

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Balok

Balok adalah gabungan dari elemen tarik dan elemen tekan, apabila dikategorikan dari bahannya balok terbagi menjadi empat, balok beton, balok kayu, balok komposit dan balok baja. Dengan seiring perkembangan zaman, kini balok kayu sudah sangat jarang digunakan untuk menjadi balok struktur karena sulitnya dalam mencari kualitas kayu terbaik dengan harga yang lebih terjangkau. Oleh karena itulah penggunaan balok kayu sudah sangat jarang digunakan dan mulai beralih pada penggunaan balok komposit atau balok baja (G. Salmon et al., 1997).

Balok umumnya dipandang sebagai batang yang utamanya memikul beban gravitasi transversal, termasuk momen ujung. Balok pada struktur dapat disebut sebagai gelagar (biasanya balok terpenting dengan jarak antara yang lebar), balok anak (*joist*/biasanya balok yang kurang penting dengan jarak antara yang rapat dan sering berbentuk rangka batang), gording (balok atap yang membentang antara rangka batang), balok dawai (*stringer*/balok jembatan longitudinal yang membentang antara balok-balok lantai), rusuk (*girt*/balok horisontal pada dinding yang terutama dipakai menahan momen lentur akibat angin pada sisi bangunan industri, umumnya menyanggah dinding seng/baja gelombang) dan balok ambang (*lintels*/batang yang menyanggah dinding di atas lubang jendela atau pintu). Istilah lain seperti “*header*”, “*trimmer*” dan “*rafter*” kadang-kadang dipakai, tetapi identifikasi balok dengan istilah ini tidak berlaku umum (G. Salmon et al., 1997).

2.2 Carbon Steel

Menurut Ir. Oentoeng (2000), menyatakan bahwa *Carbon Steel* merupakan baja yang elemen-elemennya terdiri dari:

1. 1,70% Karbon
2. 1,65% *Manganese*
3. 0,60% *Silicon*
4. 0,60% *Copper*

Karbon dan *Manganese* merupakan produk yang digunakan untuk meningkatkan tegangan dari suatu baja murni namun penggunaan karbon dan *manganese* dapat mengurangi nilai daktilitasnya (*ductility*) (Oentoeng, 2000).

Secara umum baja dikategorikan berdasarkan materialnya seperti material baja dari *Ingot Iron* (baja bongkah) tanpa carbon sama sekali, sampai *Cast Iron* (baja tuang) yang memiliki karbon sekurang-kurangnya 1,70%. Baja dibagi menjadi 4 kategori (berdasarkan karbon yang terkandung) (Oentoeng, 2000):

1. *Low Carbon* (mengandung karbon kurang dari 0,15%)
2. *Mild Carbon* (mengandung karbon kurang dari 0,15%-0,29%)
3. *Medium Carbon* (mengandung karbon kurang dari 0,30%-0,59%)
4. *High Carbon* (mengandung karbon 0,60%-1,70%)

Dan untuk baja yang biasa digunakan pada sektor konstruksi termasuk kedalam kategori *mild carbon* (Oentoeng, 2000).

2.2.1 Sifat Mekanis Baja

Apabila mengacu kepada SNI 03-1729-2002 terdapat ketentuan mengenai sifat-sifat mekanis baja seperti pada tabel berikut ini:

Tabel 2. 1 Sifat-sifat Mekanis Baja Menurut (SNI 03-1729, 2002)

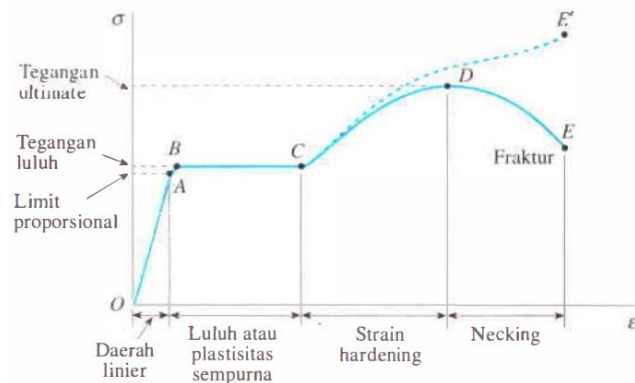
Jenis Baja	Kuat Tarik Maximum, f_u (Mpa)	Kuat Leleh Minimum, f_y (Mpa)	Peregangan Minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

Adapun sifat-sifat mekanis baja struktural lainnya sebagai berikut:

1. Modulus Elastisitas $E = 200.000$ Mpa
2. Modulus Geser $G = 80.000$ Mpa
3. Nisbah Poisson $\mu = 0,3$
4. Koefisien Pemuaian $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ per °C

2.2.2 Kurva Tegangan-Regangan

Diagram tegangan-regangan merupakan karakteristik dari bahan yang diuji dan memberikan informasi penting mengenai besaran mekanis dan jenis perilaku.



Gambar 2. 1 Kurva Tegangan-Regangan (M Gere & P Timoshenko, 1996)

Titik-titik penting pada gambar diatas membagi kurva tegangan-regangan menjadi beberapa daerah sebagai berikut (M Gere & P Timoshenko, 1996) :

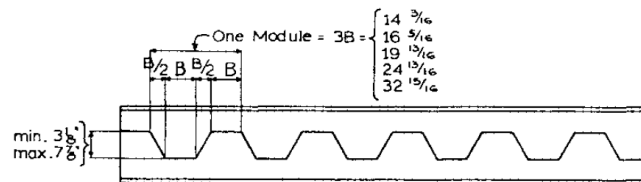
1. Daerah linear atau juga disebut dengan proporsional merupakan garis lurus yang dimulai dari pusat sumbu O menuju ke titik A . Kemiringan dari bagian kurva ini disebut juga sebagai Modulus Elastisitas atau *Modulus Young*, E .
2. Daerah Luluh atau plastis sempurna dimulai dari titik A ke titik B hingga menuju ke titik C . Ketika melewati titik A , proporsionalitas antara tegangan dan regangan tidak terjadi lagi, sehingga tegangan pada titik A disebut dengan limit proporsional. Untuk baja berkarbon rendah, limit ini memiliki rentang mulai dari 210 Mpa hingga 350 Mpa, akan tetapi untuk baja dengan kandungan karbon yang lebih tinggi ditambah dengan unsur paduan lain dapat mencapai batas proporsional lebih dari 550 Mpa. Sampai pada titik B kurva tersebut menjadi horizontal. Mulai dari titik ini, terjadi perpanjangan yang cukup besar tanpa adanya penambahan gaya tarik dari titik B ke titik C . Fenomena ini disebut dengan luluh dari bahan, dan titik B disebut dengan titik luluh.
3. Daerah *Strain Hardening* atau disebut juga dengan pengerasan regang. Deformasi yang terjadi pada daerah *strain hardening* membutuhkan peningkatan beban tarik, sehingga kurva tegangan-regangan mempunyai

kemiringan positif dari C ke D. Dan pada akhirnya batang tersebut mencapai kekuatan maksimumnya dan tegangan di titik D disebut dengan Tegangan Ultimit.

