

Research Article

STUDI PERBANDINGAN KEKUATAN PROFIL IWF, *HEXAGONAL BEAM* DAN *OCTAGONAL BEAM* DENGAN PERHITUNGAN MANUAL DAN METODE ELEMEN HINGGARezaldi Pramanda^{1*)}, Vitta Pratiwi¹⁾, dan Sutedjo Krisnadi¹⁾¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Komputer Indonesia, Bandung, Jawa Barat

Received: 5 October 2022, Accepted: 23 June 2023, Published: 22 November 2023

Abstract

A castellated beam is formed from the IWF body profile cutting pattern, and the cuts are then adjusted between the pieces and then welded to put them back together. The advantage of modifying the IWF profile into a castellated beam is that it can increase the moment of inertia of the section (I_x), and this increase affects the bending capacity of the castellated beam profile and the ability of the profile to withstand loads. However, these profile modifications have limitations that are used to minimize the occurrence of extreme failures, and one of the limitations is that the modified profile may not exceed 50% of the height increase from the initial profile height. In this study, the profile capabilities of IWF, Hexagonal Beam, and Octagonal Beam will be compared with a total of 3 models of centralized loads that can be carried. In this study, two methods will be used, namely manual calculation and finite element method. From the results of the analysis that has been carried out with both methods, it can be seen that the effect of modifying the IWF profile into hexagonal beams and octagonal beams can increase the load capacity of the profiles. However, the highest profile capability increase occurred in model 1 or IWF profile 150x75x5x7, which was modified to model 2 or hexagonal beam 220x75x5x7. The increase in the profile was 34.83% for manual method calculations and finite element method calculations, an increase of 12.15%. The highest comparison between the manual calculation method and the finite element method occurs in the hexagonal profile beam measuring 240x75x5x7 with a difference of 21.39%. Based on the research that has been done, it can be concluded from the three profiles that it is better if the profile used is model 2.

Key Words: *finite element method, hexagonal beam, octagonal beam, wide flange.*

1. PENDAHULUAN

Beberapa wilayah di Indonesia yang dahulunya merupakan ruang terbuka hijau kini telah rusak dan salah satu dampak yang akan ditimbulkan akibat dari berkurangnya lahan terbuka hijau ialah banjir. Banjir merupakan fenomena alam yang terjadi akibat adanya kerusakan alam pada bagian hulu sungai, sehingga menyebabkan debit air yang terlalu tinggi dan tidak dapat tertampung pada semua sungai dan sistem pengairan alam (*water body*) (Akbar dan Pratiwi, 2020).

Pada sektor konstruksi, kayu telah digunakan sebagai bahan bangunan sejak ribuan tahun yang lalu. Kekuatan serta ukuran penampang material kayu tergantung dari jenis dan umur pohon (Krisnadi, 2017). Namun pada saat ini untuk sektor konstruksi sudah mulai mengurangi penggunaan kayu untuk struktur bangunan dan mulai beralih pada penggunaan profil baja. Secara umum proses pembuatan profil baja terbagi menjadi dua, yang pertama secara *hot-rolled* dimana proses pembuatan

profil baja tersebut dilakukan pada saat material berada pada suhu tertentu kemudian material tersebut akan melalui beberapa tahapan penggilingan hingga membentuk profil yang direncanakan dan yang kedua secara *cold-formed* dimana pada proses ini lembaran-lembaran material yang sudah dingin dilakukan penekukan hingga membentuk beberapa profil baja yang sudah direncanakan (Oentoeng, 2000).

Kemudahan dalam pengaplikasian serta kemudahan dalam mencari materialnya dibandingkan dengan kayu membuat profil baja semakin banyak diminati oleh masyarakat, selain itu kemampuan dari profil baja tersebut masih dapat ditingkatkan dengan cara memodifikasi profil baja tersebut, dan salah satu profil baja *hot-rolled* yang biasa dimodifikasi ialah profil baja IWF menjadi *castellated beam* (Yuliatni, 2007).

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis terhadap profil IWF, *hexagonal beam* dan *octagonal beam* dengan menggunakan dua metode, untuk metode yang pertama dengan metode perhitungan

manual dan untuk metode yang kedua menggunakan metode elemen hingga, dari kedua metode analisis tersebut akan dibandingkan kemampuan profil dalam memikul beban terpusat maksimum serta memberikan rekomendasi penggunaan profil yang lebih baik diantara keenam model yang akan dibuat.

Dikarenakan pada pengujian terdahulu yang telah melakukan pengujian secara langsung dilaboratorium menggunakan beban terpusat, maka dari itu penulis melakukan simulasi menggunakan metode elemen hingga dan metode perhitungan manual secara beban terpusat dengan mengacu kepada SNI 03-4154-2014.

Untuk membatasi penelitian agar tetap sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, maka pada penelitian ini memiliki beberapa batasan, yaitu : profil yang ditinjau merupakan profil IWF, *hexagonal beam* dan *octagonal beam*, hanya meninjau terhadap beban terpusat yang mampu dipikul, profil ditinjau hingga tegangan lelehnya mencapai 240 Mpa, tidak meninjau kegagalan terhadap tekuk, pengelasan pada profil *castellated beam* dianggap kuat, tumpuan yang digunakan merupakan tumpuan sendi dan rol dan pada *octagonal beam* hanya dilakukan variasi pada ketinggian *plate spacer*.

