

EVALUASI TORSIONAL PROPERTIES ELEMEN STRUKTUR TEKAN DENGAN BERBAGAI BENTUK DAN UKURAN PROFIL BAJA

Almerinda Regina Puspa Sari Damanik

Program Studi D3 Teknik Sipil Politeknik Negeri Medan, Medan, Sumatra Utara, Indonesia

Email: almerindareginapuspasaridamanik@polmed.ac.id

ABSTRAK

Analisis struktur baja harus dilakukan untuk menghindari keruntuhan struktur ketika menahan beban luar, dengan memeriksa batasan nilai kapasitas struktur. Kolom baja adalah elemen struktur utama yang berperan menahan gaya aksial tekan yang kapasitasnya dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk profil baja. Gaya aksial tekan yang besar dapat menyebabkan kolom baja mengalami tekuk. Fenomena tekuk dapat menyebabkan kolom baja berputar dan terpilin terhadap sumbu memanjang atau poros penampang, peristiwa ini disebut tekuk torsi. Oleh karena itu, perlu ditentukan seberapa besar pengaruh bentuk dan ukuran penampang terhadap kapasitas kolom baja dalam menahan tekuk torsi berdasarkan *torsional properties*-nya. Hal ini dilakukan dengan tinjauan literatur berbagai ukuran dan bentuk standar dari profil baja, menentukan informasi penampang seperti luas penampang. Analisis dilakukan dengan menghitung karakteristik torsi penampang, dan mengevaluasi pengaruh bentuk dan ukuran profil baja terhadap *torsional properties*-nya. Data dan hasil perhitungan dirangkum dalam tabel dan penentuan keterkaitannya disajikan dalam uraian hasil analisis dan evaluasi. Kajian ini menunjukkan bahwa bentuk penampang yang paling efektif untuk menahan tekuk torsi adalah penampang IWF dan Kanal, karena memiliki nilai konstanta torsi dan konstanta pilin yang besar, sedangkan penampang T dan Siku Tunggal hanya memiliki nilai konstanta torsi, tidak memiliki nilai konstanta pilin. Hal ini berpengaruh terhadap kapasitas penampang dalam perhitungan tegangan tekuk elastis torsi yang menahan tekuk torsi. Selain itu, dimensi pelat sayap, pelat badan, tebal pelat pembentuk profil yang lebih besar juga secara langsung mempengaruhi nilai konstanta torsi dan konstanta pilin.

Kata kunci: *Tekuk Torsi, Torsional Properties, Konstanta Torsi, Konstanta Pilin, Tegangan Tekuk Elastis Torsi*

EVALUATION OF TORSIONAL PROPERTIES OF COMPRESSIVE STRUCTURAL ELEMENTS WITH VARIOUS SHAPE AND SIZE OF STEEL PROFILES

ABSTRACT

Steel structure analysis must be carried out to avoid structural failure when supporting external loads, by checking the limits of the structural capacity. Steel columns are the main structural elements that resist axial compressive forces, whose capacity is depend on the size and shape of the steel profile. Large axial compressive forces can cause steel columns to bend or buckle. The buckling phenomenon can cause the steel column to rotate and twist about the longitudinal axis or cross-sectional axis, this called as torsional buckling. Therefore, it is necessary to evaluate how the shape and size of the cross section determine the capacity of the steel column to resist torsional buckling based on its torsional properties. The evaluation was carried out by examining various standard sizes and shapes of steel profiles, determining cross-section information such as cross-sectional area, calculating the torsional properties of the cross-section, and evaluating the effect of shape and size of steel profile on its torsional properties. The results of the data presentation and calculations are summarized in tables and the determination of their relationship is presented in the description of the analysis and evaluation results. The results show that the most effective cross-sectional shapes to resist torsional buckling are IWF and Channel cross-sections, due to the large values of torsional constants and twisting constants, while the T-section and Single Angle only have torsional constant values, but lack of twisting constant values. This affects the capacity of the cross section to resist the torsional buckling. In addition, the dimension of the flange, web, and the thickness of the larger profile also directly affect the values of the torsional constant and twisting constant.

Keywords: *Torsional Buckling, Torsional Properties, Torsional Constant, Warping Constant*

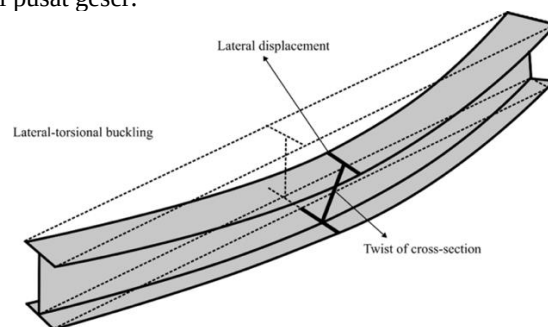
1 PENDAHULUAN

Struktur baja menjadi salah satu pilihan komponen struktur yang banyak difungsikan menjadi struktur kolom, balok, portal, rangka atap, rangka jembatan. Baja mampu memberikan bentang bebas yang panjang dan kolom yang tinggi untuk memberikan plafon yang tinggi, dengan kekuatan yang besar. Oleh karena itu, penggunaan struktur baja dapat memberikan efektivitas dan efisiensi yang tinggi. Namun, analisis struktur perlu dilakukan pada struktur baja dengan mengikuti persyaratan dan ketentuan berdasarkan spesifikasi penggunaan struktur baja untuk bangunan. Persyaratan struktur baja yang digunakan di Indonesia terbaru sesuai dengan SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja struktural yang mengacu ke peraturan internasional dari ANSI/AISC 360-16. Analisis struktur baja merupakan aspek fundamental untuk memeriksa keamanan struktur dan efisiensi perencanaan desain. Keamanan struktur perlu diperiksa terhadap batasan nilai kapasitas struktur sebelum mengalami keruntuhan. Efisiensi perencanaan desain dilakukan untuk memilih profil baja yang sesuai dengan peruntukan desainnya dalam memikul beban luar.

Salah satu struktur baja yang banyak difungsikan adalah struktur portal baja yang sangat kokoh dalam memikul beban luar yang besar. Struktur portal baja terdiri dari kombinasi balok-kolom yang disambung sehingga dapat bekerja memikul gaya bersama-sama. Setiawan (2008) menyebutkan jika kolom mengalami gaya aksial tekan yang bekerja lebih dominan, maka komponen struktur harus didesain menjadi komponen struktur tekan. Seberapa besar kekuatan kolom baja dalam memikul gaya aksial tekan dipengaruhi oleh mutu baja, faktor panjang kolom, bentuk profil penampang kolom, dan kondisi perletakan di kedua ujung kolom. Analisis dan desain kekuatan kolom baja sebagai komponen struktur yang memikul gaya aksial tekan murni diatur dalam SNI 1729:2020 bab E.

Menganalisis seluruh aspek struktur kolom baja dalam memikul gaya aksial tekan murni dengan detail sangat diperlukan untuk mencegah terjadinya keruntuhan yang berdampak sangat masif pada elemen struktur yang berada di sekelilingnya dan elemen lain yang terhubung dengannya. Salah satu keruntuhan akibat gaya aksial tekan murni adalah fenomena tekuk (*buckling*). Berdasarkan SNI 1729:2020 tabel E1.1 ada tiga peristiwa tekuk yang umum terjadi pada elemen struktur yang menahan gaya aksial tekan tanpa elemen langsing, yaitu tekuk lentur (*flexural buckling*, FB), tekuk torsi lentur (*flexural torsional buckling*, FTB), dan tekuk torsi (*torsional buckling*, TB) yang di-plotting sesuai bentuk penampang melintang profil.

Pada SNI 1729:2020 disebutkan fenomena tekuk adalah keadaan batas berupa perubahan geometri secara tiba-tiba pada struktur akibat kondisi beban kritis. Tekuk torsi (TB) adalah modus keruntuhan tekuk berupa puntir pada komponen struktur tekan terhadap sumbu pusat gesernya. Menurut Romano, G et al. (2012) pusat geser (*shear center*) adalah titik unik pada penampang profil baja, yang titiknya sama dengan pusat puntir (*twist center*). Untuk selanjutnya disebutkan sebagai pusat geser.