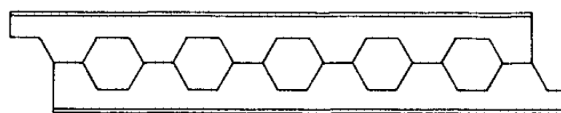
4. Daerah *Necking* merupakan daerah pada batang yang mulai mengalami pengecilan pada bagian badannya, dan pada daerah ini apabila dilakukan penarikan batang lebih lanjut dapat menyebabkan batang mengalami putus/patah di suatu titik seperti pada titik E.

2.3 *Castellated Beam*

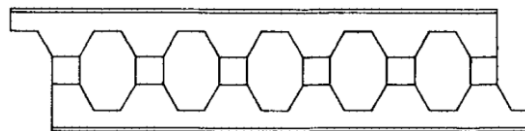
Castellated Beam merupakan nama yang biasa digunakan untuk jenis profil IWF yang diperluas bagian badannya. *Castellated Beam* dibuat dengan memperluas bentuk profil IWF standar dengan cara membuat pola pemotongan teratur pada badan profil, lalu dari pola pemotongan tersebut diangkat salah satu bagian badannya, dan salah satu bagian badan tersebut disesuaikan antar pertemuannya, kemudian untuk menyambung antar pertemuannya dilakukan pengelasan. *castellated* berarti "dibangun seperti kastil, memiliki benteng, atau lubang di dinding, seperti kastil" (Boyer, 1964).



a. Pola Pemotongan *Castellated Beam*



b. Penggambaran *Castellated Beam Without Plate Spacer*



c. Penggambaran *Castellated Beam With Plate Spacer*

Gambar 2. 2 Proses Pembentukan *Castellated Beam* (Boyer, 1964)

Dibandingkan dengan profil IWF, *hexagonal beam* dan *circular beam* menawarkan banyak keuntungan desain dan konstruksi. Sebagai hasil dari perluasan badan profil, profil ini memiliki beberapa keuntungan seperti peningkatan rasio kedalaman terhadap berat, modulus penampang yang meningkat

dan momen inersia yang meningkat. Peningkatan ini tidak hanya memungkinkan bentang yang lebih panjang, tetapi peningkatan efisiensinya juga memberikan potensi penghematan biaya yang signifikan bila digunakan dalam bentang yang panjang (Fares et al., 2016).

Selain keuntungan yang didapatkan terdapat pula beberapa kekurangan akibat modifikasi badan pada profil IWF dan menurut (Grinnbauer, 2001) dalam (Saputro, 2014), profil *castellated beam* kurang tahan api. Sehingga harus ditambah lapisan tahan api 20% lebih tebal agar mencapai ketahanan yang sama dengan profil awalnya dan profil *castellated beam* kurang kuat dalam menerima gaya lateral, sehingga perlu diberi satu atau lebih *plate* pada ujung-ujung (dekat dengan pertemuan balok-kolom).

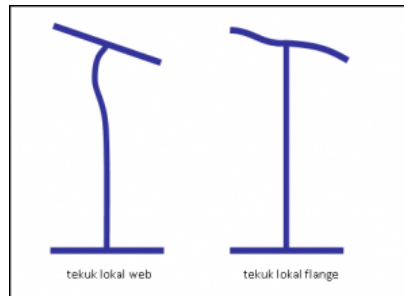
2.3.1 Pola Kegagalan *Castellated Beam*

Akibat adanya perluasan pada bagian badan profil IWF, terdapat beberapa pola kegagalan yang dapat terjadi pada *castellated beam*, yaitu:

1. Tekuk Lokal

Tekuk Lokal merupakan pola kegagalan yang diakibatkan oleh kelangsingan komponen penampang lebih besar dari batas kelangsingan yang telah ditetapkan. Tekuk lokal dapat menyebabkan kegagalan dini pada keseluruhan penampang atau paling sedikit dapat menyebabkan tegangan menjadi tidak merata dan mengurangi kekuatan keseluruhan (Yuliatni, 2007).

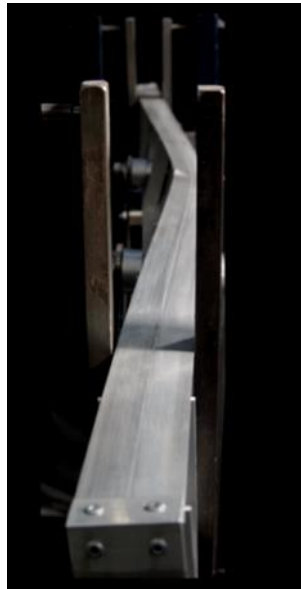
Tekuk lokal sayap (*flange local buckling*), tekuk ini dipengaruhi oleh rasio kelangsingan pelat sayap ($b_f/2t_f$) dimana b_f merupakan lebar sayap dan t_f merupakan ketebalan sayap dan untuk tekuk lokal badan balok (*web local buckling*), tekuk ini dipengaruhi oleh rasio kelangsingan pelat badan (h/t_w) dimana h merupakan tinggi total profil bersih dan t_w merupakan ketebalan badan (Yuliatni, 2007).



Gambar 2. 3 Tekuk Lokal (Saputro, 2014)

2. Tekuk Torsi Lateral

Tekuk torsi lateral biasanya terjadi pada balok dengan bentangan panjang tanpa adanya sokongan lateral yang memadai untuk menahan tekan pada sayap (Nethercort, 1982) dalam (Ulum et al., 2018).



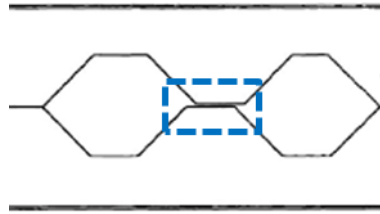
Gambar 2. 4 Tekuk Torsi Lateral

3. Kegagalan Akibat Beban Terpusat

Pada balok *castellated beam* yang diberikan beban terpusat pada salah satu bagian sayap harus memiliki proporsi yang cukup untuk menghindari terjadinya tekuk lokal pada sayap dan luluh lokal pada badan (Situmorang, 2017).

4. Putusnya Sambungan Las

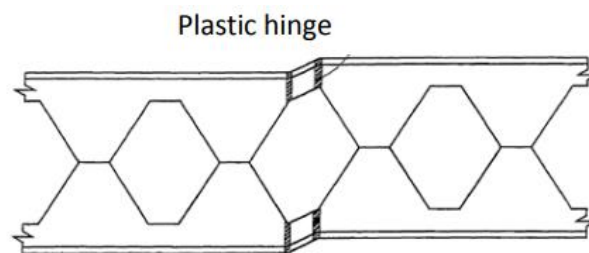
Las pada jarak antara lubang yang satu dengan yang lainnya (e) dapat mengalami putus ketika tegangan geser horisontal melebihi kekuatan leleh dari pengelasannya (Nethercort, 1982) dalam (Ulum et al., 2018).



Gambar 2. 5 Putusnya Sambungan Las

5. Lentur *Vierendeel* atau *Shear Mechanism*

Lentur *vierendeel* merupakan pola kegagalan yang disebabkan oleh perpindahan gaya geser melintasi bukaan agar konsisten dengan laju perubahan momen lentur sepanjang balok. Lentur *vierendeel* terjadi dengan terbentuknya sendi plastis pada empat lokasi di sekitar bukaan pada daerah geser tinggi (Knowles, P.R, (1991) dalam (Swastika, 2015).



