

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. PENDAHULUAN**

*Cold formed steel* atau yang lebih akrab disebut baja ringan adalah baja yang dibentuk sedemikian rupa dari sebuah plat dalam keadaan dingin (dalam temperatur atmosfer) menjadi sebuah bentuk profil.

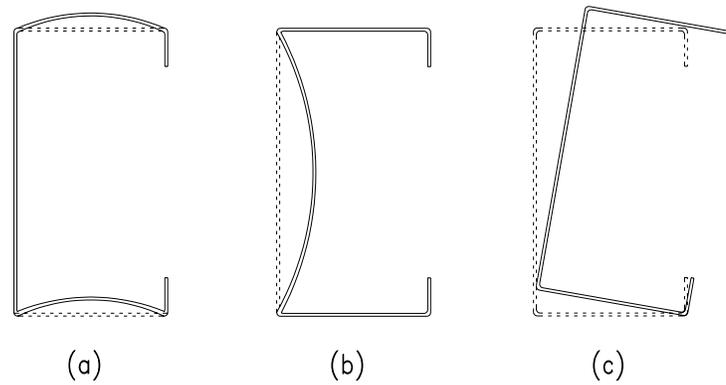
Desain rangka atap dengan material baja ringan pada dasarnya sama dengan desain rangka atap dengan material yang lain. Prinsip desain adalah pemilihan jenis profil yang memiliki kapasitas yang lebih besar dari gaya batang yang terjadi tanpa mengabaikan tingkat ekonomis dari struktur itu sendiri.

Untuk desain baja ringan, karena material ini terbentuk dari plat yang sangat tipis, ketebalannya berkisar antara 0.73 mm hingga 1 mm, hal ini berakibat pada perilaku material jika tertekan akan rentan terhadap tekuk dan bila tertarik akan sangat lemah pada bagian sambungan. Sehingga tinjauan utama desain adalah pemilihan profil yang memiliki kapasitas yang dapat mengakomodasi kelemahan tersebut.

#### **2.2. BATANG TEKAN**

Batang yang tertekan akan menyebabkan perilaku tekuk baik dari arah sumbu x penampang (*lateral buckling*), arah sumbu y (*lokal buckling*), maupun torsi (*torsional buckling*). Sehingga dalam analisa, profil yang didesain harus memiliki nilai kapasitas penampang yang lebih besar dari gaya yang terkecil penyebab ketiga tekuk tersebut. Apabila kapasitas penampang tidak memenuhi salah satu tekuk di atas, maka dapat ditambahkan elemen perkuatan yang dapat menaikkan kapasitas penampang pada sumbu lemahnya. Sehingga batang tersebut dapat menahan semua tekuk yang terjadi. Namun perlu diperhatikan bahwa efektifitas dan efisiensi dari penggunaan elemen perkuatan tersebut harus tetap dijaga. Sehingga

nilai *safety*, *serviceability* dan ekonomis struktur masih dapat dipertahankan.



Gambar 2.1. Perilaku Tekuk Penampang

- a) *Lateral Buckling*
- b) *Local Buckling*
- c) *Torsional Buckling*

Propertis penampang yang diperhitungkan dalam desain batang tekan adalah :

- Batasan kelangsingan elemen penampang.
- Desain lebar efektif
- Efektifitas elemen pengaku
- Luas penampang efektif
- Kapasitas batang tekan terhadap tekuk pada sumbu x
- Kapasitas batang tekan terhadap tekuk pada sumbu y
- Kapasitas batang tekan terhadap tekuk torsi

### 2.2.1. Batasan Kelangsingan Elemen Penampang

Akibat tipisnya plat penyusun profil baja ringan, maka dilakukan batasan terhadap nilai kelangsingan elemen baik badan maupun sayapnya. Berdasarkan *CSA – S136 – M89* terdapat tiga buah kasus dalam batasan kelangsingan elemen penampang ini yaitu :

1. Ketika  $W \leq W_{lim}$
2. Ketika  $W_{lim} < W$

di mana :

$$\text{Web, } W_w = \frac{h}{t}$$

$$\text{Flange, } W_f = \frac{b}{t}$$

$$W_{lim} = 0.644 \sqrt{\frac{kE}{f}}$$

di mana :

