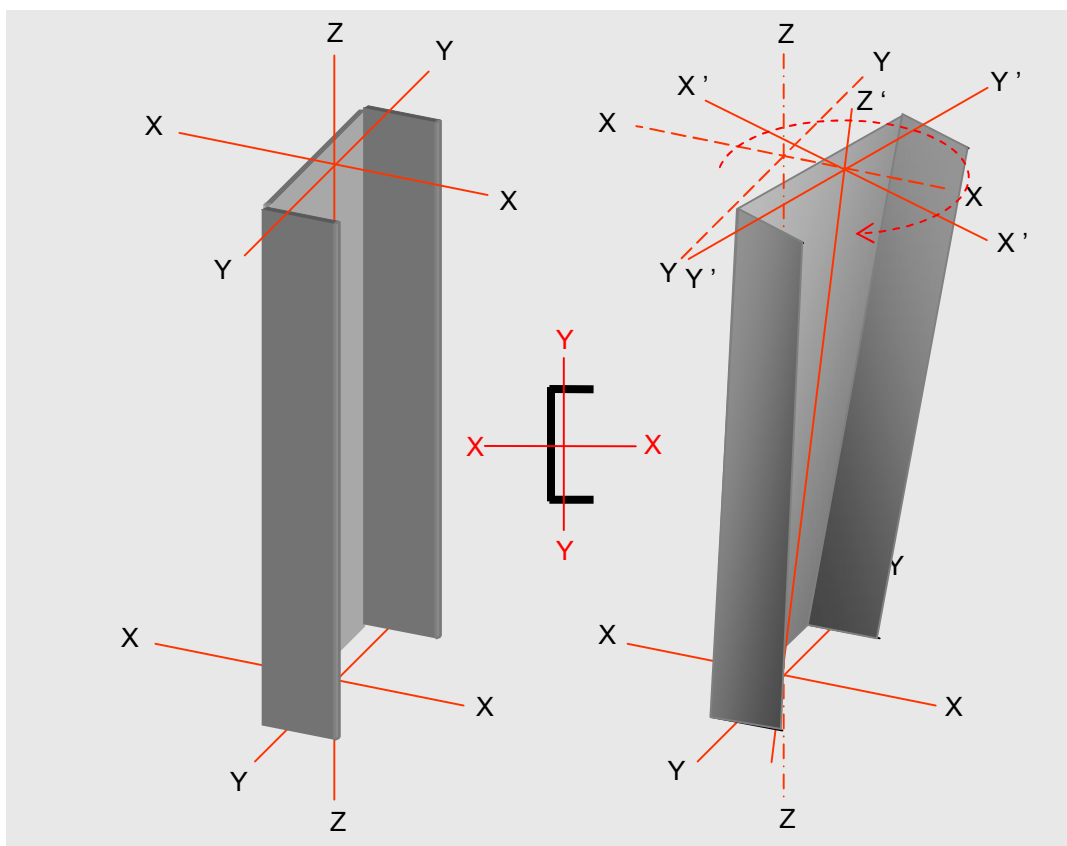
Tekuk yang terjadi diakibatkan batang disamping melentur juga berputar secara bersamaan, yaitu kombinasi antara lentur dan torsi. Kegagalan seperti ini dapat terjadi pada penampang dengan satu sumbu simetris dan penampang yang tidak simetris, seperti profil kanal (C), T, profil siku ganda, batang tunggal profil siku sama kaki dan profil siku tunggal tidak sama kaki.



Gambar 20 : Tekuk lentur pada arah sumbu lemah.



Gambar 21 : Tekuk torsi.



Gambar 22 : Tekuk lentur - torsi.

a). **Tekuk Lentur Torsi Profil Siku Ganda dan Profil T.**

SNI 03-1729-2002 pasal 9.2 menetapkan bahwa kuat tekan rencana akibat tekuk lentur-torsi, $\phi_n \cdot N_{nlt}$ dari komponen struktur tekan yang terdiri dari profil siku-ganda (\angle) atau profil berbentuk T (\bar{T}), dengan elemen-elemen penampangnya mempunyai rasio lebar-tebal, λ_r lebih kecil daripada yang ditentukan dalam Tabel 7.5-1, harus memenuhi,

$$N_u \leq \phi_n \cdot N_{nlt} \quad \dots(29)$$

Dimana,

ϕ_n = adalah faktor reduksi kekuatan = 0,85 (lihat SNI Tabel 6.4-2).

Kekuatan nominal lentur torsi,

$$N_{nlt} = A_g \cdot f_{clt} \quad \dots(30)$$

Tegangan kritis tekuk lentur torsi.

$$f_{clt} = \left(\frac{f_{cry} + f_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4f_{cry} \cdot f_{crz} \cdot H}{(f_{cry} + f_{crz})^2}} \right] \quad \dots(31)$$

Dimana,

$$f_{crz} = \frac{G \cdot J}{A_g \cdot \bar{r}_o^2} \quad \dots(31.a)$$

G = modulus geser,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{200.000 \text{ MPa}}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 76923 \text{ Mpa.}$$

A_g = luas total penampang.

E = 200.000 Mpa (baja).

ν = angka poisson = 0,30.