Gambar 2. 6 Lentur *Vierendeel* (Knowles, P.R, (1991) dalam (Swastika, 2015)

6. *Web Post Buckling*

Web post buckling yang berada diantara bukaan terjadi akibat gaya geser horisontal yang melewati daerah badan diantara bukaan (Durif et al., 2021).



Gambar 2. 7 *Web Post Buckling* (Durif et al., 2021)

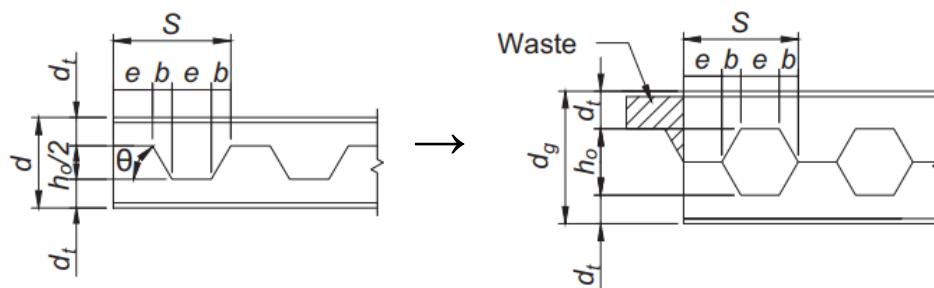
2.3.2 Hexagonal Beam

Hexagonal beam merupakan profil baja IWF yang dimodifikasi sehingga mempunyai bukaan berbentuk segi enam. *Hexagonal beam* terbentuk dari profil baja IWF yang mengalami proses pemotongan pada bagian badan profil dengan pola zig-zag, salah satu bagian yang telah dipotong lalu diangkat dan disatukan bagian badannya dan terakhir dilakukan pengelasan pada bagian badan yang menempel. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan tinggi dari profil awal (h) dengan tinggi potongan yang ada (d) (Situmorang, 2017).

Dalam perencanaan dan perhitungan *castellated beam* terdapat beberapa spesifikasi desain yang memengaruhi kekuatan dan tegangan yang timbul pada *castellated beam* antara lain: lebar pemotongan (e), sudut pemotongan (ϕ), tinggi pemotongan (h_o), tinggi profil (d_g), distribusi dan jumlah lubang (n), serta panjang bentang profil (Hutami et al., 2020).

Berdasarkan Fitri Rohmah Widayanti (2012) dalam (Putri Rahayu, 2016) bahwa untuk tinggi profil *castellated beam* sebaiknya tidak melebihi 50% dari tinggi profil sebelum dibuat *castellated beam*, hal tersebut dilakukan untuk menghindari geser, lentur dan *buckling* yang terlalu ekstrim.

Apabila mengacu kepada AISC *Design Guide-31* terdapat beberapa batasan parameter desain yang harus diikuti untuk mendesain *castellated beam* dengan bukaan *hexagonal*. Berikut merupakan panduan perencanaan bukaan *castellated beam* berdasarkan AISC *Design Guide-31* :



Gambar 2. 8 *Hexagonal Beam* (Fares et al., 2016)

a. Batasan Geometri

$$e \geq 76,2 \text{ mm} \quad (2.1)$$

$$\frac{e}{t_w} < 30 \quad (2.2)$$

$$\frac{h_o}{e} < 8 \quad (2.3)$$

$$62^\circ \geq \phi \geq 58^\circ \quad (2.4)$$

b. Perencanaan Geometri

$$b = 0,5 \times \frac{h_o}{\tan \phi} \quad (2.5)$$

$$h = d - 2 \times d_t \quad (2.6)$$

$$d_g = h_o + 2 \times d_t \quad (2.7)$$

$$S = 2 \times e + 2 \times b \quad (2.8)$$

Keterangan :

d = Tinggi Profil IWF Awal

d_t = Tinggi *Tee Section*

d_g = Tinggi Bersih *Castellated Beam*

ϕ = Sudut Pemoongan

e = Panjang *Tee Section*

b = Jarak Mendatar Potongan

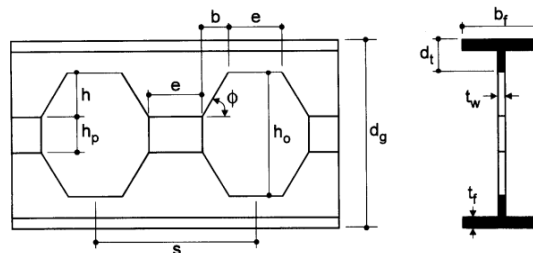
S = Jarak Antar Bukaan

h_o = Tinggi Lubang *Castellated Beam*

h = Setengah Tinggi Bukaan *Castellated Beam*

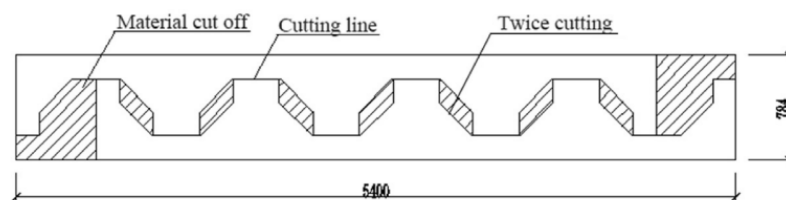
2.3.3 Octagonal Beam

Jenis *castellated beam* lainnya adalah profil IWF dengan bukaan segi delapan yang dapat dihasilkan dengan menambahkan pelat baja tambahan di antara dua bagian *tee section*, pelat baja ini disebut “*Plate Spacer*” (Zaarour et. Al (1996) dalam (Al-Thabhawee & Mohammed, 2019).



Gambar 2. 9 *Octagonal Beam* (Zaarour & Redwood, 1996)

Selain penambahan *plate spacer* pembuatan *castellated beam* dengan bukaan segi delapan juga dapat dilakukan dengan pola pemotongan zig-zag seperti *castellated beam* dengan bukaan segi enam, namun belum ada yang membuat panduan secara pasti mengenai pola pemotongan *castellated beam* dengan bukaan segi delapan (Liu et al., 2020).



Gambar 2. 10 Pola Pemotongan *Octagonal Beam* (Liu et al., 2020)

2.4 Properti *Castellated Beam*

Dikarenakan adanya modifikasi yang dilakukan pada profil IWF maka diperlukannya perhitungan properti penampang *castellated beam*. Nantinya perhitungan properti penampang tersebut digunakan sebagai acuan dalam mendesain *castellated beam*.

2.4.1 Momen Inersia

Momen inersia atau disebut juga sebagai momen kedua (*second moment*) dari sebuah area penampang yang dapat digunakan untuk memprediksi kemampuan balok dalam menahan lentur dan defleksi. Defleksi balok akibat beban tidak dipengaruhi oleh beban saja, tetapi juga pada geometri dari penampang melintang balok. Hal tersebutlah yang menyebabkan balok dengan momen inersia yang lebih tinggi, seperti balok IWF seringkali digunakan pada konstruksi bangunan.