$E$  : modulus elastisitas baja ringan ( 203000 Mpa )

$f$  : nilai tegangan yang terjadi pada penampang (Mpa)

$F_y$  : tegangan leleh penampang (MPa)

$k$  : koefisien tekuk untuk elemen batang tertekan ( 4 )

$t$  : tebal elemen (mm)

$W$  : rasio lebar elemen

$W_w$  : rasio lebar badan

$W_f$  : rasio lebar sayap

$W_{lim}$  : batas nilai rasio lebar

$b$  : lebar sayap (mm)

$h$  : lebar badan (mm)

Untuk elemen tekan, nilai rasio lebar elemennya dibatasi harus lebih kecil dari 200, jika rasio lebar elemen lebih besar dari nilai tersebut, maka penampang menjadi tidak efektif.

$$W < 200$$

### 2.2.2. Desain Lebar Efektif

Ketika rasio lebar elemen melebihi batas rasio lebarnya, maka lebar elemen dapat digantikan dengan lebar efektif. Lebar efektif dapat ditentukan melalui perhitungan rasio lebar efektif, B.

berdasarkan *CSA – S136 – M89* rasio lebar efektif dapat ditentukan sebagai berikut :

Kondisi 1 :

$$W \leq W_{lim}$$

$$W_e = W$$

Kondisi 2 :

$$W \geq W_{lim}$$

$$W_e = 0,95\sqrt{kE/f} \left[ 1 - \frac{0,208}{W} \sqrt{kE/f} \right] \leq W$$

di mana :

$W_e$  : rasio lebar efektif elemen ( badan / sayap )

$E$  : modulus elastisitas baja ringan ( 203000 Mpa )

$f$  : nilai tegangan yang terjadi pada penampang (Mpa)

$F_y$  : tegangan leleh penampang (MPa)

$k$  : koefisien tekuk untuk elemen penampang tertekan ( 4 )

$t$  : tebal elemen (mm)

$W$  : rasio lebar elemen

$W_{lim}$  : batas nilai rasio lebar

### 2.2.3. Efektifitas Elemen Pengaku

Untuk elemen tekan dengan beberapa elemen pengaku, baik itu yang diperkuat di antara badan dengan dua atau lebih pengaku atau diperkuat di antara badan dan tepi pengaku dengan satu atau lebih pengaku. Pengaku dapat diabaikan jika nilai  $I_s \geq I_a$ , berikut ini formulasi berdasarkan *CSA – S136 – M89* :

$$I_a = \left( 4 \frac{h}{t} - 26 \right) t^4 \geq 18t^4$$

$$I_s = 5ht^3 \left[ \frac{h}{astiff} - 0.7 \left( \frac{h}{astiff} \right) \right] \geq \left( \frac{h}{50} \right)^4$$

di mana :

$a_{stiff}$  : jarak antar pengaku (mm)

$h$  : lebar elemen berpengaku (badan / sayap) (mm)

$I_a$  : momen inersia elemen yang dianggap berpengaku  
(sayap/badan) ( $\text{mm}^4$ )

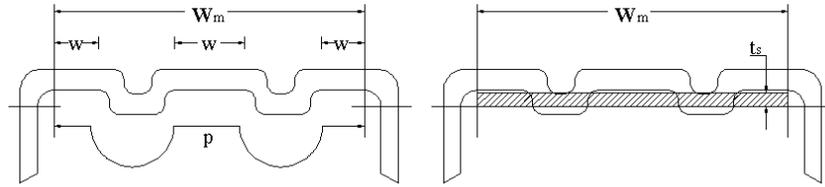
$I_s$  : momen inersia elemen yang berpengaku  
penuh ( $\text{mm}^4$ )

$t$  : tebal penampang (badan / sayap) (mm)

Hal – hal yang perlu diperhatikan :

1. Jika jarak antar pengaku pada elemen profil sedemikian rupa sehingga rasio lebar dari elemen pengaku lebih besar dari batas rasio lebarnya, maka hanya dua pengaku (yang terdekat dari tiap badan) yang diperhitungkan efektif.
2. Jika jarak antar pengaku dan tepi pengaku pada elemen badan sedemikian rupa sehingga menyebabkan rasio lebarnya lebih besar batas rasio lebarnya, maka hanya pengaku yang terdekat dari badan yang diperhitungkan efektif.
3. Jika jarak antar pengaku sangat dekat, sehingga rasio lebar, sehingga rasio lebar elemen profilnya tidak melebihi batas rasio lebarnya, maka semua pengaku dapat diperhitungkan lebar efektifnya.