Gambar 1. Ilustrasi Peristiwa Tekuk Torsi pada Profil Baja IWF (Carvalho et.al, 2023)

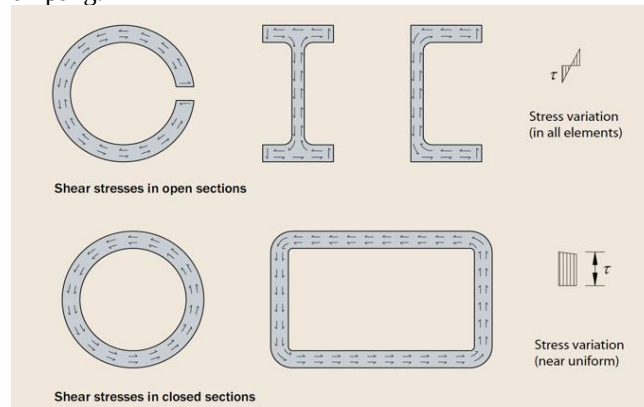
Carvalho et al. (2023) juga menyebutkan salah satu modus keruntuhan pada baja adalah *lateral torsional buckling* seperti ilustrasi dari gambar 1 yang dapat dilihat bahwa ketika elemen struktur mengalami tekuk torsi, penampang akan mengalami *lateral displacement* dan *twisting* pada penampang dengan besaran sudut tertentu. Sudut perpindahan ini disebut sudut rotasi torsi. Sudut rotasi torsi (*torsional angle*) adalah deformasi berbentuk sudut puntir atau sudut putar yang dibentuk struktur saat mengalami torsi diukur dari sumbu porosnya sebelum mengalami torsi. Artinya, sudut rotasi torsi dipengaruhi besarnya gaya puntiran yang terjadi, semakin besar sudut rotasi menandakan gaya puntiran yang terjadi juga semakin besar. Untuk menganalisis seberapa besar gaya puntiran yang dapat ditahan oleh elemen struktur, maka perlu dianalisis berapa besaran kapasitas tahanan torsi pada penampang dengan mengecek nominal *torsional properties* penampang. *Torsional properties* adalah kombinasi dari bentuk dan ukuran penampang profil baja yang berkontribusi dalam menahan tekuk torsi. Dari kombinasi ini selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung tahanan torsi yang dapat dipikul penampang. Kemudian ditentukan apakah ada hubungan dari ukuran dan bentuk terhadap besaran *torsional properties* penampang. Sehingga didapatkan gambaran dalam memilih ukuran dan bentuk profil baja yang sesuai dengan kebutuhan desain.

Tujuan dan manfaat dari jurnal ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis bentuk dan ukuran profil baja yang difungsikan sebagai elemen struktur tekan dan diukur dari besaran *torsional properties* penampang terhadap pengaruhnya dalam menahan tekuk torsi akibat gaya aksial tekan yang bekerja. Hasil evaluasi dan analisis

dapat dimanfaatkan untuk secara akurat dan mudah dalam melakukan pemilihan profil baja untuk elemen struktur tekan yaitu kolom baja yang menahan gaya aksial tekan dan menemukan kelebihan dan keunggulan dari setiap bentuk profil baja yang ada.

2 TORSIONAL PROPERETIES PENAMPANG

Setiap bentuk profil dari penampang struktur baja, memiliki kapasitas dalam menahan tekuk torsi. Kapasitasnya ditentukan dari *torsional properties* penampang. Untuk menentukan kapasitas ini, dapat diperhatikan terlebih dahulu tentang bagaimana tegangan geser (*shear stress*) yang berkaitan dengan gaya torsi yang bekerja pada masing-masing bentuk penampang.



Gambar 2. *Shear Stress Flow Variation* pada Setiap Bentuk Penampang (Hughes, A.F et al., 2011)

A. Konstanta Torsi St. Venant (*St. Venant Torsional Constant*)

Konstanta torsi St. Venant, disimbolkan dengan J , adalah ukuran kapasitas elemen struktur dalam menahan torsi yang menyebabkan momen torsi. Nilai konstanta torsi ini digunakan untuk menghitung tahanan elemen struktur yang tidak memiliki sokongan lateral dalam menahan tekuk dan tekuk lentur, sehingga torsi dapat terjadi. Nilai konstanta torsi memiliki satuan panjang pangkat empat (contohnya mm^4)

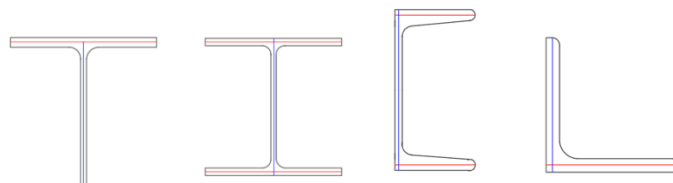
Untuk perhitungan nilai konstanta torsi menurut Galambos dalam CISC (2002):

$$J = \sum \left(\frac{b't^3}{3} \right) \quad (1)$$

dengan: b' = lebar pelat sayap atau badan;

t = tebal pelat sayap atau badan.

Pelat sayap dan badan pada profil adalah bagian-bagian pelat pembentuk penampang profil baja. Pelat sayap dan badan pada profil baja umumnya disusun secara berpotongan di ujung atau di tengah antar pelatnya. Ilustrasinya sebagai berikut.



Gambar 3. Penandaan Pelat Sayap dan Badan pada Profil Baja

Dari gambar 3, untuk garis berwarna merah dapat ditandai sebagai pelat sayap, sedangkan untuk garis warna biru dapat ditandai sebagai pelat badan. Masing-masing dari setiap pelat badan dan sayap pembentuk profil baja tersebut, dijumlahkan lalu diperoleh nilai konstanta torsi.

B. Konstanta Pilin (*Warping Torsional Constant*)

Konstanta pilin atau *warping*, disimbolkan dengan C_w , adalah kapasitas penampang elemen struktur dalam menahan torsi yang tidak seragam, sehingga menimbulkan momen pilin. Nilai konstanta pilin memiliki satuan panjang pangkat enam (contohnya mm^6)

Untuk perhitungan nilai konstanta pilin, C_w mengikuti ketentuan dari Galambos dalam CISC (2002):

$$C_w = \frac{I_y h_0^2}{4} \quad (2)$$

dengan: h_0 = jarak dari titik berat sayap;

I_y = inersia penampang sumbu lemah.

Perhitungan ini juga disebutkan pada SNI 1729:2020 pasal E4. tentang tekuk torsi dan tekuk torsi lentur pada bagian catatan penggunaan untuk profil IWF simetris ganda. Rumus tersebut juga berlaku untuk profil Kanal. Sedangkan untuk penampang T dan Siku Tunggal yang deformasi pilinnya sangat kecil, nilai konstanta pilinnya dapat diabaikan, sehingga nilai $C_w = 0$. Ketentuan ini berlaku untuk menghitung tahanan tekuk elastis torsi, F_{ez} . Selain itu, untuk penampang Siku Tunggal nilai $C_w = 0$ dapat dianalisis juga berdasarkan ketentuan dimensi penampang Siku Tunggal menurut SNI 1729:2020 pasal E5 apabila memenuhi persyaratan dimensi:

$$\frac{b}{t} \leq 0,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3)$$

dengan: b = lebar dari pelat sayap;

t = tebal pelat sayap;

E = modulus elastisitas penampang;

F_y = tegangan leleh baja, untuk mutu baja standar BJ-37 nilai $F_y = 240 \text{ MPa}$;

Jika, persyaratan dimensi ini terpenuhi, maka tekuk torsi tidak perlu diperhitungkan. Ketentuan ini juga mengonfirmasi bahwa untuk penampang Siku Tunggal nilai $C_w = 0$.

C. Modulus Geser (Shear Modulus)

Modulus geser, disimbolkan dengan G , adalah konstanta geser bahan baja dalam menahan deformasi akibat tegangan geser. Nilai modulus geser adalah fungsi dari modulus elastisitas, E (nilai E baja = 200.000 MPa) yang dapat dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut. (sumber: The Steel Construction Institute, 2011)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

dengan: ν = poisson ratio yang nilainya sekitar 0,3 untuk struktur baja;

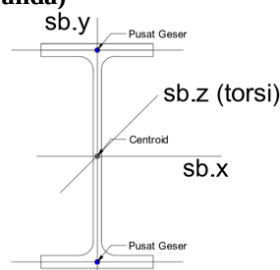
E = modulus elastisitas baja = 200.000 MPa.