1. Momen Inersia (I_x) Tanpa lubang

$$I_x = \left(\frac{1}{12} \times b_f \times d_g^3 \right) - \left(\frac{1}{12} \times (b_f - t_w) \times (d_g - 2 \times t_f)^3 \right) \quad (2.9)$$

2. Momen Inersia (I_x) Dengan Lubang

$$I_x = I_x \text{ Tanpa Lubang} - \left(\frac{1}{12} \times t_w \times h_o^3 \right) \quad (2.10)$$

3. Momen Inersia (I_y) Tanpa lubang

$$I_y = 2 \left(\frac{1}{12} \times t_f \times b_f^3 \right) + \left(\frac{1}{12} \times (d_g - 2 \times t_f) \times (t_w)^3 \right) \quad (2.11)$$

4. Momen Inersia (I_y) Dengan Lubang

$$I_y = I_y \text{ Tanpa Lubang} - \left(\frac{1}{12} \times h_o \times t_w^3 \right) \quad (2.12)$$

2.4.2 Jari-Jari Girasi

Jari-jari girasi merupakan suatu jarak yang menunjukkan distribusi massa atau area dari profil tersebut.

1. Luasan Penampang (A)

$$A = (2 \times b_f \times t_f) + (d_g \times t_w) - (h_o \times t_w) \quad (2.13)$$

2. Jari-Jari Girasi Sumbu-x (r_x)

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (2.14)$$

3. Jari-Jari Girasi Sumbu-y (r_y)

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (2.15)$$

2.4.3 Elastic Section Modulus

Elastic section modulus merupakan salah satu properti dari profil yang berkaitan dengan kekuatan dan kekakuan balok dan secara khusus berhubungan dengan momen inersia.

$$S_x = \frac{I_x}{\frac{1}{2} \times d_g} \quad (2.16)$$

2.4.4 Plastic Section Modulus

1. *Plastic Section Modulus* (z_x) Tanpa Lubang

$$z_x = \left(\frac{1}{4} \times b_f \times d_g^2 \right) - \left(2 \times \frac{1}{4} \times \left(\frac{b_f - t_w}{2} \right) \times (d_g - 2 \times t_f)^2 \right) \quad (2.17)$$

2. *Plastic Section Modulus* (z_x) Dengan Lubang

$$z_x = z_x \text{ Tanpa lubang} - \left(\frac{1}{4} \times t_w \times h_o^2 \right) \quad (2.18)$$

2.5 Kontrol Terhadap Tekuk Lokal

2.5.1 Batasan Momen

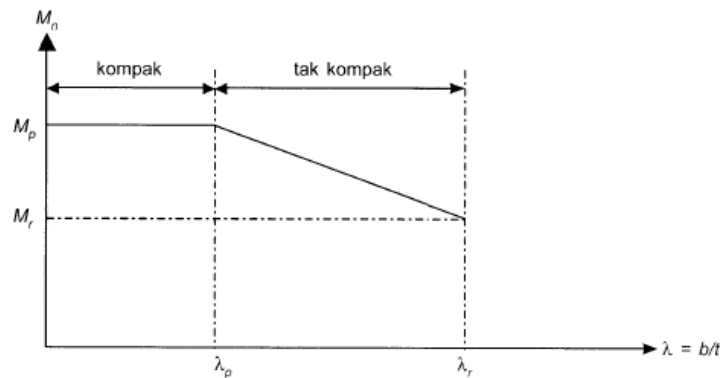
Momen leleh M_y adalah momen lentur yang menyebabkan penampang mulai mencapai kuat leleh yaitu diambil sama dengan f_y dan S_x adalah modulus penampang elastis. Perhitungan modulus elastis dan plastis harus dilakukan secermat mungkin dengan memperhitungkan adanya lubang-lubang sehingga tahanan lentur yang dihasilkan berada dalam batas-batas ketelitian yang dapat diterima (SNI 03-1729, 2002).

Tahanan lentur plastis M_p momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mencapai kuat leleh harus diambil yang lebih kecil dari $f_y \times Z_x$ atau $1,5 \times M_y$, dan Z_x adalah modulus penampang plastis. Momen batas tekuk M_r , diambil sama dengan $S_x \times (f_y \times F_r)$ dan F_r merupakan tegangan sisa (SNI 03-1729, 2002).

2.5.2 Kategori Kelangsingan Penampang

Penampang kompak, tak-kompak dan langsing merupakan suatu komponen struktur yang memikul lentur dan ditentukan oleh perbandingan lebar terhadap tebal ($\lambda = b/t$). Hal yang harus diperhatikan dalam mengecek kelangsingan penampang yaitu, penampang dapat dikategorikan sebagai penampang kompak apabila rasio

perbandingan lebar terhadap tebal antara sayap dan badan harus memasuki kategori penampang kompak, apabila hanya sayap atau badan yang masuk kedalam kategori penampang kompak maka penampang tersebut tidak dapat dikategorikan sebagai penampang kompak (Setiawan, 2008).



Gambar 2. 11 Kategori Kelangsingan Penampang (Setiawan, 2013)

Untuk Sayap,

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2 \times t_f} \quad (2.19)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.20)$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.21)$$

Dan untuk Badan,

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{d - 2 \times t_f - 2r}{t_w} \quad (2.22)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.23)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.24)$$

Keterangan :

λ = Rasio Ketebalan Terhadap Lebar

λ_p = Batasan Rasio Tebal-Lebar Profil Kompak

λ_r = Batasan Rasio Tebal-Lebar Profil Non-Kompak

- f_y = Tegangan Leleh
 b_f = Lebar Sayap
 t_f = Tebal Sayap
 t_w = Tebal Badan
 r = Radius Kelengkungan Pertemuan Sayap dan Badan
 D = Tinggi Profil
 h = Tinggi Badan Profil Bersih

1. Penampang Kompak

Untuk klasifikasi penampang kompak profil IWF ditentukan apabila $\lambda \leq \lambda_p$, untuk penampang kompak tahanan lentur nominal yaitu,

$$M_n = M_p = f_y \times Z_x \quad (2.25)$$

Keterangan :

- f_y = Tegangan Leleh Baja
 M_n = Momen Lentur Nominal
 M_p = Momen Lentur Plastis
 Z_x = Modulus Penampang Plastis

2. Penampang Tak-Kompak

Untuk penampang profil IWF yang memenuhi $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, tahanan lentur nominal penampang ditentukan sebagai berikut:

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \frac{\lambda - \lambda_r}{\lambda_r - \lambda_p} \leq M_p \quad (2.26)$$

$$M_r = 0,7 \times F_y \times S_x \quad (2.27)$$

Keterangan :

- M_n = Momen Lentur Nominal
 M_p = Momen Lentur Plastis
 M_r = Momen Batas Tekuk
 f_y = Tegangan Leleh Baja
 S_x = Modulus Penampang Elastis

3. Penampang Langsing

Untuk pelat sayap yang memenuhi $\lambda \geq \lambda_r$, tahanan lentur nominal penampang ditentukan sebagai berikut:

$$M_n = \frac{0,9 \times E \times k_c \times S_x}{\lambda^2} \leq M_p \quad (2.28)$$

$$K_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \quad (2.29)$$

$$0,35 \leq K_c \leq 0,76 \quad (2.30)$$

Keterangan :