J = konstanta torsi/puntir, besarnya

$$J = \sum \frac{1}{3} b \cdot t^3 \quad \dots(31.b)$$

\bar{r}_o = adalah jari-jari girasi polar terhadap pusat geser.

$$\bar{r}_o^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + x_o^2 + y_o^2 \quad \dots(31.c)$$

$$H = 1 - \left(\frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{r}_o^2} \right) \quad \dots(31.d)$$

x_o, y_o = koordinat pusat geser terhadap titik berat, $x_o = 0$ untuk siku ganda dan profil T (sumbu y - sumbu simetris).

f_{cry} = dihitung sesuai dengan persamaan berikut, untuk tekuk lentur terhadap sumbu lemah y - y , dan dengan menggunakan harga λ_c , yang dihitung dengan persamaan (15),

$$f_{cr} = \frac{f_y}{\omega_{iy}}$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{L_{ky}}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

b). Tekuk Lentur Torsi Profil Dengan Dua Sumbu Simetri.

Tegangan kritis tekuk lentur torsi untuk profil dengan dua sumbu simetri seperti profil WF, diberikan oleh persamaan berikut,

$$f_{clt} = \frac{G \cdot J}{I_p} + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{L k^2 \cdot I_p} \quad \dots(32)$$

Dimana,

Lk = panjang tekuk = $k \cdot L$

I_p = momen inertia polar = $I_x + I_y$.

C_w = konstanta torsi warping, besarnya,

$$C_w = \frac{b^3 \cdot t^3}{9} \quad \dots(33)$$

J = konstanta torsi/puntir, besarnya,

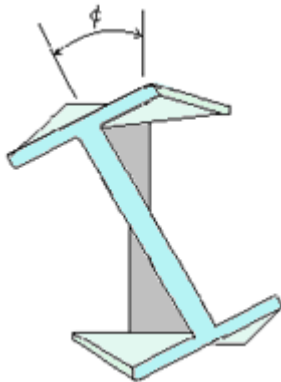
$$J = \sum \frac{1}{3} b \cdot t^3 \quad \dots(34)$$

Batas jari-jari inertia yang menyebabkan terjadinya tekuk torsi,

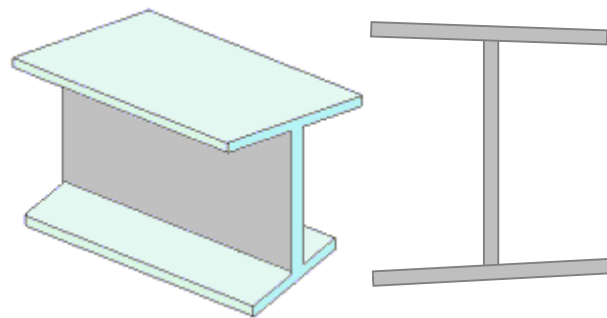
$$r_1^2 = \frac{C_w + 0,04 \cdot J \cdot (Lk)^2}{I_p} \quad \dots(35)$$

Jika $r_1 < r_x$ atau r_y (i_x atau i_y) maka keruntuhan profil akan ditentukan oleh tekuk lentur torsi.

c). Bentuk Penampang yang mengalami Torsi dan Warping.



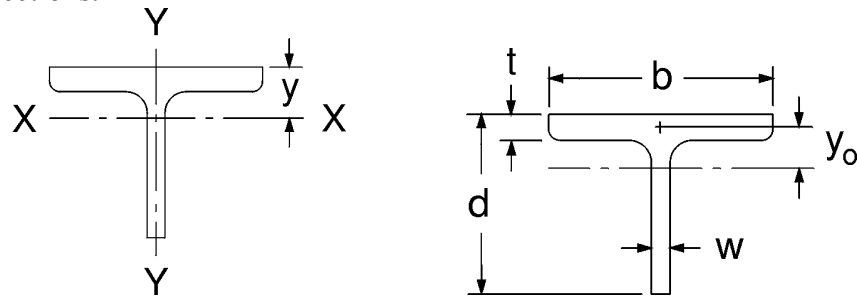
Gambar 23.(a) : Bentuk batang tekan yang mengalami torsi.



Gambar 23.(b) : Bentuk batang tekan yang mengalami warping.

d). **Konstanta Torsi dan Warping Untuk Beberapa Bentuk Penampang.**
(*Canadian Institute of Steel Construction, 2002*).

d1. T - Sections.



Gambar 24.

$$J = \frac{bt^3 + d'w^3}{3} \quad \dots(36a.)$$

$$C_w = \frac{b^3t^3}{144} + \frac{(d')^3w^3}{36} \quad (\text{Bleich 1952, Picard and Beaulieu 1991}) \quad \dots(36b.)$$

$$d' = d - \frac{t}{2} \quad \dots(36c.)$$

The warping constant of T-sections is small and often neglected.

The shear centre is located at the intersection of the flange and stem plate axes.