Menurut CSA – S236 – M89 pengaku yang diperhitungkan secara efektif akan mempengaruhi asumsi tebal elemen profil yang memiliki elemen pengaku tersebut. Secara umum perhitungannya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2. Tebal Efektif Elemen dengan Pengaku

$$t_s = t \left[ \frac{w_m}{2p} + \sqrt{\frac{3I_{sf}}{pt^3}} \right]^{1/3}$$

di mana :

- $I_{sf}$  : momen inersia dari bagian luasan pengaku ( $\text{mm}^4$ )
- $p$  : panjang perimeter dari elemen beberapa pengaku, antar badan atau dari badan sampai sisi pengaku (mm)
- $t$  : tebal elemen penampang (mm)
- $t_s$  : asumsi tebal efektif elemen penampang akibat adanya elemen pengaku (mm)
- $w_m$  : lebar antar badan atau dari badan sampai sisi pengaku (mm)

#### 2.2.4. Luas Penampang Efektif

Luas penampang efektif adalah luasan penampang yang murni menahan gaya tekan yang terjadi tanpa mengalami leleh. Luas penampang efektif berbanding terbalik dengan gaya aksial tekan. Semakin besar gaya aksial tekan maka luas penampang efektif akan semakin kecil.

Perhitungan luas efektif penampang diperoleh dari penjumlahan luas efektif dari semua elemen profil, baik badan maupun sayap. Sedangkan luas efektif harus diperhatikan berdasarkan rasio lebar efektifnya yang diperhitungkan berdasarkan syarat – syarat rasio lebarnya. Sehingga luas efektif elemen adalah lebar efektif dikalikan dengan tebal efektif dari elemen tersebut.

$$A_e = \sum A_{ei}$$

$$A_{ei} = b_{eff} \cdot t_{eff}$$

di mana :

$A_e$  : luas efektif penampang ( $\text{mm}^2$ )

$A_{ei}$  : luas efektif elemen penampang ( $\text{mm}^2$ )

$b_{eff}$  : lebar efektif elemen penampang (mm)

$t_{eff}$  : tebal efektif elemen penampang (mm)

### 2.2.5. Kapasitas Batang Tekan terhadap Tekuk pada Sumbu x

Tekuk pada arah sumbu x disebabkan oleh elemen penampang pada arah sumbu x tidak dapat menahan gaya aksial yang terjadi. Berdasarkan *CSA – S136 – M89* formulasi untuk mencari nilai kapasitas tekuk pada sumbu x adalah sebagai berikut :

- $P_{load} < C_{rx}$
- $C_{rx} = \Phi_c \cdot A_e \cdot F_{ax}$
- jika  $F_{px} \leq \frac{F_y}{2}$ , maka  $F_{ax} = F_{px}$
- jika  $F_{px} < \frac{F_y}{2}$ , maka  $F_{ax} = F_y - \frac{F_y}{4F_{px}}$
- $F_{px} = 0.833F_{ex}$
- $F_{ex} = \frac{P_{xcr}}{A_e}$
- $P_{xcr} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K.Lx)^2}$

di mana :

$A_e$  : luas efektif penampang ( $\text{mm}^2$ )

$C_{rx}$  : kapasitas penampang terhadap tekuk arah sumbu x ( N )

$E$  : modulus elastisitas ( 203000 MPa )

$F_{ax}$  : tegangan batas tekan arah sumbu x pada pra pembebanan ( MPa )