M_n = Momen Lentur Nominal

E = Modulus Elastisitas Baja

S_x = Modulus Penampang Elastis

h = Tinggi Badan Profil Bersih

t_w = Tebal Badan

Untuk pelat badan yang memenuhi $\lambda \geq \lambda_r$, tahanan lentur nominal penampang ditentukan sebagai berikut:

$$M_n = K_g \times S_x \times F_{cr} \leq M_p \quad (2.31)$$

$$K_g = 1 - \left[\frac{a_r}{1200+300 \times a_r} \right] \times \left[\frac{h}{t_w} - \frac{2550}{\sqrt{F_{cr}}} \right] \quad (2.32)$$

Keterangan :

F_{cr} = Tegangan Kritis

S_x = Modulus Penampang Elastis

K_g = Koefisien Balok Pelat Berdinding Penuh

a_r = Perbandingan Luas Pelat Badan Terhadap Pelat Sayap Tekan

d_g = Tinggi Bersih Badan Balok

2.6 Kontrol Terhadap Tekuk Torsi Lateral

Untuk meninjau atau memperkirakan apakah profil mengalami kegagalan tekuk torsi lateral maka dilakukan analisis dengan berdasarkan SNI 1729-2015.

Dimana:

$$L_p = 1,76 \times r_y \times \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.33)$$

$$L_r = 1,95 \times r_{ts} \times \frac{E}{0,7 \times f_y} \times \sqrt{\frac{J \times c}{S_x \times h_b} + \sqrt{\left(\frac{J \times c}{S_x \times h_b}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 \times f_y}{E}\right)^2}} \quad (2.34)$$

Dengan,

$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y \times C_w}}{S_x} \quad (2.35)$$

$$C_w = \frac{I_y \times h_b^2}{4} \quad (2.36)$$

$$J = \frac{1}{3} \times (2b_f \times t_f^3 + h_b \times t_w^3) \quad (2.37)$$

Keterangan:

r_y = Jari-Jari Girasi Balok Diarah Sumbu Lemah (Sumbu-y)

E = Modulus Elastisitas Baja

L_b = Panjang Bentangan

L_r = Nilai Batas Tekuk Torsi Lateral Elastis

L_p = Nilai Batas Tekuk Torsi Lateral Inelastis

r_{ts} = Jari-Jari Girasi Efektif Balok.

J = Konstanta Torsi

S_x = Modulus Penampang Elastis Sumbu-X

h_b = Jarak Antara Titik Berat Pelat Sayap Atas Dan Bawah = $d_g - t_f$

I_y = Momen Inersia Penampang Sumbu-y

C_w = Konstanta Puntir

d_g = Tinggi Penampang Balok

b_f = Lebar Pelat Sayap

t_f = Tebal Pelat Sayap

t_w = Tebal Pelat Badan

Dalam SNI 1729, 2015 terdapat 3 kategori tekuk torsi lateral, yaitu:

2.6.1 Plastis Sempurna ($L_b \leq L_p$)

Untuk plastis sempurna memiliki batasan, dimana nilai L_b tidak boleh lebih besar atau sama dengan nilai L_p , dan pada kategori ini tekuk torsi lateral belum terjadi dan apabila batasan ini terpenuhi maka rumus yang digunakan untuk mencari nilai momen nominal, yaitu :

$$M_n = M_p = f_y \times Z_x \quad (2.38)$$

Keterangan :

f_y = Tegangan Leleh

Z_x = Modulus Penampang Plastis

2.6.2 Tekuk Torsi Lateral Inelastis ($L_p < L_b \leq L_r$)

Tekuk torsi lateral inelastis memiliki batasan, dimana nilai L_p tidak boleh lebih besar dari nilai L_b dan nilai L_b tidak boleh lebih besar atau sama dengan nilai L_r .

Pada kategori ini balok telah mengalami tekuk torsi lateral dan kegagalan yang terjadi pada profil tersebut tidak dapat kembali ke bentuk semula, dan apabila batasan ini terpenuhi maka rumus yang digunakan untuk mencari nilai momen nominal, yaitu :

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0,7 \times F_y \times S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (2.39)$$

Keterangan :

M_n = Momen Nominal Penampang

M_p = Momen Plastis Penampang

C_b = Faktor Koreksi Momen Nominal Terhadap Tekuk Torsi-Lateral

f_y = Tegangan Leleh

S_x = Modulus Penampang Elastis

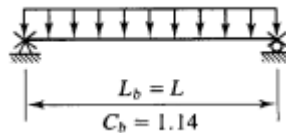
L_b = Panjang Bentangan

L_r = Nilai Batas Tekuk Torsi Lateral Elastis

L_p = Nilai Batas Tekuk Torsi Lateral Inelastis

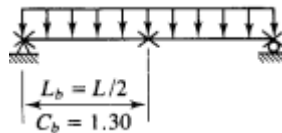
Untuk nilai C_b merupakan faktor koreksi momen nominal terhadap tekuk torsi lateral yang digunakan untuk menyeragamkan gaya momen yang terjadi, sehingga nilai momen nominal yang mampu menyebabkan kegagalan tekuk torsi lateral memiliki besaran yang sama. Apabila mengacu kepada SNI 1729:2015 terdapat rumus yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai C_b , namun untuk nilai C_b pada balok dengan tumpuan sederhana dapat mengacu kepada nilai yang telah ditetapkan pada buku *Steel Design* karya William T. Segui, berikut ini merupakan nilai C_b yang terlampir pada buku *Steel Design* karya William T. Segui:

1. Balok sederhana memikul beban merata dengan sokongan lateral hanya diperletakkannya memiliki nilai $C_b = 1,14$.



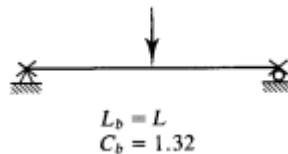
Gambar 2. 12 Nilai C_b Untuk Beban Merata, 2 Sokongan Lateral (Segui, 2007)

2. Balok sederhana memikul beban merata dengan sokongan lateral diperletakkan dan ditengah bentangan memiliki nilai $C_b = 1,30$.



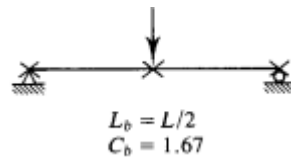
Gambar 2. 13 Nilai C_b Untuk Beban Merata, 3 Sokongan Lateral (Segui, 2007)

3. Balok sederhana memikul beban terpusat dengan sokongan lateral hanya diperletakkan memiliki nilai $C_b = 1,32$.



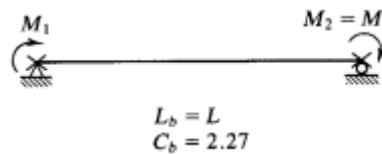
Gambar 2. 14 Nilai C_b Untuk Beban Terpusat, 2 Sokongan Lateral (Segui, 2007)

4. Balok sederhana memikul beban terpusat dengan sokongan lateral diperletakkan dan ditengah memiliki nilai $C_b = 1,67$.