Example calculation: WT180x67

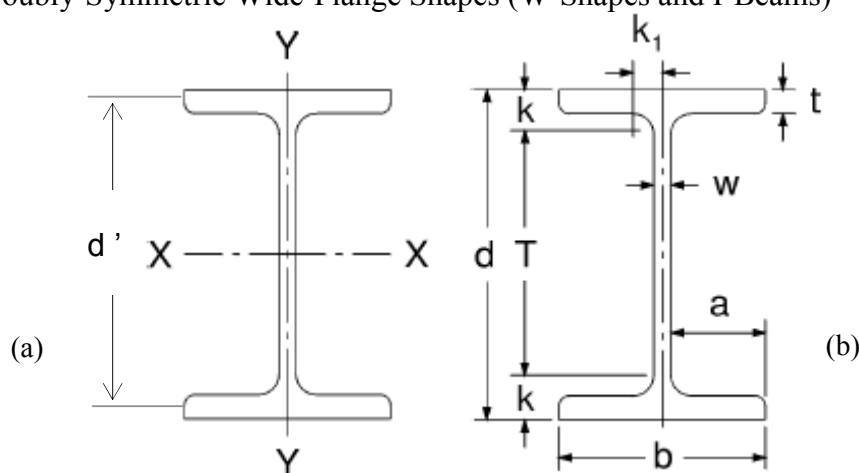
$d = 178 \text{ mm}$, $b = 369 \text{ mm}$, $t = 18.0 \text{ mm}$, $w = 11.2 \text{ mm}$

$d' = 169 \text{ mm}$

$J = 796 \times 10^3 \text{ mm}^4$.

$C_w = 2.22 \times 10^9 \text{ mm}^6$.

d2. Doubly-Symmetric Wide-Flange Shapes (W-Shapes and I-Beams)



Gambar 25.

$$J = \frac{2bt^3 + d'w^3}{3} \quad (\text{Galambos 1968}) \quad \dots(37a.)$$

$$C_w = \frac{(d')^2 b^3 t}{24} \quad (\text{Galambos 1968, Picard and Beaulieu 1991}) \quad \dots(37b.)$$

$$d' = d - t \quad \dots(37c.)$$

Example calculation: W610x125

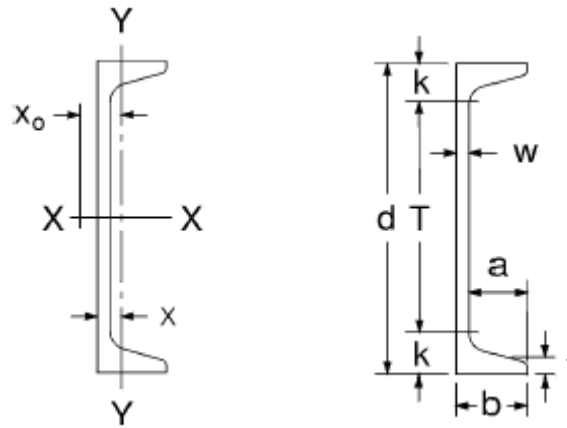
$d = 612 \text{ mm}$, $b = 229 \text{ mm}$, $t = 19.6 \text{ mm}$, $w = 11.9 \text{ mm}$

$d' = 592 \text{ mm}$

$J = 1480 \times 10^3 \text{ mm}^4$.

$C_w = 3440 \times 10^9 \text{ mm}^6$.

d3. Channels



Gambar 26.

$$J = \frac{2b't^3 + d'w^3}{3} \quad (\text{SSRC 1998}) \quad \dots(38a.)$$

$$C_w = (d')^2 (b')^3 t \left[\frac{1-3\alpha}{6} + \frac{\alpha^2}{2} \left(1 + \frac{d'w}{6b't} \right) \right] \quad (\text{Galambos 1968, SSRC 1998}) \quad \dots(38b.)$$

$$\alpha = \frac{1}{2 + \frac{d'w}{3b't}} \quad \dots(38c)$$

$$d' = d - t, \quad b' = b - w/2 \quad \dots(38d)$$

Shear centre location:

$$x_o = x + b' \alpha - \frac{w}{2} \quad (\text{Galambos 1968, Seaburg and Carter 1997}) \quad \dots(38e.)$$

Example calculation: C310x31

$d = 305 \text{ mm}$, $b = 74 \text{ mm}$, $t = 12.7 \text{ mm}$, $w = 7.2 \text{ mm}$

(Actual flange slope = 1/6; zero slope assumed here for simplicity)

$d' = 292 \text{ mm}$, $b' = 70.4 \text{ mm}$

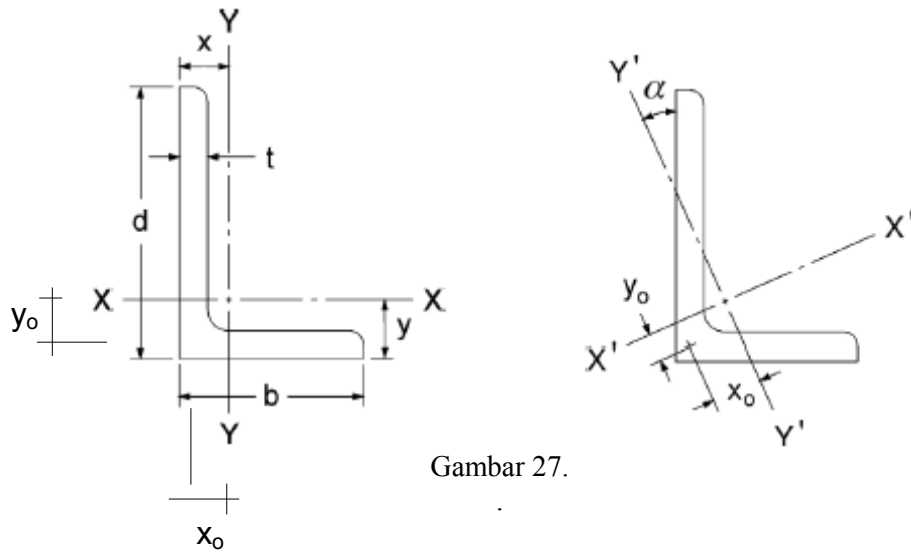
$J = 132 \times 10^3 \text{ mm}^4$

$\alpha = 0.359$, $C_w = 29.0 \times 10^9 \text{ mm}^6$.