Carbon Steel

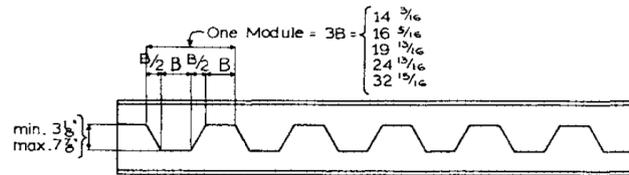
Menurut Oentoeng (2000), menyatakan bahwa *Carbon Steel* merupakan baja yang elemen-elemennya terdiri dari 1,70% Karbon, 1,65% *manganese*, 0,60% *Silicon* dan 0,60% *Copper*.

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

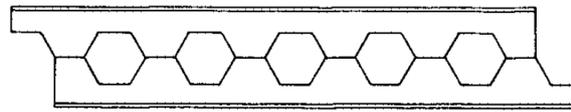
Secara umum baja dikategorikan berdasarkan materialnya seperti material baja dari *Ingot Iron* (baja bongkah) tanpa karbon sama sekali, sampai *Cast Iron* (baja tuang) yang memiliki karbon sekurang-kurangnya 1,70%, dan untuk baja yang biasa digunakan pada sektor konstruksi termasuk kedalam *mild carbon* (mengandung karbon kurang dari 0,15%-0,29%) (Oentoeng, 2000).

Castellated Beam

Castellated beam adalah hasil dari pemotongan secara zig-zag pada bagian badan profil IWF dan hasil potongan tersebut selanjutnya diangkat dan disesuaikan antar potongannya kemudian dilas untuk disatukan kembali (Boyer, 1964).

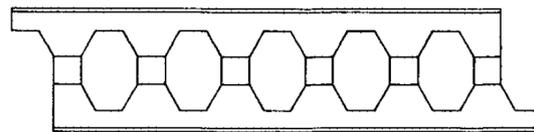


Gambar 1. Pola Pemotongan *Hexagonal Beam* (Fares dkk., 2016)



Gambar 2. *Hexagonal Beam* (Fares dkk., 2016)

Terdapat beberapa jenis *castellated beam* yang dapat dihasilkan dari beberapa pola pemotongan yang berbeda diantaranya: *hexagonal beam*, *circular beam*, *rhomb beam* dan *octagonal beam*. Dan untuk profil *octagonal beam* terbentuk dari hasil modifikasi *hexagonal beam* dengan memberikan penambahan *plate spacer* di setiap jarak antar bukaan *hexagonal beam* (Boyer, 1964).



Gambar 3. *Octagonal Beam* (Zaarour & Redwood, 1996)

Salah satu keuntungan dari modifikasi profil tersebut yaitu, dapat meningkatkan momen inersia penampang (I_x) dan peningkatan tersebut berpengaruh terhadap peningkatan kapasitas lentur profil *castellated beam* serta berpengaruh terhadap kemampuan profil dalam menahan beban. Namun modifikasi profil tersebut memiliki batasan yang digunakan untuk meminimalisir terjadinya kegagalan yang terlalu ekstrim dan untuk salah satu batasannya yaitu profil yang dimodifikasi tidak boleh melebihi 50% penambahan ketinggian dari tinggi profil awalnya (Boyer, 1964).

Hexagonal Beam

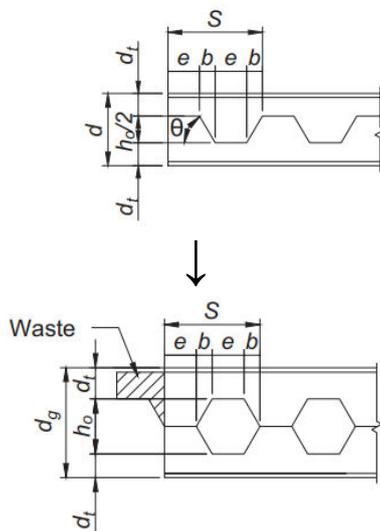
Hexagonal beam merupakan profil baja IWF yang dimodifikasi sehingga mempunyai bukaan berbentuk segi enam. *Hexagonal beam* terbentuk dari profil baja IWF yang mengalami proses pemotongan pada bagian badan profil dengan pola zig-zag, salah satu bagian yang telah dipotong lalu diangkat dan disatukan bagian 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 dkk., 2020).