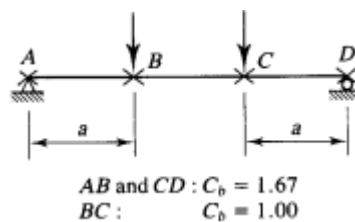
Gambar 2. 15 Nilai C_b Untuk Beban Terpusat, 3 Sokongan Lateral (Segui, 2007)

5. Balok sederhana memikul momen seragam diujungnya dengan sokongan lateral hanya diperletakan memiliki nilai $C_b = 2,27$.



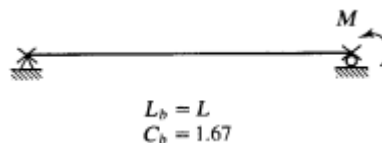
Gambar 2. 16 Nilai C_b Untuk Beban Momen, 2 Sokongan Lateral (Segui, 2007)

6. Balok sederhana memikul beban terpusat dengan sokongan lateral diperletakan dan dilokasi beban memiliki nilai $C_b = 1,67$ dan $C_b = 1$.



Gambar 2. 17 Nilai C_b Untuk Beban Terpusat, 4 Sokongan Lateral (Segui, 2007)

7. Balok sederhana memikul momen disalah satu ujungnya dengan sokongan lateral hanya diperletakan memiliki nilai $C_b = 1,67$.



Gambar 2. 18 Nilai C_b Untuk Momen, 2 Sokongan Lateral (Segui, 2007)

2.6.3 Tekuk Torsi Lateral Elastis ($L_b > L_r$)

Tekuk torsi lateral elastis memiliki batasan, dimana nilai L_b lebih besar dari nilai L_r . Pada kategori ini balok telah mengalami tekuk torsi lateral dan kegagalan yang terjadi pada profil tersebut dapat kembali ke bentuk semula, dan apabila batasan ini terpenuhi maka rumus yang digunakan untuk mencari nilai momen nominal, yaitu:

$$M_n = F_{cr} \times S_x \leq M_p \quad (2.40)$$

Keterangan :

M_n = Momen Nominal Penampang

F_{cr} = Tegangan Kritis

S_x = Modulus Penampang Plastis

2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu *software* yang digunakan dalam menyelesaikan masalah teknik seperti perhitungan struktur, fluida, elektrik, statik, dinamik dan lain-lain dengan berdasarkan metode kekakuan yang disajikan dalam formulasi matriks (Fadillawaty, 2019).

Salah satu keunggulan dari penggunaan metode elemen hingga ialah mampu memodelkan berbagai macam bentuk struktur yang tidak beraturan, selain itu aspek non-linieritas dalam hal geometri maupun material. Material yang disebut dengan non-linear apabila sifat dari material memiliki fungsi dari kondisi tegangan atau regangan, termasuk elastisitas non-linear, plastisitas dan rangkai (Santoso et al., 2019).

Dan salah satu kesulitan pada metode elemen hingga ialah penentuan syarat-syarat batas yang sebenarnya dapat diatasi dengan membagi sebuah model menjadi bagian yang lebih kecil atau disebut dengan elemen, sehingga solusi dalam tiap bagian kecil dapat dinyatakan dalam fungsi yang jauh lebih sederhana daripada fungsi untuk keseluruhannya (Santoso et al., 2019). Terdapat beberapa jenis *software* yang berbasis metode elemen hingga diantaranya, Adina, SolidWorks, Ansys, Abaqus dan lain-lain. Salah satu metode elemen hingga yang akan digunakan pada penelitian ini ialah Abaqus.

Abaqus merupakan suatu *software* khusus yang didesain untuk menganalisis suatu desain struktur dengan metode pendekatan. Abaqus CAE dapat melakukan pemodelan serta analisis secara *linear* mulai dari analisis yang paling sederhana hingga analisis *non-linear* yang memiliki kondisi penampang yang kompleks dan rumit (Arini & Pradana, 2021). Namun pada *software* abaqus tidak memiliki pengaturan atau penentuan satuan unit/ukuran yang ditetapkan, sehingga pada saat pengoperasian abaqus harus menentukan sendiri satuan unit yang akan digunakan

dan penggunaan satuan unit haruslah konsisten karena apabila satuan unit yang digunakan tidak konsisten akan berdampak kepada konvergensi hasil analisis yang akan dilakukan, berikut ini merupakan tabel konsistensi satuan unit pada abaqus (Simulia, 2014).

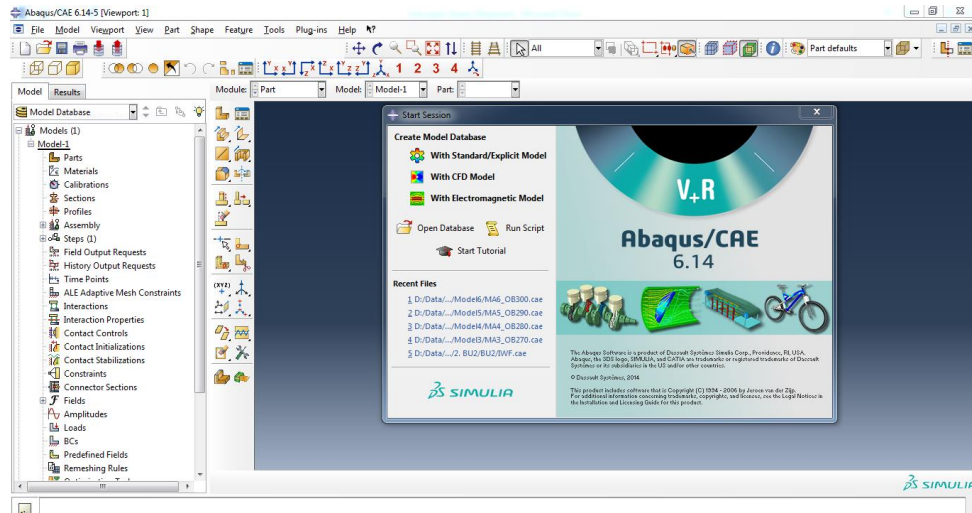
Tabel 2. 2 Ketentuan Satuan Unit di Abaqus

Quantity	SI	SI(mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	In
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s ² in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa	lbf/ft ²	psi
Energy	J	mJ	ft lbf	in lbf
Density	Kg/m ³	tonne/m ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Dan pada penelitian ini satuan unit yang akan digunakan ialah satuan SI (mm). *Software* abaqus sendiri memiliki lima jenis kategori yang peran serta fungsinya memiliki perbedaan satu sama lain, berikut ini merupakan lima jenis abaqus, yaitu (Simulia, 2014):

1. **Abaqus/Standard**, digunakan untuk keperluan secara general, jenis ini menyediakan kemampuan untuk menganalisis berbagai masalah termasuk non-struktural.
2. **Abaqus/Explicit**, digunakan dalam metode elemen hingga untuk benda yang lebih dinamis.
3. **Abaqus/CFD**, digunakan untuk menganalisis dinamika fluida tingkat lanjut.
4. **Abaqus/CAE**, digunakan untuk analisis yang lebih komplit, ruang lingkup abaqus/CAE untuk memodelkan, mengelola, memonitor analisa abaqus dan memvisualisasikan hasilnya.
5. **Abaqus/Viewer**, digunakan hanya untuk *postprocessing* dari modul *Visualization*.