$x = 17.5 \text{ mm}$ (formula not shown)

$x_o = 39.2 \text{ mm}$.

d4. Angles.



Gambar 27.

$$J = \frac{(d' + b')t^3}{3} \quad \dots(39a.)$$

$$C_w = \frac{t^3}{36} [(d')^3 + (b')^3] \quad (\text{Bleich 1952, Picard and Beaulieu 1991}) \quad \dots(39b.)$$

$$d' = d - \frac{t}{2}, \quad b' = b - \frac{t}{2} \quad \dots(39c.)$$

$$x_0 = y - t/2 ; \quad y_0 = y - t/2 \quad \dots(39d.)$$

The warping constant of angles is small and often neglected. For double angles, the values of J and C_w can be taken equal to twice the value for single angles.

The shear centre (x_0, y_0) is located at the intersection of the angle leg axes.

Example calculation: L203x102x13

$d = 203 \text{ mm}$, $b = 102 \text{ mm}$, $t = 12.7 \text{ mm}$

$d' = 197 \text{ mm}$, $b' = 95.7 \text{ mm}$

$J = 200 \times 10^3 \text{ mm}^4$.

$C_w = 0.485 \times 10^9 \text{ mm}^6$.

CONTOH SOAL : EVALUASI

Lakukanlah evaluasi terhadap batang tekan dari profil siku ganda 45.45.5 dengan panjang batang $L = 2,50$ meter, ujung-ujungnya diikat dengan perletakan sendi-sendi, memakai pelat koppel dengan ukutan tebal $t_p = 5$ mm, tinggi $h = 60$ mm. Tebal pelat buhul (jarak antara kedua sayap) $\delta = 7$ mm. Mutu baja BJ-34.

Data-data :

$$I_x = I_y = 78300 \text{ mm}^4.$$

$$i_x = i_y = r_x = r_y = 13,5 \text{ mm}.$$

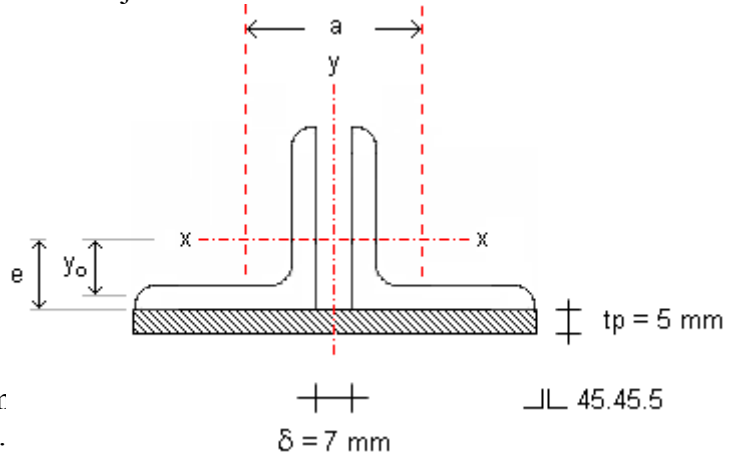
$$I_{\eta} = 32500 \text{ mm}^4.$$

$$i_{\eta} = 8,7 \text{ mm}.$$

$$A = 430 \text{ mm}^2.$$

$$A_g = 2 \cdot 430 \text{ mm}^2 = 860 \text{ mm}^2.$$

$$e = 12,8 \text{ mm}.$$



Gambar 28.

$$a = 2e + \delta = 2 \cdot 12,8 + 7 = 32,6 \text{ mm}$$

$$y_o = e - t/2 = 12,8 - 5/2 = 10,3 \text{ mm}.$$

$$x_o = 0$$

$$f_y = 210 \text{ Mpa}.$$

$$k = 1 \text{ (sendi-sendi)}$$

$$Lk = k \cdot L = 1 \cdot 2500 \text{ mm} = 2500 \text{ mm}.$$

Evaluasi :

a). **Pemeriksaan tekuk lokal.**

- Sayap (*flens*),

$$\frac{b}{t} = \frac{45}{5} = 9$$

$$\frac{200}{\sqrt{f_y}} = \frac{200}{\sqrt{210}} = 13,8$$

$$\frac{b}{t} < \frac{200}{\sqrt{f_y}} \text{ (penampang kompak).}$$

b). **Pemeriksaan Terhadap Kekuatan Nominal Terfaktor.**

- Terhadap sumbu X-X (sumbu bahan).

$$\lambda_x = \frac{Lk_x}{r_x} = \frac{2500}{13,5} = 185,2 < 200 \text{ (memenuhi).}$$

$$\lambda_{cx} = \frac{1}{\pi} (\lambda_x) \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{3,14} \cdot (185,2) \cdot \sqrt{\frac{210}{200000}} = 1,91$$