Atau untuk pertimbangan praktis dari SNI 1729:2020, telah diatur dan ditentukan nilai G sebesar 77.200 MPa. Nilai modulus geser ini tetap dan diperlukan untuk menghitung tahanan torsi dari penampang struktur baja terutama penampang yang dapat mengalami tekuk torsi.

D. Pusat Geser (Shear Center atau Torsion Center)

Pusat Geser yang dinyatakan dalam koordinat (x_0, y_0) , adalah koordinat pusat geser yang diukur dari sumbu berat penampang atau pusat massa, *centroid*. Pusat geser ini juga merupakan titik pada penampang dimana resultan gaya torsi dan tegangan geser sebesar nol. Penentuan pusat geser pada setiap profil baja penampang menurut Galambos dalam CISC (2002) adalah sebagai berikut.

1. Profil IWF dan H-Beam (Simetris Ganda)



Gambar 4. Penampang Melintang Profil Baja IWF

Pada penampang bersimetris ganda seperti IWF dan H-Beam, pusat geser (x_0, y_0) ada dua. Satu berada di perpotongan sayap atas dan badan dan satunya lagi berada di perpotongan sayap bawah dan badan, seperti ditunjukkan pada gambar. Untuk koordinat titik x-nya berada tepat di sumbu y, sehingga:

$$x_0 = 0 \quad (5)$$

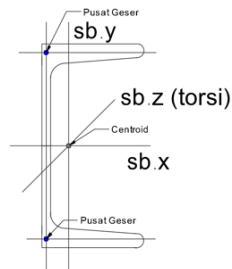
$$y_0 = y_{centroid} - \frac{1}{2} t_f \quad (6)$$

dengan: $y_{centroid}$ = koordinat sumbu-y titik pusat penampang

t_f = tebal sayap penampang

Oleh karena itu, koordinat (x_0, y_0) untuk penampang IWF dan H-Beam adalah $(0, y_{centroid} - \frac{1}{2} t_f)$.

2. Profil Kanal (Simetris Tunggal dengan sumbu simetris sumbu x)



Gambar 5. Penampang Melintang Profil Baja Kanal

Pada penampang bersimetris tunggal dengan sumbu simetri di sumbu x seperti profil Kanal, pusat geser juga ada dua. Satu berada di perpotongan sayap atas dan badan, dan satunya lagi berada di perpotongan sayap bawah dan badan, seperti ditunjukkan pada gambar 5. Untuk koordinat pusat geser-nya:

Koordinat sumbu-x:

$$x_0 = C_y - \frac{1}{2}t_w \quad (7)$$

dengan: C_y = center of gravity yang tertera pada tabel profil kanal;
 t_w = tebal pelat badan profil kanal.

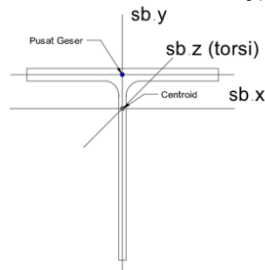
Koordinat sumbu-y:

$$y_0 = \frac{1}{2}H - \frac{1}{2}t_f \quad (8)$$

dimana: H = tinggi pelat badan profil kanal;
 t_f = tebal pelat sayap profil kanal.

Oleh karena itu, koordinat (x_0, y_0) untuk penampang kanal adalah $(C_y - \frac{1}{2}t_w, \frac{1}{2}H - \frac{1}{2}t_f)$.

3. Profil T (Simetris Tunggal dengan sumbu simetris sumbu y)



Gambar 6. Penampang Melintang Profil Baja T

Pada penampang bersimetris tunggal dengan sumbu simetri di sumbu y, pusat geser ada satu. Pusat geser berada di perpotongan sayap dan badan penampang seperti ditunjukkan pada gambar. Untuk koordinat titik x-nya berada tepat di sumbu y, sehingga:

$$x_0 = 0 \quad (9)$$

$$y_0 = H - C_y - \frac{1}{2}t_f \quad (10)$$

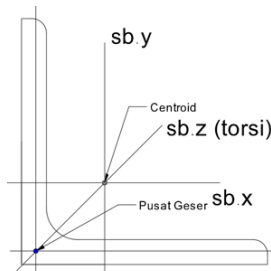
dengan: H = tinggi pelat badan profil T;

C_y = center of gravity yang tertera pada tabel profil T pada sumbu y;

t_f = tebal pelat sayap profil T.

Oleh karena itu, koordinat (x_0, y_0) untuk penampang T adalah $(0, H - C_y - \frac{1}{2}t_f)$.

4. Profil Siku Tunggal (Asimetris)



Gambar 7. Penampang Melintang Profil Baja Siku Tunggal

Pada penampang asimetris siku tunggal, pusat geser ada satu. Pusat geser berada di perpotongan sayap dan badan penampang seperti ditunjukkan pada gambar. Untuk koordinat titik x dan y -nya:

$$x_0 = C_y - \frac{1}{2}t \quad (11)$$

$$y_0 = C_x - \frac{1}{2}t \quad (12)$$

dengan: C_y = center of gravity pada sumbu y yang tertera pada tabel profil siku tunggal;

C_x = center of gravity pada sumbu x yang tertera pada tabel profil siku tunggal;

t = tebal pelat profil siku.

Oleh karena itu, koordinat (x_0, y_0) untuk penampang siku tunggal adalah $(C_y - \frac{1}{2}t, C_x - \frac{1}{2}t)$.

E. Jari-Jari Girasi Polar terhadap Pusat Geser (*Polar Radius of Gyration about Shear Center*)

Jari-jari girasi polar, disimbolkan dengan $\bar{r}_0$, adalah jari-jari girasi polar terhadap pusat geser. Jari-jari girasi polar juga menyatakan seberapa besar inersia penampang yang berputar terhadap sumbu torsi, sumbu Z , terhadap luas penampang. Berdasarkan SNI 1729:2020 persamaan E4-9, jari-jari girasi polar dihitung sebagai berikut.

$$\bar{r}_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \quad (13)$$

dengan: x_0 = koordinat pusat geser di sumbu- x ;

y_0 = koordinat pusat geser di sumbu- y ;

I_x = inersia penampang sumbu kuat;

I_y = inersia penampang sumbu lemah;

A_g = luas penampang bruto.

Rumus perhitungan tersebut berlaku untuk semua jenis bentuk profil, penampang simetris ganda, simetris tunggal, dan asimetris.

F. Tekuk Elastis Torsi, F_{ez}

Berdasarkan SNI 1729:2020 yang juga mengacu kepada AISC 360-16, tegangan kritis, F_{cr} , pada penampang yang mengalami tekuk torsi dan torsi lentur dibedakan berdasarkan banyaknya sumbu simetris penampang. Berdasarkan Setiawan (2008) peristiwa tekuk torsi hanya terjadi pada elemen-elemen dengan sumbu simetri ganda terutama pada elemen yang berpelat tipis. Sedangkan peristiwa tekuk torsi lentur terjadi akibat kombinasi lentur dan torsi yang terjadi bersamaan dan terjadi pada penampang dengan satu sumbu simetri seperti profil kanal, T, siku ganda, dan siku tunggal.

Untuk menghitung nilai F_{cr} perlu dihitung terlebih dahulu nilai F_{ez} yang merupakan tegangan tekuk elastis akibat torsi. Hubungan antara nilai F_{cr} dan F_{ez} adalah sebanding atau berbanding lurus, jika nilai F_{ez} semakin besar, maka nilai F_{cr} juga semakin besar. Menghitung nilai F_{ez} dapat ditentukan berdasarkan SNI 1729:2020 pasal E4 pada persamaan E4-7 sebagai berikut.

$$F_{ez} = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right) \frac{1}{A_g \bar{r}_0^2} \quad (14)$$

dengan: C_w = konstanta pilin;

A_g = luas penampang bruto;

$\bar{r}_0$ = jari-jari girasi polar;

E = modulus elastisitas penampang

G = modulus geser penampang

J = konstanta torsi

L_{cz} = panjang efektif terhadap sumbu torsi (sumbu Z)

Setelah diperoleh nilai F_{ez} , nilai tersebut menjadi inputan untuk menghitung F_{cr} . Nilai F_{ez} dihitung berdasarkan *torsional properties* penampang. Dari hubungan antara nilai F_{ez} , dan *torsional properties* inilah dapat ditentukan bahwa semakin besar tegangan tekuk elastis torsi dipengaruhi oleh besaran *torsional properties* penampang yang juga besar. Jadi besaran nilai *torsional properties* penampang profil baja berbanding lurus dengan tegangan tekuk elastis torsi.