Dan pada penelitian ini akan menggunakan jenis Abaqus/CAE dengan versi 6.14, Jenis Abaqus/CAE dipilih dikarenakan pada jenis tersebut memiliki fitur yang lebih komplit serta ruang lingkup yang lebih luas.



Gambar 2. 19 Tampilan Awal Abaqus 6.14

Pada *software* Abaqus/CAE memiliki 11 *module* yang memiliki fungsi berbeda-beda, namun dari kesebelas modul tersebut hanya 9 *module* saja yang sangat umum atau sering digunakan pada saat melakukan pemodelan dan analisis, berikut ini merupakan 9 *module* yang umum digunakan pada abaqus, yaitu (Simulia, 2014) :

1. *Module Part*

Untuk membuat model pada abaqus dapat memanfaatkan fitur *module part* pada *context bar*. *Module part* merupakan salah satu bagian dari abaqus yang digunakan untuk memodelkan benda yang akan dianalisis. Pada *module part* terdapat *toolbox area* yang berisikan beberapa tools yang dapat digunakan untuk membuat objek baru atau mengedit objek yang telah dibuat (Mardiansyah, 2012).

2. *Module Property*

Module property merupakan bagian dari abaqus yang fungsi utamanya digunakan untuk memasukkan sifat mekanis dari material atau bahan, jenis material dan beberapa spesifikasi teknis dari material yang ingin dianalisis. Modul ini merupakan syarat yang harus dilakukan sebelum berlanjut ke *module assembly* karena apabila tidak didefinisikan sifat mekanis dari suatu material maka program akan mengalami *error* (Mardiansyah, 2012).

3. *Module Assembly*

Module Assembly merupakan bagian dari abaqus yang berfungsi untuk merakit atau menggabungkan objek-objek individual yang mempunyai sistem koordinatnya masing-masing kemudian objek-objek tersebut digabungkan ke dalam suatu koordinat global dan kedudukan antara satu objek dengan objek yang lainnya diatur hingga menjadi satu model yang saling terhubung (Mardiansyah, 2012).

4. *Module Step*

Module step berfungsi untuk menentukan jenis analisis apa yang akan dilakukan serta untuk mengatur besaran beban yang diberikan selama proses *running* (Mardiansyah, 2012). Dan pada penelitian ini tipe analisis yang digunakan ialah *static, general (Nlgeometry)*.

5. *Module Interaction*

Module interaction berfungsi untuk menentukan bagian objek yang akan mengalami kontak terhadap material atau objek lain yang didefinisikan, selain itu modul ini juga berfungsi dalam memberikan perletakan pada bagian benda yang dianalisis agar tidak berpindah atau bergeser dari kedudukan awalnya (Mardiansyah, 2012).

6. *Module Load*

Module load berfungsi untuk menentukan jenis pembebanan apa yang akan diberikan dan untuk memasukan besaran beban/gaya yang akan diberikan, selain itu pada *module load* terdapat *tool Create Boundary Condition* yang dapat digunakan untuk menentukan jenis tumpuan apa yang akan digunakan (Mardiansyah, 2012). Namun pada *module load* ini akan berfokus kepada *tool create boundary condition* karena pada penelitian ini yang akan diatur besarnya ialah *displacement* bukan *load*.

7. *Module Mesh*

Module mesh berfungsi untuk melakukan diskretisasi pada objek atau membagi geometri objek yang dibuat menjadi suatu elemen dan nodal, selain itu pada modul ini dapat digunakan untuk menentukan jenis *mesh* serta mengotrol ukuran *mesh* yang akan digunakan pada objek (Mardiansyah, 2012).

8. *Module Job*

Module job berfungsi untuk melakukan proses *running* terhadap model yang telah dibuat. Setelah objek serta sifat mekanis yang telah dimasukan selesai selanjutnya *module job* akan melakukan proses penyelesaian secara numerik. Selama proses *running* pengguna dapat melihat pesan yang tertampil pada *windows message area* dari tampilan tersebut terdapat beberapa informasi seperti informasi mengenai *errors* yang terjadi serta informasi mengenai *warnings* (Mardiansyah, 2012).

9. *Module Visualization*

Module visualization berfungsi untuk menampilkan bentuk dari model yang telah melakukan proses *running*, selain itu pada *module visualization* digunakan untuk mengambil *output*/hasil dari *running* yang telah dilakukan (Mardiansyah, 2012).

2.8 Studi Terdahulu

Adapun studi terdahulu yang sudah meneliti lebih awal mengenai perilaku serta kapasitas balok IWF akibat adanya bukaan pada badan. Dari studi terdahulu tersebut digunakan sebagai studi literatur yang nantinya dapat dijadikan perbandingan pada skripsi ini. Berikut ini merupakan studi terdahulu yang diambil diantaranya :

Tabel 2. 3 Studi Terdahulu

No.	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	GAP Analysis	
				Penelitian Terdahulu	Penelitian Penulis
1	2020	Analisis Pengaruh Panjang Profil Terhadap Kekuatan Hexagonal Castellated Beam Dengan Metode Elemen Hingga	Hasil analisis menunjukkan bahwa baja dengan panjang profil lebih pendek menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi, baja dengan panjang profil lebih panjang cenderung mengalami tekuk ekstrim dan baja dengan profil lebih panjang gagal dalam kondisi baja belum mengalami kelelahan, sehingga kegagalan diakibatkan oleh kegagalan simetris	Perbandingan kekuatan maksimal <i>Hexagonal beam</i> dengan pengaruh variasi panjang profil. Menggunakan Profil IWF 200x100x5,5x8. analisis menggunakan abaqus	Perbandingan beban maksimal <i>Hexagonal Beam, Octagonal Beam</i> dengan variasi ketinggian <i>plate spacer</i> (h) dan beban maksimal yang mampu ditahan menggunakan elemen hingga. Menggunakan Profil IWF 150x75x5x7
2	2019	Besar Sudut Potongan Pada Balok Baja <i>Castellated beam</i> Terhadap Optimalisasi Tegangan Lentur	Dengan adanya penambahan besar sudut pemotongan profil pada balok kastela ada indikasi terjadi kerusakan geser pada penampang balok yang berlubang.	Membandingkan kemampuan <i>hexagonal beam</i> terhadap variasi besaran sudut pemotongan dengan meninjau momen, tegangan, lendutan dan <i>buckling</i> secara pengujian laboratorium.	Membandingkan profil IWF, <i>Hexagonal Beam, dan Octagonal Beam</i> dengan variasi tinggi <i>plate spacer</i> terhadap beban maksimal menggunakan metode elemen hingga.