Berdasarkan Fitri Rohmah Widayanti (2012) dalam (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 4. Symbol Hexagonal Beam ((Fares dkk., 2016)

a. Batasan Geometri

- (1) $e \geq 76,2 \text{ mm}$
- (2) $\frac{e}{t_w} < 30$
- (3) $\frac{h_o}{e} < 8$
- (4) $62^\circ \geq \phi \geq 58^\circ$

b. Perencanaan Geometri

- (5) $b = 0,5 \times \frac{h_o}{\tan \phi}$
- (6) $h = d - 2 \times d_t$
- (7) $d_g = h_o + 2 \times d_t$
- (8) $S = 2 \times e + 2 \times b$

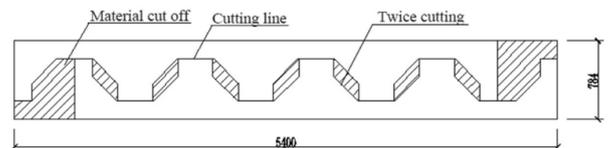
Keterangan :

- d = Tinggi Profil IWF Awal
- d_t = Tinggi Tee Section
- d_g = Tinggi Bersih Castellated Beam
- ϕ = Sudut Pemotongan
- e = Panjang Tee Section
- b = Jarak Mendatar Potongan
- S = Jarak Antar Bukaan
- h_o = Tinggi Lubang Castellated Beam
- h = Setengah Tinggi Bukaan Castellated Beam

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 dkk. (1996) dalam (Al-Thabhawee dan Mohammed, 2019).

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 dkk., 2020).



Gambar 5. Contoh Pola Pemotongan Octagonal Beam (Liu dkk., 2020)

Pola Kegagalan Castellated Beam

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

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 torsi lateral biasanya terjadi pada balok dengan bentangan panjang tanpa adanya sokongan lateral yang memadai untuk menahan tekan pada sayap (Ulum dkk., 2018).

Kegagalan akibat beban terpusat pada balok *castellated beam* yang diakibatkan pemberian 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).

Kegagalan sambungan 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 dkk., 2018).

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, 1991 dalam Swastika, 2015).

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

Perhitungan 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*, berikut ini merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung kembali nilai properti penampang *castellated beam*.

1. Momen Inersia

a. Momen Inersia (I_x) Tanpa Lubang

$$I_x = \left(\frac{1}{12} \times b_f \times d_g^3\right) - \left(\frac{1}{12} \times (b_f - t_w) \times (d_g - 2 \times t_f)^3\right) \quad (9)$$

b. Momen Inersia (I_x) Dengan Lubang

$$I_x = I_x \text{ Tanpa Lubang} - \left(\frac{1}{12} \times t_w \times h_o^3\right) \quad (10)$$

c. Momen Inersia (I_y) Tanpa Lubang

$$I_y = 2 \left(\frac{1}{12} \times t_f \times b_f^3\right) + \left(\frac{1}{12} \times (d_g - 2 \times t_f) \times (t_w)^3\right) \quad (11)$$

d. Momen Inersia (I_y) dengan Lubang

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

2. Jari-jari Girasi

a. Luas Penampang (A)

$$A = (2 \times b_f \times t_f) + (d_g \times t_w) - (h_o \times t_w) \quad (13)$$

b. Jari-jari Girasi Sumbu-x (r_x)

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (14)$$

c. Jari-jari Girasi Sumbu-y (r_y)

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (15)$$

3. Elastic Section Modulus

$$S_x = \frac{I_x}{\frac{1}{2} \times d_g} \quad (16)$$

4. Plastic Section Modulus

a. Plastic Section Modulus (z_x) Tanpa Lubang

$$z_x = \left(\frac{1}{4} \times b_f \times d_g^2\right) - \left(2 \times \frac{1}{4} \times \left(\frac{b_f - t_w}{2}\right) \times (d_g - 2 \times t_f)^2\right) \quad (17)$$

b. Plastic Section Modulus (z_x) dengan lubang

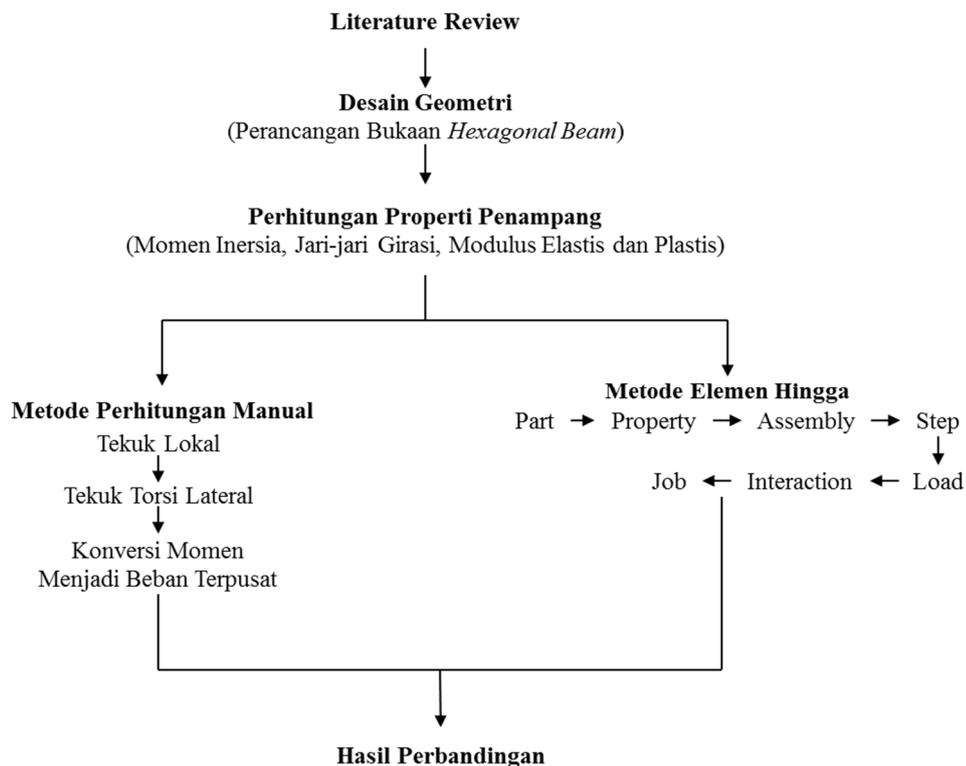
$$z_x = z_x \text{ Tanpa lubang} - \left(\frac{1}{4} \times t_w \times h_o^2\right) \quad (18)$$