Syarat,

$$\text{untuk } \lambda_c \leq 0,25 \quad \text{maka } \omega = 1$$

$$\text{untuk } 0,25 < \lambda_c < 1,2 \quad \text{maka } \omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67\lambda_c}$$

$$\text{untuk } \lambda_c \geq 1,2 \quad \text{maka } \omega = 1,25\lambda_c^2$$

Maka,

$$\omega_x = 1,25\lambda_c^2 = 1,25 \cdot (1,91)^2 = 4,56$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = (860 \text{ mm}^2) \cdot \frac{210 \text{ MPa}}{4,56} = 39605 \text{ N}$$

Maka, kekuatan nominal terfaktor pada arah sumbu X-X,

$$\phi N_n < \phi N_n = (0,85) \cdot 39605 \text{ N} = 33664 \text{ N} = 33,7 \text{ kN} = 3,37 \text{ ton}.$$

- Terhadap sumbu Y-Y (sumbu bebas bahan).

$$I_{y_{\text{total}}} = 2 \cdot \{I_y + A \cdot (\frac{1}{2}a)^2\} = 2 \cdot \{78300 + 430 \cdot (0,5 \cdot 32,6)^2\} = 385093,4 \text{ mm}^4.$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_{y_{\text{total}}}}{A_g}} = \sqrt{\frac{385093,4}{860}} = 21,16 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{r_y} = \frac{2500}{21,16} = 118,1 < 200 \text{ (memenuhi).}$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \lambda_1^2}$$

dimana,

$$m = 2 ; \lambda_1 = \frac{L_{ky}/n}{r_{\min}} \leq 50 ; L_1 = L_{ky}/n ; L_k = 2500 \text{ mm} ;$$

$$r_{\min} = i\eta = 8,7 \text{ mm}$$

Tabel mencari jumlah medan dengan “Trial & Error”

n	L1 (mm)	λ_1	≤ 50
3	833,3	95.8	> 50
5	500,0	57.5	> 50
7	357,1	41.1	< 50

$$\lambda_{iy} = \sqrt{(118,1)^2 + \frac{2}{2}(41,1)^2} = 125,0 < 200 \text{ (memenuhi).}$$

$$\lambda_{ciy} = \frac{1}{\pi} (\lambda_{iy}) \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{3,14} \cdot (125,0) \cdot \sqrt{\frac{210}{200000}} = 1,29 > 1,2$$

Maka,

$$\omega_{iy} = 1,25\lambda_c^2 = 1,25 \cdot (1,29)^2 = 2,08$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_{iy}} = (860 \text{ mm}^2) \cdot \frac{210 \text{ MPa}}{2,08} = 86826,9 \text{ N}$$

Maka, kekuatan nominal terfaktor pada arah sumbu Y-Y,

$$N_u < \phi_n \cdot N_n = (0,85) \cdot 86826,9 \text{ N} = 73802,9 \text{ N} = 73,8 \text{ kN} = 7,38 \text{ ton}.$$

- Terhadap lentur torsi.

Tegangan kritis tekuk lentur torsi.

$$f_{clt} = \left(\frac{f_{cry} + f_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 f_{cry} \cdot f_{crz} \cdot H}{(f_{cry} + f_{crz})^2}} \right]$$

Dimana,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{200.000 \text{ MPa}}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 76923 \text{ Mpa}.$$

$$d' = d - t/2 = 45 - 5/2 = 42,5 \text{ mm}$$

$$b' = b - t/2 = 45 - 5/2 = 42,5 \text{ mm}$$

$$J = (2) \cdot \frac{(d' + b') \cdot t^3}{3} = (2) \cdot \frac{(42,5 + 42,5) \cdot (5)^3}{3} = 7083,33 \text{ mm}^4.$$

$$\bar{r}_o^2 = \frac{I_x + I_y}{A_g} + x_o^2 + y_o^2 = \frac{2 \cdot (78300)}{860} + 0^2 + (10,3)^2 = 288,18 \text{ mm}^2.$$

$$H = 1 - \left(\frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{r}_o^2} \right) = 1 - \left(\frac{0^2 + (10,3)^2}{288,18} \right) = 0.631862$$

$$f_{crz} = \frac{G \cdot J}{A_g \cdot \bar{r}_o^2} = \frac{(76923) \cdot (7083,33)}{(860) \cdot (288,18)} = 2198,5 \text{ Mpa}.$$

$$f_{cry} = \frac{f_y}{\omega_{iy}} = \frac{210}{2,08} = 100,96 \text{ Mpa}.$$

Maka,

$$f_{clt} = \left(\frac{(100,96) + 2198,5}{2 \cdot (0,631862)} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot (100,96) \cdot (2198,5) \cdot (0,631862)}{(100,96 + 2198,5)^2}} \right]$$

$$f_{clt} = 99,23 \text{ MPa}$$

$$N_{nlt} = A_g \cdot f_{clt} = (860 \text{ mm}) \cdot (99,23 \text{ Mpa}) = 85337,8 \text{ N}$$

Maka, kekuatan nominal terfaktor lentur torsi,

$$N_u < \phi_n \cdot N_{nlt} = (0,85) \cdot 85337,8 \text{ N} = 72537 \text{ N} = 72,5 \text{ kN} = 7,2 \text{ ton}.$$

KESIMPULAN : Yang menentukan adalah tinjauan terhadap tekuk ke arah sumbu X-X. dengan kekuatan nominal terfaktor $N_u < 33,7 \text{ kN}$ atau $N_u < 3,37 \text{ ton}$.

c). Pemeriksaan Terhadap Kestabilan Profil Tersusun.