- $F_{ex}$  : tegangan tekuk elastis akibat terjadi  $P_{xcr}$  ( MPa )
- $F_{px}$  : tegangan kritis tekuk elastis arah sumbu x ( MPa )
- $F_y$  : tegangan leleh ( MPa )
- $I_x$  : momen inersia terhadap sumbu x ( mm<sup>4</sup> )
- $K$  : faktor tekuk ( tergantung dari jenis tumpuan )
- $L_x$  : panjang batang yang sejajar sumbu x ( mm )
- $P_{load}$  : gaya aksial nominal yang terjadi pada struktur ( N )
- $P_{xcr}$  : gaya kritis yang menyebabkan tekuk arah sumbu x ( N )
- $\Phi_c$  : faktor reduksi tekan aksial ( 0.9 )

#### 2.2.6. Kapasitas Batang Tekan terhadap Tekuk pada Sumbu y

Tekuk pada arah sumbu y disebabkan oleh elemen penampang pada arah sumbu y tidak dapat menahan gaya aksial yang terjadi, sedangkan formulasi perhitungan berdasarkan *CSA – S136 – M89* adalah sebagai berikut :

- $P_{load} < C_{ry}$
- $C_{ry} = \Phi_c \cdot A_e \cdot F_{ay}$
- jika  $F_{py} \leq \frac{F_y}{2}$ , maka  $F_{ay} = F_{py}$
- jika  $F_{py} < \frac{F_y}{2}$ , maka  $F_{ay} = F_y - \frac{F_y}{4F_{py}}$
- $F_{py} = 0.833F_{ey}$
- $F_{ey} = \frac{P_{ycr}}{A_e}$
- $P_{ycr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K \cdot L_y)^2}$

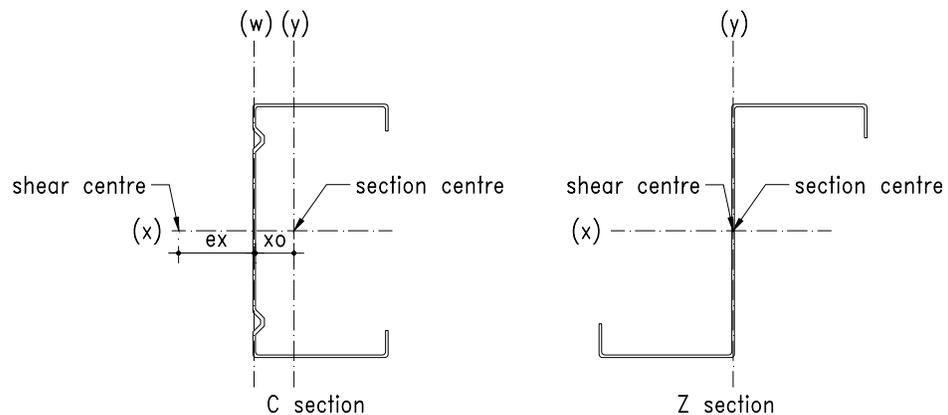
di mana :

- $A_e$  : luas efektif penampang ( mm<sup>2</sup> )
- $C_{ry}$  : kapasitas penampang terhadap tekuk arah sumbu y ( N )
- $E$  : modulus elastisitas ( 203000 MPa )

- $F_{ay}$  : tegangan batas tekan arah sumbu y pada pra pembebanan ( MPa )
- $F_{ey}$  : tegangan tekuk elastis akibat terjadi  $P_{ycr}$  ( MPa )
- $F_{py}$  : tegangan kritis tekuk elastis arah sumbu y ( MPa )
- $F_y$  : tegangan leleh ( MPa )
- $I_y$  : momen inersia terhadap sumbu y ( mm<sup>4</sup> )
- $K$  : faktor tekuk ( tergantung dari jenis tumpuan )
- $L_y$  : panjang batang yang sejajar sumbu y ( mm )
- $P_{load}$  : gaya aksial nominal yang terjadi pada struktur ( N )
- $P_{ycr}$  : gaya kritis yang menyebabkan tekuk arah sumbu y ( N )
- $\Phi_c$  : faktor reduksi tekan aksial ( 0.9 )