Setelah seluruh profil mendapatkan nilai properti penampangnya langkah selanjutnya ialah dengan mengecek profil terhadap tekuk lokal dan terhadap tekuk torsi lateral. Dikarenakan pada *Steel Design-31* mengacu pada AISC 360-16, maka dari itu untuk mempermudah dalam memahami penggunaan rumus yang digunakan penulis akan mengacu kepada SNI 1729:2020.

2. METODOLOGI

Pada penelitian ini dilakukan terlebih dahulu perencanaan bukaan badan *castellated beam* dengan mengacu kepada AISC *Design Guide-31*. Setelah mendapatkan geometri penampang yang memenuhi syarat selanjutnya dilakukan analisis secara manual dan metode elemen hingga. Dan dari analisis tersebutlah dibandingkan antara hasil analisis secara manual dengan metode elemen hingga terhadap kemampuan profil dalam menahan beban. Berikut ini merupakan *framework* yang akan menjelaskan secara

umum proses pengerjaan penelitian dari awal hingga selesai.



Gambar 6. Framework Penelitian

Literature Review

Tahapan awal dalam sebuah penelitian ialah mencari terlebih dahulu informasi-informasi yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan, informasi tersebut diharapkan dapat membantu proses analisis hingga mendapatkan hasil yang optimal, pada penelitian ini pencarian *literature review* dibantu menggunakan *publish or perish* dengan *keywords castellated beam*, dari hasil pencarian tersebut didapatkan 89 jurnal dan dari 89 jurnal tersebut dipilih sebanyak 24 jurnal yang sangat berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

Desain Geometri

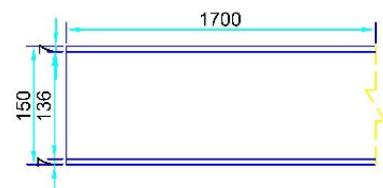
Dimensi serta properti profil IWF akan mengacu kepada tabel baja gunung garuda. Profil IWF yang digunakan ialah profil IWF dengan ukuran 150x75x5x7 PT Gunung Garuda, 2017, profil IWF dengan ukuran 150x75x5x7 digunakan karena pada penelitian terdahulu menggunakan profil baja IWF dengan tinggi 200 namun hasilnya terlalu tinggi apabila dimodifikasi menjadi *castellated beam* serta belum mendapatkan hasil yang optimal (Yasin, 2017).

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis dengan menggunakan 3 (tiga) model. Untuk model 1 merupakan profil IWF 150x75x5x7, untuk model 2 merupakan profil *hexagonal beam* dan untuk model 3 merupakan profil *octagonal beam*. Profil *octagonal beam* berasal dari profil *hexagonal beam* dengan penambahan *plate spacer* pada bagian badannya.

Untuk perencanaan geometri *hexagonal beam* akan mengacu kepada AISC *Design Guide-31*, dan untuk nilai ϕ , e , d_t dan h_o akan diasumsikan terlebih dahulu, namun untuk ukuran b , h , d_g dan S akan menggunakan rumus pada persamaan dibawah ini :

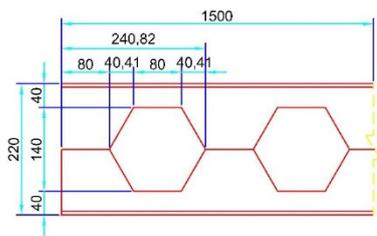
Berikut ini merupakan detail gambar dari ketiga model:

1. Model 1 merupakan profil IWF 150x75x5x7,



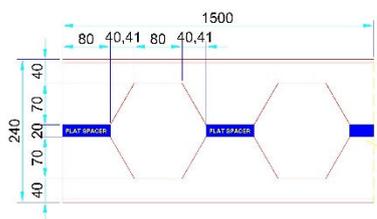
Gambar 7. Model 1

2. Model 2 merupakan *hexagonal beam* 220x75x5x7,



Gambar 8. Model 2

3. Model 3 merupakan *octagonal beam* dengan penambahan *plate spacer* dengan tinggi = 20 mm dan akibat penambahan *plate spacer* tersebut membuat profil *hexagonal beam* menjadi *octagonal beam* 240x75x5x7,



Gambar 9. Model 3

Perhitungan Properti Penampang

Akibat dari adanya modifikasi pada badan profil IWF menjadi *castellated beam* menyebabkan adanya perubahan pada nilai properti penampang, sehingga perlunya perhitungan ulang untuk menyesuaikan kemampuan batas dari beberapa model.