Pasal 9.3.(6) SNI 03-1729-2002 menyatakan, untuk menjaga kestabilan elemen-elemen penampang komponen struktur tersusun maka harga-harga λ_x dan λ_{iy} harus memenuhi :

$$\lambda_x \geq 1,2 \lambda_1$$

$$185,2 > 1,2 \cdot (41,1)$$

$$185,2 > 49,3 \text{ (memenuhi, stabil ke arah sumbu X-X)}$$

$$\lambda_{iy} \geq 1,2 \lambda_1$$

$$125,0 > 49,3 \text{ (memenuhi, stabil ke arah sumbu Y-Y)}$$

$$\lambda_1 = 41,1 \leq 50 \text{ (memenuhi)}$$

d). Pemeriksaan Terhadap Ukuran Pelat Koppel.

SNI 03-1729-2002 pasal 9.3 menyatakan bahwa kelangsingan terhadap sumbu bebas bahan λ_{iy} hanya berlaku apabila,

$$\frac{I_p}{a} \geq 10 \cdot \frac{I_1}{L_1}$$

Dimana,

$$I_p = 1/12 t \cdot h^3, \text{ dengan tebal koppel, } t = 5 \text{ mm, tinggi } h = 60 \text{ mm.}$$

$$I_p = 1/12 \cdot (5) \cdot (60)^3 = 90000 \text{ mm}^4.$$

$$I_1 = I_{\min} = I_{\eta} = 32500 \text{ mm}^4 \text{ (momen inerti minimum batang tunggal).}$$

$$L_1 = 357,1 \text{ mm.}$$

$$a = 32,6 \text{ mm}$$

Maka,

$$\frac{90000}{32,6} \geq 10 \cdot \frac{32500}{357,1}$$

$$2760,7 > 910,1$$

Pelat koppel ukuran $\square 60 \times 5$ mm telah memenuhi syarat.

CONTOH SOAL : PERENCANAAN

Suatu batang tekan dari rangka atap menggunakan profil siku ganda dengan panjang batang $L = 3,0$ meter, dimana ujung-ujungnya dianggap sendi-sendi, memikul beban terfaktor terdiri dari beban mati $D = 30$ kN, beban hidup atap $La = 15$ kN, dan beban angin $W = 10$ kN. Profil siku ganda memakai pelat koppel dengan tebal $tp = 5$ mm. Tebal pelat buhul (jarak antara kedua sayap) $\delta = 10$ mm. Mutu baja BJ-34. Rencanakanlah dimensi profil, dan lakukan pemeriksaan terhadap kinerja batang tekan tersebut.

PERENCANAAN :

a). **Kombinasi Pembebanan** (SNI 03-1729-2002, fs 6.2.2) .

a1). $1,4 D = 1,4 \cdot (30 \text{ kN}) = 42 \text{ kN}$.

a2). ~~$1,2 D + 1,6 L + 0,5 (La \text{ atau } H) = 1,2 \cdot (30 \text{ kN}) + 0,5 \cdot (15 \text{ kN}) = 43,5 \text{ kN}$~~ .

a3). $1,2 D + 1,6 (La \text{ atau } H) + (\gamma_L L \text{ atau } 0,8 W) = 1,2 \cdot (30 \text{ kN}) + 1,6 \cdot (15 \text{ kN}) + 0,8 \cdot (10 \text{ kN}) = 68 \text{ kN}$.

a4). ~~$1,2 D + 1,3 W + \gamma_L L + 0,5 (La \text{ atau } H) = 1,2 \cdot (30 \text{ kN}) + 1,3 \cdot (10 \text{ kN}) + 0,5 \cdot (15 \text{ kN}) = 56,5 \text{ kN}$~~ .

a5). ~~$1,2 D \pm 1,0 E + \gamma_L L$~~ .

a6). $0,9 D \pm (1,3 W \text{ atau } 1,0 E) = 0,9 \cdot (30 \text{ kN}) + 1,3 \cdot (10 \text{ kN}) = 40 \text{ kN}$.

Yang paling menentukan adalah kombinasi a3) dengan $N_u = 68$ kN.

b). **Perencanaan Dimensi Profil.**

Dalam perencanaan ini gunakan rumus seperti berikut untuk mengestimasi besar momen inertia yang diperlukan,

$$I_x \geq (1,5) \cdot \frac{P_{cr} \cdot L_k^2}{\pi^2 E} \quad (\text{rumus ini masih percobaan})$$

Dimana,

I_x = besar momen inertia yang di estimasi, $P_{cr} = N_u = 68000$ N, $L_k = 3000$ mm, maka,

$$I_x \geq (1,5) \cdot \frac{P_{cr} \cdot L_k^2}{\pi^2 E} = (1,5) \cdot \frac{(68000) \cdot (3000)^2}{(3,14)^2 \cdot (200000)} = 465536,1 \text{ mm}^4$$

Atau, $I_x = 46,6 \text{ cm}^4$ (untuk 2 profil)