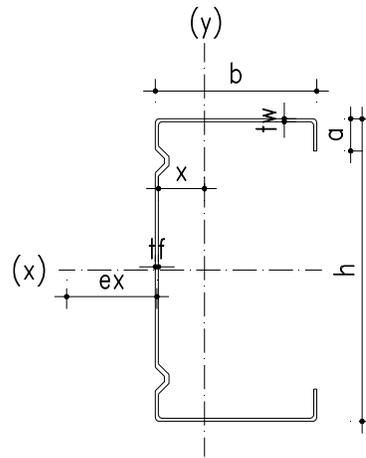
### 2.2.7. Kapasitas Batang Tekan terhadap Tekuk Torsi

Tekuk torsi atau *Lateral torsional buckling* disebabkan oleh rotasi penampang terhadap sumbu z. Hal ini terjadi karena *warping torsion* yang menyebabkan terjadi momen torsi. *Warping torsion* adalah perpindahan sayap arah ke samping, sayap yang tertekan membengkok ke arah lateral dan sayap yang tertarik membengkok ke arah yang lain. Prinsip analisis kapasitas tekuk torsi akan menghasilkan nilai desain yang maksimal jika beban dianggap bekerja pada titik pusat gesernya ( *shear center* ) sehingga tekuk yang terjadi adalah torsi murni.



Gambar 2.3. Posisi *Shear Center* Profil C dan Z

Untuk jenis *single simetric section* seperti profil C, letak titik pusat geser tidak berimpit pada titik pusat penampang. perhitungan letak titik pusat geser sendiri berbeda untuk tiap jenis profil, untuk profil C perhitungannya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4. Properties Perhitungan *Shear Center* Profil C

$$ex = \frac{h^2}{4} \frac{xo}{rx^2}$$

$$rx = \sqrt{\frac{Ix}{Ae}}$$

di mana :

- $h$  : lebar elemen badan (mm)
- $rx$  : jari – jari girasi arah sumbu x (mm)
- $ex$  : jarak shear center terhadap as elemen badan (mm)
- $xo$  : jarak titik berat searah sumbu x (mm)

Formulasi perhitungan kapasitas tekuk torsi berdasarkan *CSA – S136 – M89* adalah sebagai berikut :

- $P_{load} < C_{rz}$
- $C_{rz} = \Phi c . A_e . F_{az}$
- jika  $F_{pz} \leq \frac{F_y}{2}$ , maka  $F_{az} = F_{pz}$

- jika  $F_{pz} < \frac{F_y}{2}$ , maka  $F_{az} = F_y - \frac{F_y}{4F_{pz}}$
- $F_{pz} = 0.833F_{st}$
- $F_{st} = \frac{1}{2\beta} \left[ F_z + F_{ex} - \sqrt{(F_z + F_{ex})^2 - 4\beta F_z \cdot F_{ex}} \right]$
- $F_z = \frac{P_z}{A_e}$
- $P_z = \frac{1}{(r_o)^2} \left[ GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KLz)^2} \right]$
- $\beta = 1 - \left( \frac{x_o}{r_o} \right)^2$
- $r_o = \sqrt{\frac{I_{ps}}{A}}$
- $x = ex + x_o$
- $I_{ps} = I_x + I_y + A \cdot x_o^2$
- $J = \sum \frac{1}{3} bt^3$
- $C_w = \frac{I_y h^2}{4}$  .....( profil Z )
- $C_w = \frac{d^2}{4} (I_w - x_o \cdot ex \cdot A)$  .....( profil C )
- $I_w = I_y + A \cdot x^2$

di mana :

$A_e$  : luas efektif penampang profil ( $\text{mm}^2$ )

$A$  : luas penampang profil ( $\text{mm}^2$ )

$Crz$  : kapasitas penampang terhadap tekuk torsi ( N )

$C_w$  : konstanta *warping torsion* ( $\text{mm}^6$ )

$E$  : modulus elastisitas ( 203000 MPa )

$e_o$  : jarak *shear center* terhadap as badan (mm)