Dikarenakan untuk model alternatif 1 merupakan Profil IWF utuh maka untuk nilai properti profil tersebut telah tersedia pada katalog produk PT. Gunung Garuda, sedangkan untuk model alternatif 2 dan model alternatif 3 merupakan profil *hexagonal beam* dan *octagonal beam* yang merupakan profil hasil modifikasi dari profil IWF sehingga perlunya untuk dilakukan perhitungan properti penampang.

Analisis

Setelah didapatkan geometri penampang serta nilai properti dari setiap model alternatif, selanjutnya dilakukan analisis secara manual hingga mendapatkan beban yang mampu ditahan oleh setiap model alternatif, Analisis secara manual ini akan dilakukan dengan mengacu kepada SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural.

Selain menggunakan metode perhitungan manual pada penelitian ini dilakukan analisis dengan 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).

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan analisis dengan menggunakan metode perhitungan manual dan metode elemen hingga tahapan selanjutnya ialah membahas mengenai hasil analisis yang telah dilakukan. Berikut ini merupakan hasil analisis seluruh model yang telah dilakukan serta grafik perbandingan model terhadap beban yang mampu diterima.

Analisis Perhitungan Manual

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dengan metode perhitungan manual, didapatkan nilai properti penampang serta nilai beban yang mampu ditahan oleh seluruh model.

Tabel 1. Rekapitulasi Properti Penampang

	Properti Penampang					
	Ix	Iy	rx	ry	sx	zx
	mm ⁴	mm ⁴	mm	mm	mm ³	mm ³
Model 1 IWF d = 150 mm	6,660,000.00	495,000.00	61.10	16.60	88,800.00	99,456.00
Model 2 <i>Hexagonal Beam</i> dg = 220 mm	14,984,406.67	493,604.17	101.66	18.45	136,221.88	152,620.00
Model 3 <i>Octagonal Beam</i> dg = 240 mm	18,211,473	493,708	112.07	18.45	151,762	170,170

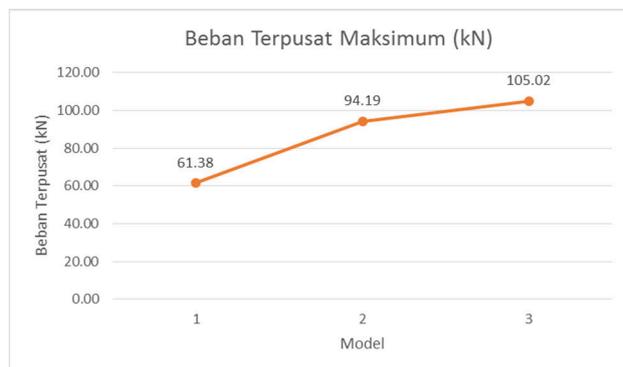
Dari hasil perhitungan properti penampang dapat diketahui bahwa pengaruh modifikasi profil IWF menjadi *hexagonal beam* dan *octagonal beam* mampu meningkatkan nilai properti penampang, peningkatan properti penampang tersebut dapat berpengaruh terhadap kemampuan penampang.

Untuk nilai acuan perbandingan persentase peningkatan beban terpusat maksimum yang mampu

ditahan oleh setiap model, akan mengacu kepada model 1 yaitu profil IWF 150x75x5x7, model 1 tersebut dipilih karena pada model 1 merupakan profil IWF utuh yang belum dimodifikasi sehingga pengaruh dari modifikasi profil IWF menjadi *hexagonal beam* dan *octagonal beam* dapat terlihat perbedaan kapasitas profil dalam menahan beban terpusat.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Metode Perhitungan Manual

	Beban Terpusat Maksimum	Persentase Peningkatan Beban	Keterangan
	(kN)	(%)	
Model 1 IWF d = 150 mm	61.38	N/A	Seluruh Perbandingan persentase model terhadap peningkatan beban terpusat maksimum akan mengacu kepada model 1 yang merupakan Profil 150x75x5x7
Model 2 <i>Hexagonal Beam</i> dg =220 mm	94.19	34.83	
Model 3 <i>Octagonal Beam</i> dg = 240 mm	105.02	41.55	



Gambar 10. Grafik Beban Metode Perhitungan Manual

Dari hasil analisis yang telah dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan manual dapat diketahui bahwa pengaruh dari modifikasi profil IWF menjadi *hexagonal beam* dan *octagonal beam*, mampu meningkatkan kemampuan penampang dalam menahan beban terpusat.

Untuk modifikasi pada model 1 atau profil IWF 150x75x5x7 menjadi model 2 atau *hexagonal beam* 220x75x5x7 mengalami peningkatan sebesar 34,83% dari yang semula model 1 atau profil IWF utuh dengan kapasitas beban terpusat maksimum yang mampu dipikul sebesar 61,38 kN kemudian setelah dimodifikasi menjadi model 2 atau *hexagonal beam* meningkat kapasitas beban terpusat maksimum yang mampu dipikul menjadi 94,19 kN. Peningkatan beban terpusat maksimum tersebut sejalan dengan peningkatan yang terjadi pada nilai properti penampang terutama peningkatan pada momen inersia penampang dan nilai modulus penampang.