Rencanakan profil, $\angle 60.60.8$

Data-data :

$$I_x = I_y = 291000 \text{ mm}^4.$$

$$i_x = i_y = r_x = r_y = 18,0 \text{ mm}.$$

$$I_{\eta} = 121000 \text{ mm}^4.$$

$$i_{\eta} = 11,6 \text{ mm}.$$

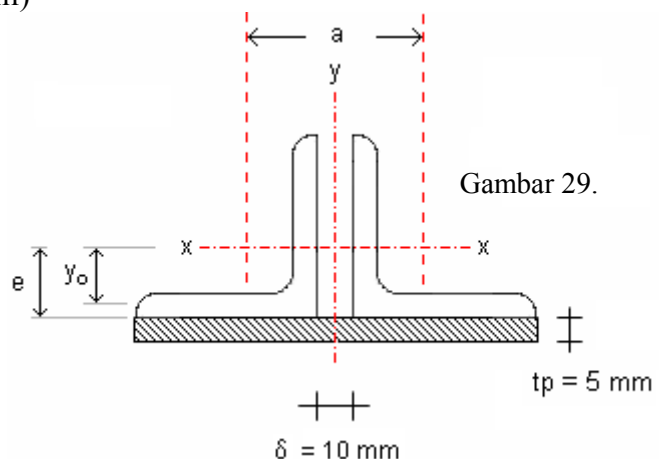
$$A = 903 \text{ mm}^2.$$

$$A_g = 2 \cdot 903 \text{ mm}^2 = 1806 \text{ mm}^2.$$

$$e = 17,7 \text{ mm}.$$

$$a = 2e + \delta = 2 \cdot 17,7 + 10 = 45,4 \text{ mm}.$$

$$y_o = e - t/2 = 17,7 - 8/2 = 13,7 \text{ mm}.$$



$$x_o = 0$$

$$f_y = 210 \text{ Mpa.}$$

$$k = 1 \text{ (sendi-sendu)}$$

$$L_k = k \cdot L = 1 \cdot 3000 \text{ mm} = 3000 \text{ mm.}$$

c). **Pemeriksanaan tekuk lokal.**

- Sayap (*flens*),

$$\frac{b}{t} = \frac{60}{8} = 7,5$$

$$\frac{200}{\sqrt{f_y}} = \frac{200}{\sqrt{210}} = 13,8$$

$$\frac{b}{t} < \frac{200}{\sqrt{f_y}} \text{ (penampang kompak).}$$

d). **Pemeriksaan Terhadap Kekuatan Nominal Terfaktor.**

- **Terhadap sumbu X-X (sumbu bahan).**

$$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{r_x} = \frac{3000}{18,0} = 166,7 < 200 \text{ (memenuhi).}$$

$$\lambda_{cx} = \frac{1}{\pi} (\lambda_x) \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{3,14} \cdot (166,7) \cdot \sqrt{\frac{210}{200000}} = 1,72$$

Syarat,

$$\text{untuk } \lambda_c \leq 0,25 \quad \text{maka } \omega = 1$$

$$\text{untuk } 0,25 < \lambda_c < 1,2 \quad \text{maka } \omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67\lambda_c}$$

$$\text{untuk } \lambda_c \geq 1,2 \quad \text{maka } \omega = 1,25\lambda_c^2$$

Maka,

$$\omega_x = 1,25\lambda_c^2 = 1,25 \cdot (1,72)^2 = 3,698$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = (1806 \text{ mm}^2) \cdot \frac{210 \text{ MPa}}{3,698} = 102565,1 \text{ N}$$

Maka, kekuatan nominal terfaktor pada arah sumbu X-X,

$$N_u < \phi_n \cdot N_n = (0,85) \cdot 102565,1 \text{ N} = 87180,3 \text{ N} = 87,2 \text{ kN} > 68 \text{ kN.} \\ \text{(memenuhi).}$$

Atau,

$$\frac{\bar{N}_u}{N_u} = \frac{87,2 \text{ kN}}{68 \text{ kN}} = 1,28 > 1 \text{ (memenuhi).}$$

- **Terhadap sumbu Y-Y (sumbu bebas bahan).**

$$I_{y_{total}} = 2 \cdot \{I_y + A \cdot (\frac{1}{2}a)^2\} = 2 \cdot \{291000 + 903 \cdot (0,5 \cdot 45,4)^2\} \\ = 1512613,7 \text{ mm}^4.$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_{y_{\text{total}}}}{A_g}} = \sqrt{\frac{1512613,7}{1806}} = 28,9 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{r_y} = \frac{3000}{28,9} = 103,7 < 200 \text{ (memenuhi).}$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \lambda_1^2}$$

dimana,

$$m = 2 ; \lambda_1 = \frac{L_{ky/n}}{r_{\min}} \leq 50 ; L1 = L_{ky/n} ; Lk = 3000 \text{ mm} ;$$

$$r_{\min} = i\eta = 11,6 \text{ mm}$$

Tabel mencari jumlah medan dengan “Trial & Error”

n	L1 (mm)	λ_1	≤ 50
3	1000,0	86,2	> 50
5	600,0	51,7	> 50
7	428,6	36,9	< 50

$$\lambda_{iy} = \sqrt{(103,7)^2 + \frac{2}{2} (36,9)^2} = 110,0 < 200 \text{ (memenuhi).}$$

$$\lambda_{ciy} = \frac{1}{\pi} (\lambda_{iy}) \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{3,14} \cdot (110,0) \cdot \sqrt{\frac{210}{200000}} = 1,14 < 1,2$$

Maka,

$$\omega_{iy} = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \cdot (1,14)} = 1,704$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_{iy}} = (1806 \text{ mm}^2) \cdot \frac{210 \text{ MPa}}{1,704} = 222545,4 \text{ N}$$

Maka, kekuatan nominal terfaktor pada arah sumbu Y-Y,

$$\phi N_u < \phi N_n = (0,85) \cdot 222545,4 \text{ N} = 189163,6 \text{ N} = 189,2 \text{ kN} > 68 \text{ kN.}$$

(memenuhi)

Atau,

$$\frac{\bar{N}_u}{N_u} = \frac{189,2 \text{ kN}}{68 \text{ kN}} = 2,78 > 1 \text{ (memenuhi).}$$

- Terhadap lentur torsi.