3 METODE

Metode analisis yang dilakukan untuk mengevaluasi *torsional properties* penampang adalah dengan menggunakan pendekatan pengumpulan berbagai referensi dari berbagai sumber artikel yang terindeks tentang desain dan analisis struktur baja, buku teknik sipil, dan peraturan yang mengatur tentang ketentuan *torsional properties* penampang. Referensi yang dikumpulkan berasal dari referensi nasional dan internasional yang saling berkaitan.

Untuk pengumpulan data-data yang menjadi bahan untuk evaluasi dan analisis *torsional properties* penampang, diambil dari tabel-tabel profil baja yang dikeluarkan produsen baja resmi di Indonesia, PT. Gunung Garuda, yang juga mengacu kepada Gunawan (1987). Data-data yang dikumpulkan yaitu data-data penampang profil baja IWF, Kanal, T, dan Siku Tunggal dari berbagai ukuran standar yang diproduksi oleh produsen baja. Pertimbangannya adalah ukuran standar ini telah banyak digunakan di Indonesia.

Setelah data-data profil baja dikumpulkan, dapat ditentukan *torsional properties* penampangnya sebagai inputan untuk mengevaluasi dan menganalisis hubungannya terhadap tegangan tekuk elastis torsi yang merupakan kapasitas penampang dalam menahan tekuk torsi. Penentuan *torsional properties* penampang ini dievaluasi dengan satu contoh perhitungan dari satu ukuran dimensi dari setiap bentuk profil. Contoh perhitungan dari satu ukuran dimensi dari setiap bentuk profil untuk menunjukkan bahwa hasil perhitungan *torsional properties* penampang dapat memberikan hasil yang berbeda dari setiap bentuk profil. Kemudian, dirangkum hasil perhitungan *torsional properties* penampang dalam tabel rekapan dan diperbandingkan antara bentuk profil, untuk dievaluasi dan dianalisis mana yang pengaruhnya lebih besar terhadap besaran tegangan tekuk elastis torsi.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengumpulan data mengenai bentuk-bentuk profil baja dan standar ukuran yang mengikuti peraturan dan standar penggunaan struktur baja, diperoleh data profil dan ukuran profil baja dari katalog produk yang dikeluarkan produsen baja. Selain itu, dari berbagai *literature review* yang telah dikumpulkan, yang juga mengacu kepada peraturan dan standar analisis struktur baja, baik dari SNI 1729 tahun 2020 maupun AISC 360-16, diperoleh juga hubungan antara *sectional dimension* dan *torsional properties* dari profil baja, yang dijelaskan pada tabel-tabel sebagai berikut.

Tabel 1. Data Penampang Profil Wide Flange Shape (IWF)

WIDE FLANGE SHAPE (IWF)													
Sectional Dimension						Torsional Properties							
Dimensi Penampang				Luas Penampang A mm ²	Momen Inersia		Konstanta Torsi	Konstanta Pilin	Modulus Geser	Pusat Geser		Jari-Jari Girasi Polar	
d mm	x mm	bf mm	tw mm		tf mm	Penampang		St. Venant	Cw mm ⁶	G MPa	Xo mm	Yo mm	r _o mm
						Ix mm ⁴	Iy mm ⁴	J mm ⁴					
H 100 x 100			6,0	8,0	2190,0	3,8,E+06	1,3,E+06	4,08,E+04	2,84,E+09	77200,0	0,0	46,0	66,91
H 125 x 125			6,5	9,0	3031,0	8,5,E+06	2,9,E+06	7,14,E+04	9,86,E+09	77200,0	0,0	58,0	84,41
H 150 x 75			5,0	7,0	1785,0	6,7,E+06	4,9,E+05	2,31,E+04	2,51,E+09	77200,0	0,0	71,5	95,49
H 150 x 150			7,0	10,0	4014,0	1,6,E+07	5,6,E+06	1,16,E+05	2,76,E+10	77200,0	0,0	70,0	101,9
H 175 x 175			7,5	11,0	5121,0	2,9,E+07	9,8,E+06	1,78,E+05	6,62,E+10	77200,0	0,0	82,0	119,5
H 198 x 99			4,5	7,0	2318,0	1,6,E+07	1,1,E+06	2,84,E+04	1,04,E+10	77200,0	0,0	95,5	128,2
H 200 x 100			5,5	8,0	2716,0	1,8,E+07	1,3,E+06	4,48,E+04	1,23,E+10	77200,0	0,0	96,0	128,4
H 194 x 150			6,0	9,0	3901,0	2,7,E+07	5,1,E+06	8,62,E+04	4,34,E+10	77200,0	0,0	92,5	129,4
H 200 x 200			8,0	12,0	6353,0	4,7,E+07	1,6,E+07	2,62,E+05	1,41,E+11	77200,0	0,0	94,0	137,05
H 248 x 124			5,0	8,0	3268,0	3,5,E+07	2,6,E+06	5,23,E+04	3,67,E+10	77200,0	0,0	120,0	161,28
H 250 x 125			6,0	9,0	3766,0	4,1,E+07	2,9,E+06	7,81,E+04	4,27,E+10	77200,0	0,0	120,5	161,42
H 250 x 250			9,0	14,0	9218,0	1,1,E+08	3,7,E+07	5,15,E+05	5,08,E+11	77200,0	0,0	118,0	172,05
H 298 x 149			5,5	8,0	4080,0	6,3,E+07	4,4,E+06	6,69,E+04	9,29,E+10	77200,0	0,0	145,0	193,90
H 300 x 150			6,5	9,0	4678,0	7,2,E+07	5,1,E+06	9,95,E+04	1,08,E+11	77200,0	0,0	145,5	194,08
H 300 x 300			10,0	15,0	11980,0	2,0,E+08	6,8,E+07	7,70,E+05	1,37,E+12	77200,0	0,0	142,5	207,29
H 346 x 174			6,0	9,0	5268,0	1,1,E+08	7,9,E+06	1,09,E+05	2,25,E+11	77200,0	0,0	168,5	225,76
H 350 x 175			7,0	11,0	6314,0	1,4,E+08	9,8,E+06	1,94,E+05	2,83,E+11	77200,0	0,0	169,5	227,66
H 350 x 350			12,0	19,0	17390,0	4,0,E+08	1,4,E+08	1,79,E+06	3,73,E+12	77200,0	0,0	165,5	241,63
H 396 x 199			7,0	11,0	7216,0	2,0,E+08	1,5,E+07	2,21,E+05	5,37,E+11	77200,0	0,0	192,5	258,42
H 400 x 200			8,0	13,0	8412,0	2,4,E+08	1,7,E+07	3,59,E+05	6,51,E+11	77200,0	0,0	193,5	260,16
H 400 x 400			13,0	21,0	21870,0	6,7,E+08	2,2,E+08	2,75,E+06	8,04,E+12	77200,0	0,0	189,5	276,78
H 450 x 200			9,0	14,0	9676,0	3,4,E+08	1,9,E+07	4,72,E+05	8,89,E+11	77200,0	0,0	218,0	289,96
H 500 x 200			10,0	16,0	11420,0	4,8,E+08	2,1,E+07	7,07,E+05	1,25,E+12	77200,0	0,0	242,0	319,83
H 600 x 200			11,0	17,0	13440,0	7,8,E+08	2,3,E+07	9,14,E+05	1,94,E+12	77200,0	0,0	291,5	380,01
H 588 x 300			12,0	20,0	19250,0	1,2,E+09	9,0,E+07	1,93,E+06	7,28,E+12	77200,0	0,0	284,0	382,94
H 700 x 300			13,0	24,0	21550,0	2,0,E+09	1,1,E+08	3,26,E+06	1,23,E+13	77200,0	0,0	338,0	461,01
H 800 x 300			14,0	26,0	26740,0	2,9,E+09	1,2,E+08	4,22,E+06	1,75,E+13	77200,0	0,0	387,0	513,17
H 900 x 300			16,0	28,0	30980,0	4,1,E+09	1,3,E+08	5,58,E+06	2,40,E+13	77200,0	0,0	436,0	571,69