Setelah dilakukan modifikasi model 1 atau profil IWF 150x75x5x7 menjadi model 2 atau *hexagonal beam* selanjutnya profil *hexagonal beam* 220x75x5x7 dilakukan modifikasi dengan menambahkan *plate spacer* dengan ketinggian 20 mm dan hasil modifikasi profil tersebut mengubah *hexagonal beam* menjadi model 3 atau *octagonal beam* 270x75x5x7, dan dari hasil perhitungan beban terpusat maksimum didapatkan bahwa peningkatan pada model 3 terhadap beban terpusat maksimum pada model 1 yang semula sebesar 61,38 kN meningkat menjadi 105,02 kN, apabila dalam persen peningkatan beban terpusat maksimum yang terjadi pada model 3 terhadap model 1 mengalami peningkatan sebesar 41,55%.

Namun untuk rumus yang digunakan pada perhitungan beban terpusat maksimum model 3 atau *octagonal beam* 280x75x5x7 s.d. model 6 atau *octagonal beam* 300x75x5x7 harus dilakukan peninjauan ulang, dikarenakan untuk rumus beban terpusat maksimum yang digunakan hanya meninjau profil IWF dan *hexagonal beam*, sedangkan untuk rumus perhitungan beban terpusat *octagonal beam* masih belum tersedia pada peraturan yang berlaku sehingga pada penelitian ini masih menggunakan rumus yang sama yang digunakan untuk memperhitungkan kapasitas beban maksimum terpusat pada model 1 atau profil IWF dan model 2 atau *hexagonal beam*.

Berdasarkan hasil dari metode perhitungan manual, model yang akan direkomendasikan untuk dijadikan sebagai struktur balok pada sebuah bangunan ialah model 2 atau *hexagonal beam*

220x75x5x7. Model 2 tersebut dipilih dikarenakan pada model 2 merupakan model yang mengalami peningkatan kemampuan dalam menahan beban terpusat secara signifikan, beban yang mampu dipikul oleh model 2 tersebut sebesar 94,19 kN dan selisih perbandingan yang terjadi antara model 1 dengan model 2 sebesar 34,83%.

Selain itu model 2 dipilih sebagai profil yang mengalami peningkatan secara signifikan dikarenakan pada model 1 peningkatan kapasitas profil masih belum melebihi beban terpusat maksimum yang mampu dipikul oleh model 2, sedangkan pada model 3 peningkatan kemampuan profil dalam menahan beban terpusat sudah melebihi beban terpusat maksimum yang mampu dipikul oleh model 2, akan tetapi peningkatan kemampuan profil dalam menahan beban terpusat pada model 3 tidak terlalu signifikan dikarenakan pada model 3 hanya mengalami modifikasi pada penambahan ketinggian *plate spacer* setinggi 20 mm dari model *hexagonal beam*.

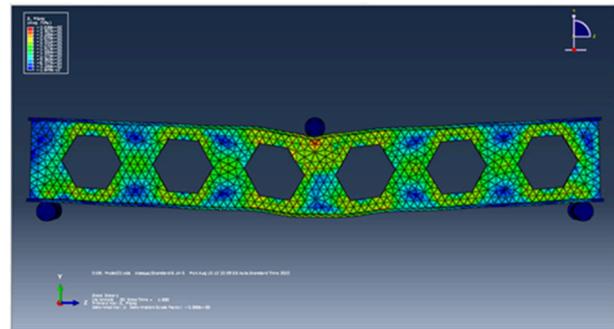
Analisis Metode Elemen Hingga

Selain menggunakan metode perhitungan manual, pada penelitian ini dilakukan analisis dengan menggunakan metode elemen hingga. 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 rangkak (Santoso et al., 2019). Dari hasil analisis tersebut akan dibandingkan antara metode perhitungan manual dengan metode elemen hingga. Berikut ini merupakan hasil analisis beban terpusat yang mampu ditahan oleh setiap model dan telah di rekapitulasi dari hasil metode elemen hingga.

Tabel 4. Rekapitulasi Metode Elemen Hingga

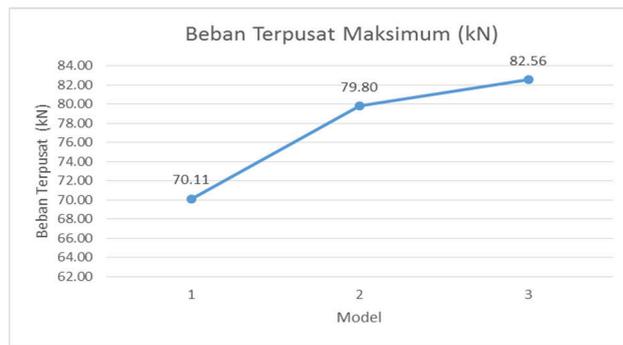
	Beban Terpusat Maksimum	Persentase Peningkatan Beban	Keterangan
	(kN)	(%)	
Model 1 IWF d = 150 mm	70.11	N/A	Seluruh Perbandingan persentase model terhadap peningkatan beban terpusat maksimum akan mengacu kepada model 1 yang merupakan Profil 150x75x5x7
Model 2 Hexagonal Beam dg = 220 mm	79.80	12.15	
Model 3 Octagonal Beam dg = 240 mm	82.56	15.08	