- $F_{az}$  : tegangan batas tekan arah sumbu torsi pada pra pembebanan ( MPa )
- $F_{pz}$  : tegangan kritis tekuk elastis arah sumbu torsi ( MPa )
- $F_{st}$  : tegangan kritis tekuk torsi ( MPa )
- $F_y$  : tegangan leleh ( MPa )
- $F_z$  : tegangan tekuk elastis arah aksis pada penampang sumbu simetri tunggal ( MPa )
- $G$  : modulus geser ( MPa )
- $I_{ps}$  : inersia gabungan terhadap *shear center* (mm<sup>4</sup>)
- $I_w$  : inersia terhadap sumbu y eksentris terhadap as badan (mm<sup>4</sup>)
- $I_x$  : momen inersia terhadap sumbu x (mm<sup>4</sup>)
- $I_y$  : momen inersia terhadap sumbu y (mm<sup>4</sup>)
- $J$  : inersia torsi (mm<sup>4</sup>)
- $K$  : faktor tekuk ( tergantung dari jenis tumpuan )
- $L_z$  : panjang batang yang sejajar sumbu torsi ( mm )
- $P_{load}$  : gaya aksial nominal yang terjadi pada struktur ( N )
- $P_z$  : gaya kritis yang menyebabkan tekuk arah sumbu z ( N )
- $x_o$  : jarak pusat penampang terhadap as badan (mm)
- $x$  : jarak titik berat menuju *shear center* (mm)
- $\Phi_c$  : faktor reduksi tekan aksial ( 0.9 )

### 2.3. BATANG TARIK

Pada batang tarik kapasitas penampang hanya dipengaruhi oleh luas penampang. Pada struktur atap, jika penyambungan antar batang digunakan baut, maka luasan penampang harus diperhitungkan terhadap perlemahan akibat lubang bautnya. Sehingga luasan penampang yang dipakai adalah luasan penampang *netto*.

Pada batang tarik dapat juga terjadi lendutan, lendutan tersebut tidak berpengaruh secara struktural, karena batang tersebut sebenarnya aman. Namun dari segi *non* - struktural maupun stabilitas batang tersebut tidak

memenuhi syarat *serviceability*. Agar struktur menjadi aman dan nyaman maka keseluruhan syarat tersebut harus dipenuhi.

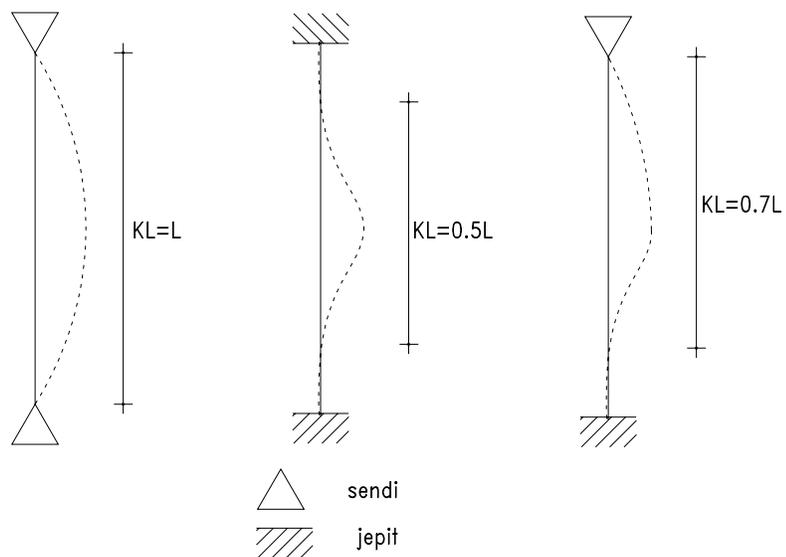
Propertis penampang yang diperhitungkan dalam desain batang tekan adalah :

- Kelangsingan batang tarik
- Luas penampang *netto*
- Kapasitas penampang tarik

### 2.3.1. Kelangsingan Batang Tarik

Inti dari perhitungan ini adalah untuk memberi batasan kelangsingan batang. Batang yang terlalu langsing akan mudah mengalami lendutan pada saat pemasangannya, begitu pula batang yang terlalu panjang juga akan mengalami lendutan akibat berat sendirinya.