Tabel 2. Data Penampang Profil Kanal (UNP)

UNP (KANAL)															
Sectional Dimension								Torsional Properties							
Dimensi Penampang				Titik Centro Id ex mm	Titik Centro Id ey mm	Luas Penamp ang A mm²	Momen Inersia		Konstanta Torsi	Konstanta Pilin	Modulus Geser	Pusat Geser		Jari- Jari	
							Penampang		St. Venant					Girasi Polar	
							Ix	Iy	J	Cw	G	Xo	Yo	r _o	
d	x	bf	tw	tf	ex	ey	A	mm4	mm4	mm4	mm6	MPa	mm	mm	mm
[75	x	40	5,0	7,0	12,80	37,50	882,00	7,5,E+05	1,2,E+05	1,20,E+04	1,41,E+08	77200,00	10,30	34,00	47,48
[100	x	50	5,0	7,5	15,40	50,00	1192,00	1,9,E+06	2,6,E+05	1,79,E+04	5,56,E+08	77200,00	12,90	46,25	64,04
[125	x	65	6,0	8,0	19,00	62,50	1711,00	4,2,E+06	6,2,E+05	3,06,E+04	2,11,E+09	77200,00	16,00	58,50	80,73
[150	x	75	6,5	10,0	22,80	75,00	2371,00	8,6,E+06	1,2,E+06	6,28,E+04	5,73,E+09	77200,00	19,55	70,00	96,99
[150	x	75	9,0	12,5	23,10	75,00	3059,00	1,1,E+07	1,5,E+06	1,31,E+05	6,95,E+09	77200,00	18,60	68,75	94,79
[180	x	75	7,0	10,5	21,30	90,00	2720,00	1,4,E+07	1,3,E+06	7,73,E+04	9,41,E+09	77200,00	17,80	84,75	114,26
[200	x	80	7,5	11,0	22,10	100,00	3133,00	2,0,E+07	1,7,E+06	9,76,E+04	1,50,E+10	77200,00	18,35	94,50	126,60
[200	x	90	8,0	13,5	27,40	100,00	3865,00	2,5,E+07	2,8,E+06	1,79,E+05	2,41,E+10	77200,00	23,40	93,25	128,07
[250	x	90	9,0	13,0	24,00	125,00	4407,00	4,2,E+07	2,9,E+06	1,89,E+05	4,13,E+10	77200,00	19,50	118,50	156,76
[250	x	90	11,0	14,5	24,00	125,00	5117,00	4,7,E+07	3,3,E+06	2,87,E+05	4,56,E+10	77200,00	18,50	117,75	154,91
[300	x	90	10,0	15,5	23,40	150,00	5574,00	7,4,E+07	3,6,E+06	3,18,E+05	7,28,E+10	77200,00	18,40	142,25	185,78
[300	x	90	12,0	16,0	22,80	150,00	6190,00	7,9,E+07	3,8,E+06	4,09,E+05	7,64,E+10	77200,00	16,80	142,00	183,77
[380	x	100	10,5	15,0	24,10	190,00	6939,00	1,5,E+08	5,4,E+06	3,66,E+05	1,78,E+11	77200,00	18,85	182,50	235,22
[380	x	100	13,0	16,5	23,30	190,00	7896,00	1,6,E+08	5,7,E+06	5,66,E+05	1,87,E+11	77200,00	16,80	181,75	231,92
[380	x	100	13,0	20,0	25,40	190,00	8571,00	1,8,E+08	6,6,E+06	7,97,E+05	2,12,E+11	77200,00	18,90	180,00	232,50

Tabel 3. Data Penampang Profil Tee Shape (T)

TEE-SHAPE (T)														
Sectional Dimension							Torsional Properties							
Dimensi Penampang			Luas	Titik Penamp ang	Centr old	Momen Inersia		Konstant a Torsi	Konst anta Pilin	Modulus Geser	Pusat Geser	Pusat Geser	Jari- Jari	
						Penampang		St. Venant					Girasi Pola	
d	x	bf	tw	tf	A	y	Ix	Iy	J	Cw	G	Xo	Yo	r̄o
mm	mm	mm	mm	mm	mm²	mm	mm⁴	mm⁴	mm⁴	mm⁶	MPa	mm	mm	mm
T 50	x	100	6,0	8,0	1095,0	40,0	1,60,E+05	6,70,E+05	2,0,E+04	0,0	77200,0	0,0	6,00	28,18
T 62,5	x	125	6,5	9,0	1516,0	50,6	3,50,E+05	1,47,E+06	3,6,E+04	0,0	77200,0	0,0	7,40	35,43
T 75	x	75	5,0	7,0	893,0	57,0	4,20,E+05	2,50,E+05	1,2,E+04	0,0	77200,0	0,0	14,50	30,99
T 75	x	150	7,0	10,0	2007,0	61,3	6,60,E+05	2,82,E+06	5,8,E+04	0,0	77200,0	0,0	8,70	42,54
T 100	x	100	5,5	8,0	1358,0	71,7	1,14,E+06	6,70,E+05	2,2,E+04	0,0	77200,0	0,0	24,30	43,86
T 99	x	100	4,5	7,0	1159,0	78,1	9,40,E+05	5,80,E+05	1,4,E+04	0,0	77200,0	0,0	17,40	40,18
T 87,5	x	175	7,5	11,0	2561,0	72,0	1,14,E+06	4,92,E+06	8,9,E+04	0,0	77200,0	0,0	10,00	49,66
T 100	x	200	8,0	12,0	3177,0	82,7	1,84,E+06	8,01,E+06	1,3,E+05	0,0	77200,0	0,0	11,30	56,82
T 125	x	125	6,0	9,0	1883,0	97,2	2,48,E+06	1,47,E+06	3,9,E+04	0,0	77200,0	0,0	23,30	51,39
T 124	x	124	5,0	8,0	1634,0	97,7	2,07,E+06	1,27,E+06	2,6,E+04	0,0	77200,0	0,0	22,30	50,41
T 125	x	250	9,0	14,0	4609,0	104,2	4,11,E+06	1,83,E+07	2,6,E+05	0,0	77200,0	0,0	13,80	71,01
T 150	x	150	6,5	9,0	2339,0	115,9	4,63,E+06	2,54,E+06	5,0,E+04	0,0	77200,0	0,0	29,60	62,78
T 149	x	149	5,5	8,0	2040,0	116,4	3,93,E+06	2,21,E+06	3,3,E+04	0,0	77200,0	0,0	28,60	61,87
T 150	x	300	10,0	15,0	5990,0	125,3	7,96,E+06	3,38,E+07	3,9,E+05	0,0	77200,0	0,0	17,20	85,23
T 175	x	175	7,0	11,0	3157,0	137,5	8,14,E+06	4,92,E+06	9,7,E+04	0,0	77200,0	0,0	32,00	71,84
T 173	x	174	6,0	9,0	2634,0	136,0	6,78,E+06	3,96,E+06	5,4,E+04	0,0	77200,0	0,0	32,50	71,65
T 175	x	350	12,0	19,0	8695,0	146,4	1,52,E+07	6,79,E+07	9,0,E+05	0,0	77200,0	0,0	19,10	99,60
T 200	x	200	8,0	13,0	4206,0	157,7	1,40,E+07	8,68,E+06	1,8,E+05	0,0	77200,0	0,0	35,80	81,62
T 198	x	199	7,0	11,0	3608,0	156,3	1,19,E+07	7,23,E+06	1,1,E+05	0,0	77200,0	0,0	36,20	81,37
T 200	x	400	13,0	21,0	10935,0	167,9	2,47,E+07	1,12,E+08	1,4,E+06	0,0	77200,0	0,0	21,60	113,90
T 225	x	200	9,0	14,0	4838,0	173,5	2,16,E+07	9,36,E+06	2,4,E+05	0,0	77200,0	0,0	44,50	91,48
T 250	x	200	10,0	16,0	5710,0	190,5	3,21,E+07	1,07,E+07	3,5,E+05	0,0	77200,0	0,0	51,50	100,75
T 300	x	200	11,0	17,0	6720,0	221,6	5,79,E+07	1,14,E+07	4,6,E+05	0,0	77200,0	0,0	69,90	123,25
T 294	x	300	12,0	20,0	9625,0	233,2	6,70,E+07	4,51,E+07	9,6,E+05	0,0	77200,0	0,0	50,80	119,25
T 350	x	300	13,0	24,0	11775,0	274,5	1,20,E+08	5,41,E+07	1,6,E+06	0,0	77200,0	0,0	63,50	137,23
T 400	x	300	14,0	26,0	13370,0	308,3	1,88,E+08	5,87,E+07	2,1,E+06	0,0	77200,0	0,0	78,70	156,95