No.	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	GAP Analysis	
				Penelitian Terdahulu	Penelitian Penulis
3	2019	Reinforcing The Octagonal Web Openings Of Castellated Beam By Steel Rings	Benda uji 1 IWF utuh dengan tinggi 140 mampu menahan beban 89 kN, benda uji 2 <i>Octagonal Beam</i> dengan tinggi 278,3 tanpa perkuatan mampu menahan beban 159 kN, dan benda uji 3 <i>octagonal beam</i> dengan perkuatan di sekitar bukaan nya mampu menahan 254 kN	Membandingkan antara profil IWF, <i>octagonal beam</i> tanpa perkuatan dan <i>octagonal beam</i> dengan perkuatan di area lubangnya. Penelitian dilakukan secara laboratorium dan metode elemen hingga	Membandingkan profil IWF, <i>Hexagonal Beam</i> , <i>Octagonal Beam</i> dengan variasi ketinggian terhadap beban yang mampu dipikul menggunakan Abaqus.
4	2017	Pengaruh Sudut Pemotongan Profil (\emptyset) Terhadap Kekuatan Lentur <i>Castellated Beam</i> Pada Bukaan <i>Rhomb</i> Untuk Struktur Balok	Optimalisasi <i>castellated beam</i> bila ditinjau dari momen didapat sudut pemotongan ($\emptyset = 60$). Sedangkan jika ditinjau dari tegangan, sudut pemotongan ($\emptyset = 60$) yang paling optimal. Namun dari pola runtuh yang terjadi, sudut pemotmhan ($\emptyset = 65$) yang paling optimal.	Membandingkan kemampuan <i>Rohmb Beam</i> terhadap variasi besaran sudut pemotongan dengan meninjau momen, tegangan dan pola keruntuhan secara pengujian laboratorium.	Membandingkan profil IWF, <i>Hexagonal Beam</i> dan <i>Octagonal Beam With Plate Spacer</i> dengan variasi tinggi <i>plate spacer</i> terhadap beban maksimal menggunakan metode elemen hingga
5	2017	Analisa Perbandingan <i>Celullar Beam</i> dan <i>Honeycomb Beam</i> dengan Program Ansys	Variasi parameter yang paling baik adalah D/Do dan S/Do = 1,08 untuk <i>honeycomb beam</i> . Untuk <i>Celullar Beam</i> D/Do = 1,6 dan S/Do = 1,28 yang lebih baik. Lalu dari perbandingan <i>Celullar Beam</i> dan <i>Honeycomb Beam</i> didapatkan bahwa <i>honeycomb beam</i> lebih baik.	Membandingkan variasi parameter D/Do dan S/Do yang paling optimal antara <i>honeycomb beam</i> dan <i>celullar beam</i> dengan menggunakan Ansys.	Membandingkan variasi h/tw terhadap beban yang paling optimal antara IWF, <i>Hexagonal Beam</i> dan <i>Octagonal beam</i> dengan menggunakan Abaqus.

No.	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	GAP Analysis	
				Penelitian Terdahulu	Penelitian Penulis
6	2016	Pengaruh Diameter Pemotongan Profil (D) Terhadap Kekuatan Lentur <i>Castellated Beam</i> Bukaan Lingkaran (<i>Circular</i>) Untuk Struktur Balok	Untuk menghindari kerusakan <i>buckling</i> yang lebih besar maka disarankan menggunakan diameter pemotongan profil (D) tidak melebihi diameter optimal (D=155mm)	membandingkan kekuatan lentur berdasarkan variasi diameter pemotongan profil (D) dengan pengujian laboratorium dan SAP 2000	membandingkan beban maksimal yang mampu ditahan profil IWF, <i>Hexagonal Beam</i> dan <i>Octagonal Beam</i> terhadap variasi <i>plate spacer</i> menggunakan Abaqus
7	2016	Pengaruh Tinggi Pemotongan Profil (H) Terhadap Kekuatan Lentur <i>Castellated Beam</i> Bukaan Belah Ketupat (<i>Rhomb</i>) Untuk Struktur Balok	Tinggi pemotongan profil (H) 45 mm dengan lebar pemotongan (e) 10 mm, memiliki momen lentur terbesar yaitu 450,45 kN.m dan tegangan lentur terbesar yaitu 356.17 N/mm ² . sedangkan, tinggi pemotongan profil (H) 65 mm dengan lebar pemotongan (e) 50 mm memiliki momen lentur terbesar yaitu 450.45 kN.m dan tegangan lentur terbesar yaitu 391.05 N/mm ²	Membandingkan tinggi pemotongan profil dengan lebar pemotongan e=10 mm dan e=50 mm dengan pengujian laboratorium terhadap momen lentur dan tegangan lentur.	Membandingkan variasi tinggi <i>plate spacer</i> pada <i>octagonal beam</i> terhadap beban maksimal yang mampu dipikul menggunakan metode elemen hingga abaqus
8	2014	Analisa Perbandingan Model Keruntuhan Profil <i>Hexagonal</i> dan <i>Circular Castellated Beam</i> dengan Program FEA	Pemodelan dan analisa keruntuhan balok <i>castellated beam</i> menyimpulkan bahwa balok dengan bukaan <i>hexagonal</i> memiliki kekakuan yang lebih baik dari pada balok dengan bukaan <i>circular</i> pada sampel yang sama, hal ini ditunjukkan dengan perbedaan nilai persentase tegangan sebesar 5,126% dan defleksi 7,852% pada balok <i>circular castellated beam</i> .	Membandingkan <i>castellated beam</i> bukaan <i>circular</i> dan <i>hexagonal beam</i> terhadap defleksi dan tegangan menggunakan elemen hingga.	Membandingkan kemampuan <i>castellated beam</i> dengan bukaan <i>hexagonal</i> dan <i>octagonal beam</i> dalam menahan beban maksimal.

No.	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	GAP Analysis	
				Penelitian Terdahulu	Penelitian Penulis
9	2014	Pengaruh Tinggi Pemotongan Profil (h), Terhadap Perilaku Lentur Pada Balok Baja Kastela (<i>Castellated Beam</i>)	Dari hasil percobaan tegangan runtuh menunjukkan bahwa benda uji yang ke-6 (h=150 mm) memiliki tegangan eksperimen yang lebih besar. Dari hasil pengujian di laboratorium bila ditinjau dari ketinggian h>50% (h5=102,5 mm) dari tinggi baja semula, maka indikasi terjadinya lendutan itu semakin besar.	Membandingkan perilaku lentur pada balok baja kastela dengan variasi tinggi pemotongan (26 mm, 50 mm, 76 mm, 102,5 mm dan 150 mm) secara laboratorium dan menggunakan SAP 2000	Membandingkan variasi ketinggian <i>octagonal beam</i> terhadap beban yang mampu dipikul menggunakan Abaqus
10	2007	Kapasitas Lentur Balok <i>Castella</i> Berdasarkan Kondisi Batas Tekuk Lokal	Rasio momen batas profil <i>castella</i> terhadap momen batas profil-I standard kurang lebih 1,44 kali, Rasio momen kritis (Mcr) profil <i>castella</i> terhadap momen kritis (Mcr) profil I kurang lebih 1,44 kali	pengujian tersebut dilakukan di laboratorium dan ditinjau terhadap kapasitas lentur balok dan tegangan kritis yang terjadi akibat adanya beban.	Penelitian menggunakan Abaqus ditinjau terhadap beban yang mampu ditahan oleh IWF, <i>hexagonal beam</i> dan <i>octagonal beam</i> .