Secara struktural kelangsingan batang tidak berpengaruh secara struktural, karena kapasitas penampang tarik hanya ditentukan oleh luas tampangnya. Kelangsingan batang hanya berpengaruh pada stabilitas dan *serviceability*nya.



Gambar 2.5. Panjang Tekuk

$$\lambda = \frac{KL}{r} < 300$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

di mana :

$I$  : momen inersia sumbu lemah penampang ( $\text{mm}^4$ )

$A$  : luas penampang profil ( $\text{mm}^2$ )

$K$  : faktor tekuk, tergantung dari perletakan ujung batang

$L$  : panjang batang (mm)

$r$  : jari – jari kelembaman sumbu lemah penampang (mm)

$\lambda$  : koefisien kelangsingan

### 2.3.2. Luas Penampang *Netto*

Luas penampang *netto* adalah luasan penampang awal dikurangi dengan luas perlemahan penampang akibat lubang baut. Hal ini harus diperhitungkan karena perlemahan akan menyebabkan kapasitas penampang pada ujung batang yang disambung berkurang banyak.

$$A_n = A - n(db)(t)$$

di mana :

$A$  : luas *brutto* penampang profil ( $\text{mm}^2$ )

$A_n$  : luas *netto* penampang profil ( $\text{mm}^2$ )

$db$  : diameter baut ( mm )

$n$  : jumlah baut

$t$  : tebal plat profil ( mm )

### 2.3.3. Kapasitas Penampang Tarik

Kapasitas penampang tarik pada *cold formed steel* dapat diperhitungkan dalam dua kondisi, di mana :

1. Kondisi di mana penampang mencapai tegangan leleh ( $F_y$ )

Pada saat penampang mencapai tegangan leleh, maka nilai kapasitas dipengaruhi oleh luasan penampang ( $A$ ). Formulasi perhitungan kapasitas tekuk torsi berdasarkan *CSA – S136 – M89* adalah sebagai berikut :

$$T_{r1} = \frac{\Phi_{ty} \cdot F_y}{\frac{1}{A} + \frac{e}{S_t}}$$

$$S_t = \frac{I_y}{x_o}$$

di mana :

$A$  : luas penampang profil ( $\text{mm}^2$ )

$e$  : nilai eksentrisitas terhadap pusat penampang (mm)

$F_y$  : tegangan leleh penampang (MPa)

$I_y$  : inersia sumbu y ( $\text{mm}^3$ )

$S_t$  : modulus penampang tarik bruto ( $\text{mm}^3$ )

$T_{r1}$  : kapasitas tarik pada kondisi leleh (N)

$x_o$  : jarak titik berat penampang terhadap sumbu y (mm)

$\Phi_{ty}$  : faktor tegangan leleh (0.9)

2. Kondisi di mana penampang mencapai tegangan ultimate ( $F_u$ )

Pada saat penampang mencapai tegangan leleh, maka nilai kapasitas dipengaruhi oleh luasan *netto* penampang ( $A_n$ ). Formulasi perhitungan kapasitas tekuk torsi berdasarkan *CSA – S136 – M89* adalah sebagai berikut :

$$T_{r2} = \frac{(\Phi_{tu})F_u}{\frac{1}{A_n} + \frac{e}{S_m}}$$

$$S_{tn} = \frac{I_{yn}}{x_o}$$

$$I_{yn} = I_y - n.d.t.x_o^2$$

di mana :

$A_n$  : luas *netto* penampang ( mm<sup>2</sup> )

$d$  : diameter baut ( mm )

$F_u$  : tegangan batas penampang ( MPa )

$I_y$  : inersia penampang *brutto* arah y ( mm<sup>4</sup> )

$I_{yn}$  : inersia penampang bersih arah y ( mm<sup>4</sup> )

$n$  : jumlah baut

$S_m$  : modulus penampang tarik *netto* ( mm<sup>3</sup> )

$t$  : tebal plat ( mm )

$T_{r2}$  : kapasitas tarik pada kondisi ultimate ( N )

$x_o$  : jarak pusat berat penampang tegak lurus terhadap elemen berlubang (mm)

$\Phi_{tu}$  : faktor tarik pada tegangan batas (0.75)