Tabel 4. Data Penampang Profil Siku Tunggal

SIKU TUNGGAL											
Sectional Dimension						Torsional Properties					
Dimensi Penampang		Titik Centro	Luas Penampang	Momen Inersia Penampang	Konstanta Torsi St. Venant	Konstanta Pilitn	Modulus Geser	Pusat Geser	Pusat Geser	Jari-Jari Girasi Polar	
d	x bf										
mm	mm	y	A	I _x =I _y	J	C _w	G	X _o	Y _o	r _o	
mm	mm	mm	mm ²	mm ⁴	mm ⁴	mm ⁶	MPa	mm	mm	mm	
L 50 x 50	5,0	14,1	480,0	1,11,E+05	3,96,E+03	0,0	77200	11,60	11,60	27,05	
L 50 x 50	6,0	14,4	564,0	1,26,E+05	6,77,E+03	0,0	77200	11,40	11,40	26,58	
L 60 x 60	5,0	16,6	580,0	1,96,E+05	4,79,E+03	0,0	77200	14,10	14,10	32,76	
L 60 x 60	6,0	16,9	691,0	2,28,E+05	8,21,E+03	0,0	77200	13,90	13,90	32,35	
L 65 x 65	5,0	17,7	637,0	2,53,E+05	5,21,E+03	0,0	77200	15,20	15,20	35,45	
L 65 x 65	6,0	18,1	753,0	2,94,E+05	8,93,E+03	0,0	77200	15,10	15,10	35,17	
L 65 x 65	8,0	18,8	976,0	3,68,E+05	2,08,E+04	0,0	77200	14,80	14,80	34,53	
L 70 x 70	6,0	19,3	813,0	3,71,E+05	9,65,E+03	0,0	77200	16,30	16,30	38,00	
L 75 x 75	6,0	20,6	873,0	4,61,E+05	1,04,E+04	0,0	77200	17,60	17,60	40,93	
L 80 x 80	6,0	21,8	933,0	5,64,E+05	1,11,E+04	0,0	77200	18,80	18,80	43,77	
L 90 x 90	7,0	24,6	1222,0	9,30,E+05	1,98,E+04	0,0	77200	21,10	21,10	49,12	
L 90 x 90	10,0	25,7	1700,0	1,25,E+06	5,67,E+04	0,0	77200	20,70	20,70	48,24	
L 100 x 100	7,0	27,1	1362,0	1,29,E+06	2,21,E+04	0,0	77200	23,60	23,60	54,85	
L 100 x 100	10,0	28,2	1900,0	1,75,E+06	6,33,E+04	0,0	77200	23,20	23,20	54,02	
L 120 x 120	8,0	32,4	1876,0	2,58,E+06	3,96,E+04	0,0	77200	28,40	28,40	66,06	
L 120 x 120	11,0	33,6	2540,0	3,41,E+06	1,02,E+05	0,0	77200	28,10	28,10	65,30	
L 120 x 120	12,0	34,0	2750,0	3,88,E+06	1,31,E+05	0,0	77200	28,00	28,00	66,26	
L 130 x 130	9,0	35,3	2274,0	3,66,E+06	6,10,E+04	0,0	77200	30,80	30,80	71,53	
L 130 x 130	12,0	36,4	2976,0	4,67,E+06	1,43,E+05	0,0	77200	30,40	30,40	70,62	
L 150 x 150	12,0	41,4	3477,0	7,40,E+06	1,66,E+05	0,0	77200	35,40	35,40	82,24	
L 150 x 150	15,0	42,4	4274,0	8,88,E+06	3,21,E+05	0,0	77200	34,90	34,90	81,19	
L 150 x 150	19,0	44,0	5338,0	1,09,E+07	6,42,E+05	0,0	77200	34,50	34,50	80,40	
L 175 x 175	12,0	47,3	4052,0	1,17,E+07	1,95,E+05	0,0	77200	41,30	41,30	95,85	
L 175 x 175	15,0	48,5	5021,0	1,44,E+07	3,77,E+05	0,0	77200	41,00	41,00	95,38	
L 200 x 200	20,0	56,7	7600,0	2,82,E+07	1,01,E+06	0,0	77200	46,70	46,70	108,55	
L 200 x 200	25,0	58,6	9375,0	3,42,E+07	1,95,E+06	0,0	77200	46,10	46,10	107,45	
L 250 x 250	25,0	71,0	11940,0	6,95,E+06	2,47,E+06	0,0	77200	58,50	58,50	89,49	
L 250 x 250	35,0	74,5	16260,0	9,11,E+07	6,65,E+06	0,0	77200	57,00	57,00	133,05	

Untuk menentukan hubungan antara *sectional dimension* dan *torsional properties* dari setiap profil baja, diberikan satu contoh perhitungan untuk setiap bentuk dari profil baja, dengan satu contoh dimensi yang terkecil dari setiap profil baja. Untuk profil IWF diambil contoh profil IWF 100.100.6.8, profil Kanal 75.40.5.7, profil T 50.100.6.8, dan profil siku tunggal 50.50.5.

Profil Wide Flange Shape (IWF)

- IWF 100.100.6.8.**

Dimensi, $d = 100 \text{ mm}$, $b_f = 100 \text{ mm}$, $t_w = 6 \text{ mm}$, $t_f = 8 \text{ mm}$

Luas, $A_g = 2190 \text{ mm}^2$

Inersia Penampang, $I_x = 3,8 \times 10^6 \text{ mm}^4$, $I_y = 1,3 \times 10^6 \text{ mm}^4$

Titik Centroid, $x = 0 \text{ mm}$, $y = \frac{100}{2} = 50 \text{ mm}$

Pusat Geser, $X_o = 0 \text{ mm}$, $Y_o = 50 - \frac{8}{2} = 46 \text{ mm}$

Jari – Jari Girasi Polar, $r_o = 0^2 + 46^2 + \frac{3,8 \times 10^6 + 1,3 \times 10^6}{2190} = 66,91 \text{ mm}$

Konstanta Torsi St. Venant, $J = 2x \frac{100 \times 8^3}{3} + \frac{(100 - 2 \times 0,5 \times 8) \times 6^3}{3} = 4,08 \times 10^4 \text{ mm}^4$

Konstanta Pilitn, $C_w = \frac{1,3 \times 10^6 \times (100 - 8)^2}{4} = 2,84 \times 10^9 \text{ mm}^4$

Modulus Geser, $G = 77200 \text{ MPa}$ (tetap)

Profil Kanal (UNP)

- Kanal 75.40.5.7**

Dimensi, $d = 75 \text{ mm}$, $b_f = 40 \text{ mm}$, $t_w = 5 \text{ mm}$, $t_f = 7 \text{ mm}$

Luas, $A_g = 882 \text{ mm}^2$

Inersia Penampang, $I_x = 7,5 \times 10^5 \text{ mm}^4$, $I_y = 1,2 \times 10^5 \text{ mm}^4$

Titik Centroid, $x = 12,8 \text{ mm}$, $y = \frac{75}{2} = 37,5 \text{ mm}$

Pusat Geser, $X_0 = 12,8 - \frac{5}{2} = 10,3 \text{ mm}$,

$Y_0 = 37,5 - \frac{7}{2} = 34 \text{ mm}$

Jari – Jari Girasi Polar, $\bar{r}_o = 10,3^2 + 34^2 + \frac{7,5 \times 10^5 + 1,2 \times 10^5}{882} = 47,48 \text{ mm}$