Tegangan kritis tekuk lentur torsi.

$$f_{clt} = \left(\frac{f_{cry} + f_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 f_{cry} \cdot f_{crz} \cdot H}{(f_{cry} + f_{crz})^2}} \right]$$

Dimana,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{200.000 \text{ MPa}}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 76923 \text{ Mpa.}$$

$$d' = d - t/2 = 60 - 8/2 = 56,0 \text{ mm}$$

$$b' = b - t/2 = 60 - 8/2 = 56,0 \text{ mm}$$

$$J = (2) \cdot \frac{(d' + b') \cdot t^3}{3} = (2) \cdot \frac{(56 + 56) \cdot (8)^3}{3} = 38229,3 \text{ mm}^4.$$

$$\bar{r}_o^2 = \frac{I_x + I_y}{A_g} + x_o^2 + y_o^2 = \frac{2 \cdot (291000)}{1806} + 0^2 + (13,7)^2 = 509,95 \text{ mm}^2.$$

$$H = 1 - \left(\frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{r}_o^2} \right) = 1 - \left(\frac{0^2 + (13,7)^2}{509,95} \right) = 0.63194$$

$$f_{crz} = \frac{G \cdot J}{A_g \cdot \bar{r}_o^2} = \frac{(76923) \cdot (38229,3)}{(1806) \cdot (509,95)} = 3193,07 \text{ Mpa.}$$

$$f_{cry} = \frac{f_y}{\omega_{iy}} = \frac{210}{1,704} = 123,23 \text{ Mpa.}$$

Maka,

$$f_{cft} = \left(\frac{(123,23) + 3193,07}{2 \cdot (0,63194)} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot (123,23) \cdot (3193,07) \cdot (0,63194)}{(123,23 + 3193,07)^2}} \right]$$

$$f_{cft} = 121,46 \text{ MPa}$$

$$N_{nlt} = A_g \cdot f_{cft} = (1806 \text{ mm}) \cdot (121,46 \text{ Mpa}) = 219353 \text{ N}$$

Maka, kekuatan nominal terfaktor lentur torsi,

$$N_{ult} < \phi_n \cdot N_{nlt} = (0,85) \cdot 219353 \text{ N} = 186450,1 \text{ N} = 186,5 \text{ kN} > 68 \text{ kN.}$$

(memenuhi).

Atau,

$$\frac{N_{ult}}{N_u} = \frac{186,5 \text{ kN}}{68 \text{ kN}} = 2,74 > 1 \text{ (memenuhi).}$$

KESIMPULAN : Profil, $\angle 60.60.8$ sanggup memikul gaya tekan terfaktor yang bekerja pada arah sumbu terlemah yaitu sumbu X-X dengan angka keamanan = 1,28.

e). Pemeriksaan Terhadap Kestabilan Profil Tersusun.

Pasal 9.3.(6) SNI 03-1729-2002 menyatakan, untuk menjaga kestabilan elemen-elemen penampang komponen struktur tersusun maka harga-harga λ_x dan λ_{iy} harus memenuhi :

$$\lambda_x \geq 1,2 \lambda_1$$

$$166,7 > 1,2 \cdot (36,9)$$

$166,7 > 44,3$ (memenuhi, stabil ke arah sumbu X-X)

$$\lambda_{iy} \geq 1,2 \lambda_1$$

$110,0 > 44,3$ (memenuhi, stabil ke arah sumbu Y-Y)

$$\lambda_1 = 36,9 \leq 50 \text{ (memenuhi)}$$

f). Perencanaan Ukuran Pelat Koppel Minimum.

SNI 03-1729-2002 pasal 9.3 menyatakan bahwa kelangsingan terhadap sumbu bebas bahan λ_{iy} hanya berlaku apabila,

$$\frac{I_p}{a} \geq 10 \cdot \frac{I_1}{L_1}, \text{ atau } I_p \geq (a) \cdot 10 \cdot \frac{I_1}{L_1}$$

Dimana,

$$I_p = 1/12 t \cdot h^3, \text{ dengan tebal koppel, } t = 5 \text{ mm.}$$

$$I_1 = I_{\min} = I_{\eta} = 121000 \text{ mm}^4 \text{ (momen inerti minimum batang tunggal).}$$

$$L_1 = 428,6 \text{ mm.}$$

$$a = 45,4 \text{ mm.}$$

Maka,

$$1/12 \cdot (5) \cdot h^3 \geq (45,4) \cdot 10 \cdot \left(\frac{121000}{428,6} \right) = 128170,8$$

$$h \geq \sqrt[3]{\frac{12 \cdot (128170,8)}{5}} = 67,5 \text{ mm}$$

Pakai pelat koppel ukuran $\square 70 \times 5 \text{ mm}$. Ukuran ini minimum, belum termasuk keperluan letak baut/paku.