Konstanta Torsi St. Venant, $J = 2x \frac{40 \times 7^3}{3} + \frac{(75 - 2 \times 0,5 \times 7) \times 5^3}{3} = 1,20 \times 10^4 \text{ mm}^4$

Konstanta Pilin, $C_w = \frac{1,2 \times 10^5 \times (75 - 7)^2}{4} = 1,41 \times 10^8 \text{ mm}^4$

Modulus Geser, $G = 77200 \text{ MPa}$ (tetap)

Profil Tee-Shape (T)

- T 50.100.6.8**

Dimensi, $d = 50 \text{ mm}$, $b_f = 100 \text{ mm}$, $t_w = 6 \text{ mm}$, $t_f = 8 \text{ mm}$

Luas, $A_g = 1095 \text{ mm}^2$

Inersia Penampang, $I_x = 1,6 \times 10^5 \text{ mm}^4$, $I_y = 6,7 \times 10^5 \text{ mm}^4$

Titik Centroid, $x = 0 \text{ mm}$, $y = 40 \text{ mm}$

Pusat Geser, $X_0 = 0 \text{ mm}$, $Y_0 = 50 - 40 - \frac{8}{2} = 6 \text{ mm}$

Jari – Jari Girasi Polar, $\bar{r}_o = 0^2 + 6^2 + \frac{1,6 \times 10^5 + 6,7 \times 10^5}{1095} = 28,18 \text{ mm}$

Konstanta Torsi St. Venant, $J = \frac{100 \times 8^3}{3} + \frac{(50 - 0,5 \times 8) \times 6^3}{3} = 2,0 \times 10^4 \text{ mm}^4$

Konstanta Pilin, $C_w = 0$

Modulus Geser, $G = 77200 \text{ MPa}$ (tetap)

Profil Siku Tunggal

- Siku Tunggal 50.50.5**

Dimensi, $d = 50 \text{ mm}$, $b_f = 50 \text{ mm}$, $t_w = t_f = 5 \text{ mm}$

Luas, $A_g = 480 \text{ mm}^2$

Inersia Penampang, $I_x = I_y = 1,11 \times 10^5 \text{ mm}^4$

Titik Centroid, $x = y = 14,1 \text{ mm}$

Pusat Geser, $X_0 = 14,1 - \frac{5}{2} = 11,6 \text{ mm}$

$Y_0 = 14,1 - \frac{5}{2} = 11,6 \text{ mm}$

Jari – Jari Girasi Polar, $\bar{r}_o = 11,6^2 + 11,6^2 + \frac{1,11 \times 10^5 + 1,11 \times 10^5}{480} = 27,05 \text{ mm}$

Konstanta Torsi St. Venant, $J = \frac{(50 - 0,5 \times 5) \times 5^3}{3} + \frac{(50 - 0,5 \times 5) \times 5^3}{3} = 3,96 \times 10^3 \text{ mm}^4$

Konstanta Pilin, $C_w = 0$

Modulus Geser, $G = 77200 \text{ MPa}$ (tetap)

Rekapitulasi perhitungan terhadap persyaratan dimensi siku tunggal terhadap persyaratan dimensi berdasarkan persamaan (3) ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengecekan Persyaratan Dimensi Siku Tunggal

Dimensi Penampang				h/t	$0,71\sqrt{E}/F_y$	$(h/t) \text{ vs } (0,71\sqrt{E}/F_y)$	Dimensi Penampang				h/t	$0,71\sqrt{E}/F_y$	$(h/t) \text{ vs } (0,71\sqrt{E}/F_y)$
d	x	b_f	t				d	x	b_f	t			
mm	mm	mm					mm	mm	mm				
L 50	x	50	5,0	10,00	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 120	x	120	8,0	15,00	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 50	x	50	6,0	8,33	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 120	x	120	11,0	10,91	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 60	x	60	5,0	12,00	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 120	x	120	12,0	10,00	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 60	x	60	6,0	10,00	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 130	x	130	9,0	14,44	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 65	x	65	5,0	13,00	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 130	x	130	12,0	10,83	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 65	x	65	6,0	10,83	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 150	x	150	12,0	12,50	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 65	x	65	8,0	8,13	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 150	x	150	15,0	10,00	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 70	x	70	6,0	11,67	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 150	x	150	19,0	7,89	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 75	x	75	6,0	12,50	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 175	x	175	12,0	14,58	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 80	x	80	6,0	13,33	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 175	x	175	15,0	11,67	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 90	x	90	7,0	12,86	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 200	x	200	20,0	10,00	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 90	x	90	10,0	9,00	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 200	x	200	25,0	8,00	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 100	x	100	7,0	14,29	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 250	x	250	25,0	10,00	20,50	Tidak Diperhitungkan
L 100	x	100	10,0	10,00	20,50	Tidak Diperhitungkan	L 250	x	250	35,0	7,14	20,50	Tidak Diperhitungkan

Dari Tabel 5 di atas dapat dilihat bahwa untuk spesifikasi dimensi siku tunggal dari tabel profil standar produsen baja tidak ada potensi terjadinya tekuk torsi. Hal ini dapat ditentukan dari nilai $\frac{b}{t}$ yang tidak melampaui nilai $0,71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ sehingga $\frac{b}{t} \leq 0,71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ seluruhnya terpenuhi (untuk mutu baja standar BJ-37 digunakan nilai $E=200.000$ MPa dan $F_y = 240$ MPa untuk baja standar BJ 37). Dari hasil evaluasi tersebut, dapat ditentukan untuk profil siku tunggal nilai $C_w = 0$. Selain itu, evaluasi dari dimensi dan bentuk penampang siku tunggal yang hanya memiliki satu pelat sayap (seperti profil T), nilai $h_0 \approx 0$ yaitu sangat kecil, sehingga memberikan nilai $C_w = 0$. Evaluasi untuk keseluruhan profil baja yang telah dianalisis, yaitu profil IWF, Kanal, Tee, dan Siku Tunggal dijabarkan di bawah ini, berturut-turut pengaruh bentuk penampang, letak pusat geser, konstanta torsi, dan konstanta pilin.

Semakin besar ukuran penampang, tinggi dan lebar, dan semakin tebal pelat badan dan sayap, maka semakin besar luas penampang bruto dan *torsional properties* penampang. *Torsional properties* (J dan C_w) yang lebih besar akan lebih cocok difungsikan untuk struktur yang menahan gaya aksial tekan yang lebih besar. Di lain pihak, efisiensi dari penampang perlu diperiksa kembali karena akan sangat boros. Selain itu, struktur yang lebih besar akan memiliki tantangan pada saat pelaksanaan konstruksi dan perakitan di lapangan, termasuk saat *erection* baja yang memerlukan alat pengangkat yang lebih besar. Dapat juga dipilih ukuran penampang yang lebih kecil, apabila masih memenuhi persyaratan dalam menahan tekuk torsi, yang dapat ditambahkan pemasangan perkuatan pada perletakan (*joint*) elemen struktur. Perkuatan ini dapat mengurangi panjang efektif torsi, L_{cz} pada persamaan (14) sehingga dapat menambah tegangan tekuk elastis torsi.

Posisi letak pusat geser bergantung kepada bentuk penampang. Untuk penampang IWF dengan simetris ganda, pusat geser ada dua dan keduanya berada di masing-masing titik pusat pelat sayap. Untuk penampang Kanal dengan simetris tunggal di Sumbu-X (sumbu kuat), pusat geser ada dua dan keduanya berada segaris dengan masing-masing titik pusat pelat sayap. Letak pusat geser penampang IWF berhimpit dengan titik pusat pelat sayap, sedangkan pusat geser penampang Kanal tidak berhimpit melainkan segaris dengan titik pusat pelat sayap. Untuk profil T dan Siku Tunggal yang hanya mempunyai satu pusat geser, yang letaknya dibagian perpotongan garis titik berat pelat badan dan sayap penampang. Dari analisis terkait posisi letak pusat geser ini, dapat ditentukan bahwa letak pusat geser tidak selalu berada berhimpit dengan pusat massa penampang (*centroid*). Akibatnya potensi tekuk torsi pada penampang I, Kanal, Tee, dan Siku Tunggal akan selalu ada. Letak pusat geser ini akan mempengaruhi besaran jari-jari girasi polar penampang. Jari-jari girasi polar ditentukan dan dihitung dengan rumus pada persamaan (13). Semakin dekat letak pusat geser terhadap *centroid* penampang, maka semakin kecil jari-jari girasi polar didapatkan, yang membuat semakin besar nilai tegangan tekuk elastis torsi dan semakin kecil potensi tekuk torsi yang akan terjadi.

Terkait nilai Konstanta Torsi St. Venants yang dipengaruhi oleh banyaknya jumlah komponen pelat (sayap dan badan) pembentuk profil, profil IWF dan Kanal memiliki tiga pelat pembentuk yang terdiri dari dua pelat sayap dan satu pelat badan, sedangkan profil Tee dan Siku Tunggal memiliki dua pelat pembentuk yang terdiri dari satu pelat sayap dan satu pelat badan. Untuk dapat menambah besaran nilai Konstanta Torsi St. Venants penampang, terdapat opsi untuk menggabungkan lebih dari satu penampang profil baja tunggal. Salah satunya adalah dengan mengaplikasikan komponen struktur tekan tersusun, yaitu menggabungkan dua atau lebih profil baja dengan

menggunakan konektor las atau baut sehingga profil baja gabungan tersebut dapat bekerja bersama-sama sebagai satu elemen struktur tekan yang dapat menahan tekuk torsi. Selain itu, terdapat opsi lainnya juga dengan mensubstitusi profil baja tunggal dengan profil struktur berongga (PSR) berbentuk persegi atau bulat yang pelat pembentuknya tersambung menjadi satu kesatuan.

Bila ditinjau dari nilai konstanta pilin yang dipengaruhi oleh letak pusat geser dan inersia penampang sumbu lemah (Sumbu-Y), inersia penampang ditentukan dari bentuk dan ukuran profil baja. Inersia sumbu lemah menyatakan bahwa profil baja yang mengalami gaya aksial tekan akan menekuk atau melentur terhadap sumbu tersebut, untuk penampang IWF dan Kanal sumbunya berada pada Sumbu-Y. Hal ini sesuai dengan rumus perhitungan konstanta pilin pada persamaan (2). Sebaliknya untuk penampang T dan Siku Tunggal hal ini tidak berlaku karena telah ditentukan bahwa nilai konstanta pilin-nya sangat kecil dan mendekati 0.

Terkait letak pusat geser dan jarak antara titik berat sayap, khususnya untuk profil IWF dan Kanal yang memiliki dua pelat sayap yang disambungkan dengan pelat badan, letak pusat geser berhimpit atau segaris dengan letak titik berat sayap, seperti yang telah dibahas pada analisis kedua. Dari hasil perhitungan dapat ditentukan hubungan antara letak pusat geser dan jarak antara titik berat sayap pada profil IWF dan Kanal yaitu $h_0 = 2Y_0$. Dengan h_0 adalah jarak titik berat sayap penampang yang tertera pada rumus (2). Dari analisis ini dapat dievaluasi juga bahwa perlu dipastikan agar gaya aksial tekan yang bekerja pada penampang tepat atau sedekat mungkin pada pusat geser untuk memperkecil potensi tekuk torsi. Oleh karena itu, penggunaan profil IWF dan Kanal yang memiliki dua pusat geser sebagai elemen struktur tekan yang menahan gaya aksial tekan diuntungkan daripada penggunaan profil Tee dan Siku Tunggal.

Selain itu, untuk pertimbangan praktis yang dapat dilakukan ketika menggunakan profil baja sebagai elemen struktur tekan, untuk menambah kapasitas penampang menahan tekuk torsi, ada beberapa hal yang dapat diperhitungkan:

- Menambah sokongan lateral berupa pengaku yang dipasang pada jarak tertentu, pengaku yang dipasang dapat berupa *stiffener plate* untuk pengaku vertikal dan bresing untuk pengaku horizontal.
- Memperkuat dan menambah kekakuan *support* di kedua ujung perletakan elemen batang tekan.
- Menghitung dengan akurat tahanan kritis tekuk torsi untuk mengukur batasan nilai momen torsi yang diizinkan untuk bekerja pada struktur.
- Memastikan gaya aksial tekan yang bekerja pada penampang tidak melebihi kapasitas elemen yang telah dihitung berdasarkan peraturan yang berlaku, yaitu SNI 1729:2020.

Analisis dan evaluasi di atas menambahkan argument bahwa untuk konstruksi di masa depan, struktur baja dapat dijadikan opsi utama dalam pemilihan material, terutama untuk penggunaan elemen struktur tekan (kolom) pada bangunan-bangunan yang memikul beban besar. Struktur baja juga sangat *versatile* dan dapat dikombinasikan dengan bahan lainnya, seperti beton menjadi struktur komposit yang memberikan kekuatan yang besar dengan penggunaan material yang lebih efisien. Walaupun terdapat juga beberapa kelemahan dalam penggunaan profil baja untuk struktur, seperti biaya material yang mahal, kerentanannya terhadap korosi sehingga membutuhkan biaya perawatan rutin, dan kerentanannya terhadap suhu tinggi yang dapat mengakibatkan penurunan kapasitas yang drastis. Namun demikian, struktur baja masih wajar untuk difungsikan karena manfaat yang dapat diberikan lebih besar daripada kekurangannya.

5 KESIMPULAN

Dari hasil evaluasi dan analisis mengenai bentuk dan ukuran profil baja, menunjukkan bahwa ada keterkaitan antara bentuk dan ukuran dimensi penampang terhadap *torsional properties* penampang, yaitu semakin besar ukuran penampang, semakin besar pula *torsional properties*-nya didapatkan. Hal ini akan mempengaruhi besaran kapasitas penampang dalam menahan tekuk torsi akibat gaya aksial tekan yang bekerja pada kolom baja. Untuk profil baja tunggal IWF dan Kanal lebih cocok dipilih untuk menahan gaya aksial tekan daripada profil baja tunggal T dan Siku Tunggal. Hal ini dipengaruhi besaran *torsional properties*-nya: letak pusat geser (X_0, Y_0), konstanta Torsi (J), dan konstanta pilin (C_w).

Saran untuk kelanjutan dari analisis yang dapat dikembangkan untuk menganalisis *torsional properties* penampang profil baja adalah menganalisis bentuk penampang lainnya, termasuk struktur penampang tersusun yang merupakan gabungan dari beberapa profil baja tunggal. Selain itu, dapat juga dilanjutkan dengan menganalisisnya sampai mendapatkan besaran nilai tegangan tekuk elastis torsi dan tegangan kritis dari setiap bentuk penampang untuk mengembangkan pemahaman yang lebih mendalam tentang tekuk torsi akibat gaya aksial tekan pada struktur baja.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. 2020. *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. SNI 1729-2020. Jakarta.
- CISC. 2002. *Torsional Section Properties of Steel Shapes*. Canadian Institute of Steel Construction, Willowdale, Ont.
- Galambos, T.V., Earls, C.J. and Gross, J.L., 1997. *Required Properties of High-Performance Steels*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Gunawan, R., Morisco. 1987. *Tabel Profil Konstruksi Baja*. Kanisius, Yogyakarta.
- Hughes, A.F., Iles, D.C. and Malik, A.S., 2011. *Design of Steel Beams in Torsion*. London: SCI Assesment.
- Kraus, M. and Kindmann, R., 2009. *St. Venants Torsion Constant of Hot Rolled Steel Profiles and Position of The Shear Centre*. In Proceedings of 11th Nordic Steel Construction Conference (NSCC), Malmö, Sweden (pp. 454-461).
- Romano, G., Barretta, A. and Barretta, R., 2012. *On Torsion and Shear of Saint-Venant Beams*. European Journal of Mechanics-A/Solids, 35, pp.47-60.
- Setiawan, A., 2008. *Perencanaan Struktur Baja Dengan Metode LRFD*. Jakarta: Erlangga.
- Seaburg, P.A. and Carter, C.J., 2003. *Torsional Analysis of Structural Steel Members*. American Institute of Steel Construction.
- Specification, A.I.S.C., 2005. *Specification for Structural Steel Buildings*. ANSI/AISC, 36010.
- White, D.W. and Jung, S.K., 2003. *Simplified Lateral-Torsional Buckling Equations for Singly-Symmetric I-Section Members*. Structural Engineering, Mechanics and Materials Report, (24b).