Gambar 11. Visualization Model 2 *Hexagonal Beam*

Tabel 3. Displacement, Load and Stress

Disp cm	Load		Stress Mpa
	N	kN	
0.00	0.00	0	0.00
0.50	10157.40	10.16	26.17
1.00	22762.40	22.76	58.55
1.50	35013.60	35.01	90.55
2.00	46418.70	46.42	122.16
2.50	56253.20	56.25	151.82
3.00	64035.30	64.04	178.68
3.50	69601.50	69.60	201.62
4.00	73062.80	73.06	217.67
4.50	75084.40	75.08	226.97
5.00	76361.80	76.36	231.13
5.50	77320.60	77.32	234.13
6.00	78115.10	78.12	236.60
6.50	78744.60	78.74	237.99
7.00	79267.50	79.27	239.02
7.50	79729.80	79.73	239.89
7.59	79804.28	79.80	240
8.00	80156.40	80.16	240.54
8.50	80581.10	80.58	241.18
9.00	81002.50	81.00	241.91
9.50	81400.70	81.40	242.69
10.00	81782.70	81.78	243.53



Gambar 12. Grafik Beban Metode Elemen Hingga

Untuk hasil analisis menggunakan metode elemen hingga pada modifikasi model 1 atau profil IWF 150x75x5x7 menjadi model 2 atau *hexagonal beam* 220x75x5x7 mengalami peningkatan sebesar 12,15% dari yang semulanya model 1 atau profil IWF utuh dengan kapasitas beban terpusat maksimum yang mampu dipikul sebesar 70,11 kN kemudian setelah dimodifikasi menjadi model 2 atau *hexagonal beam* meningkat kapasitas beban terpusat maksimum yang mampu dipikul menjadi 79,80 kN.

Setelah dilakukan modifikasi pada model 1 yang merupakan profil IWF menjadi model 2 yang merupakan *hexagonal beam*, selanjutnya profil *hexagonal beam* tersebut dilakukan modifikasi dengan menambahkan *plate spacer* dengan ketinggian 20 mm dan hasil modifikasi profil tersebut

mengubah *hexagonal beam* menjadi model 3 atau *octagonal beam* 240x75x5x7, dan dari hasil perhitungan beban terpusat maksimum didapatkan bahwa peningkatan pada model 3 terhadap beban terpusat maksimum pada model 1 yang semulanya sebesar 70,11 kN meningkat menjadi 82,56 kN.

Sama seperti hasil pada metode perhitungan manual, pada analisis menggunakan metode elemen hingga pun model yang akan direkomendasikan untuk dijadikan sebagai struktur balok pada sebuah bangunan ialah model 2 atau *hexagonal beam* 240x75x5x7.

Model 2 tersebut dipilih dikarenakan pada model 2 merupakan model yang mengalami peningkatan dalam menahan beban terpusat secara signifikan, beban yang mampu dipikul oleh model 2 tersebut sebesar 79,80 kN dengan selisih perbandingan beban terpusat maksimum yang terjadi antara model 1 dengan model 2 sebesar 12,15%.

Perbandingan Metode Perhitungan Manual dan Metode Elemen Hingga

Setelah didapatkan beban yang mampu ditahan oleh setiap model, langkah selanjutnya yaitu membandingkan hasil analisis yang didapatkan dengan menggunakan metode perhitungan manual dan metode elemen hingga.

Tabel 5. Perbandingan Metode Perhitungan Manual Dengan Metode Elemen Hingga

	Perbandingan Beban Terpusat Maksimum			Keterangan
	Perhitungan Manual	Metode Elemen Hingga	Selisih Manual Dengan Elemen Hingga	
	(kN)	(kN)	(%)	
Model 1 IWF d = 150 mm	61.38	70.11	-14.22	Seluruh Perbandingan persentase peningkatan beban terpusat maksimum antara metode perhitungan manual dan metode elemen hingga akan mengacu kepada hasil metode perhitungan manual.
Model 2 Hexagonal Beam dg = 220 mm	94.19	79.80	15.27	
Model 3 Octagonal Beam dg = 270 mm	105.02	82.56	21.39	



Gambar 13. Grafik Perbandingan Metode Perhitungan Manual dan Metode Elemen Hingga

Nilai yang akan menjadi acuan pada perbandingan hasil beban terpusat maksimum antara metode perhitungan manual dengan metode elemen hingga ialah hasil dari metode perhitungan manual. Hasil dari metode perhitungan manual dipilih sebagai nilai acuan perbandingan beban terpusat maksimum karena pada setiap analisis yang dilakukan dilapangan, dengan menggunakan bantuan *software* hasilnya akan selalu di kontrol berdasarkan metode perhitungan manual.

Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa hasil analisis menggunakan metode elemen hingga memiliki nilai beban terpusat maksimum yang lebih

kecil dari perhitungan manual, terkecuali untuk hasil analisis model 1 yaitu profil IWF 150x75x5x7 hasil analisis menggunakan metode elemen hingga memiliki nilai beban terpusat maksimum sebesar 70,11 kN dan nilai beban terpusat maksimum tersebut lebih besar dibandingkan dengan metode perhitungan manual dengan nilai beban terpusat maksimum sebesar 61,38 kN, apabila dalam persen selisih yang terjadi antara perhitungan manual dengan metode elemen hingga sebesar -14,22%.

Pada model 2 yaitu profil *hexagonal beam* 270x75x5x7 hasil analisis menggunakan metode perhitungan manual memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan metode elemen hingga, dimana hasil dengan metode perhitungan manual memiliki nilai kemampuan beban terpusat maksimum yang mampu ditahan sebesar 94,19 kN sedangkan untuk metode elemen hingga memiliki nilai beban terpusat maksimum sebesar 79,80 kN, apabila dalam persen selisih perbandingan beban terpusat maksimum antara metode perhitungan manual dengan metode elemen hingga sebesar 15,27%.

Selisih terbesar beban terpusat maksimum antara metode perhitungan manual dengan metode elemen hingga terjadi pada model 3 yaitu profil *octagonal beam* 240x75x5x7, dimana hasil beban maksimum menggunakan metode perhitungan manual memiliki nilai beban terpusat maksimum sebesar 105,02 kN sedangkan analisis menggunakan metode elemen hingga mendapatkan nilai beban terpusat maksimum sebesar 82,56 kN, apabila dalam persen selisih beban terpusat maksimum antara metode perhitungan manual dengan metode elemen hingga sebesar 21,39%.

Dikarenakan analisis menggunakan metode elemen hingga dianggap mampu mendekati hasil realitas dilapangan, maka hal tersebut menunjukkan bahwa analisis perhitungan manual pada model 1 memberikan hasil yang lebih aman, sedangkan analisis perhitungan manual pada kedua model lainnya memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan hasil analisis metode elemen hingga, hal ini menunjukkan bahwa hasil analisis perhitungan manual pada kedua model selain model 1 tidak aman.

Adanya peningkatan secara signifikan pada perhitungan manual hingga melebihi hasil analisis metode elemen hingga disebabkan adanya pembatasan terhadap mekanisme kegagalan yang ditinjau, maka dari itu pada penelitian selanjutnya dapat memperhitungkan seluruh pola kegagalan yang dapat terjadi pada profil *castellated beam*.

Selisih dari hasil yang telah diperhitungkan baik dengan metode perhitungan manual maupun dengan metode elemen hingga akan selalu terjadi, selisih hasil tersebut diakibatkan karena pada kedua metode tersebut menggunakan pendekatan yang berbeda dan pada metode elemen hingga pendekatan yang

dilakukan menggunakan formulasi matriks dengan membagi model yang telah dibuat menjadi bagian-bagian elemen yang lebih kecil sehingga membuat perhitungan dengan metode elemen hingga memiliki hasil yang lebih konvergen.

Namun apabila pada saat melakukan pemodelan ataupun penginputan nilai properti material yang salah maka akan berdampak terhadap hasil yang akan digunakan, selain itu penentuan tipe analisis yang akan digunakan akan sangat berpengaruh terhadap *output* yang akan dikeluarkan oleh metode elemen hingga.

Selain itu selisih hasil yang terjadi diakibatkan oleh perhitungan kemampuan beban terpusat pada profil *octagonal beam* belum memiliki rumus yang telah ditetapkan, sehingga pada metode perhitungan manual ini masih menggunakan rumus yang sama seperti pada rumus yang digunakan untuk profil IWF dan *hexagonal beam*, maka dari itu perlunya untuk melakukan peninjauan ulang terkait rumus yang digunakan.

Untuk meneliti lebih jauh mengenai hasil analisis yang telah diperhitungkan dapat membandingkan kembali 3 model yang telah direncanakan dengan menggunakan pengujian secara langsung di laboratorium.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan, bahwa :

1. Pengaruh modifikasi profil IWF menjadi *hexagonal beam* dan *octagonal beam* mampu meningkatkan kemampuan profil dalam menahan beban terpusat, peningkatan tersebut disebabkan oleh adanya penambahan ketinggian yang bervariasi pada bagian badannya sehingga menyebabkan adanya penambahan nilai momen inersia penampang serta penambahan nilai modulus penampang.
 - a. Peningkatan kapasitas profil dalam menahan beban terpusat tertinggi terjadi pada model 2 dengan beban terpusat yang mampu dipikul sebesar 94,19 kN dan apabila dibandingkan dengan model 1 peningkatan beban terpusat maksimum yang terjadi sebesar 15,27%.
 - b. Untuk kapasitas profil yang mengalami peningkatan terendah terjadi pada model 3 dengan beban terpusat yang mampu dipikul sebesar 105,02 kN dan apabila dibandingkan dengan model 1 peningkatan beban terpusat maksimum yang terjadi sebesar 21,39%.
 - c. Pada analisis dengan metode elemen hingga menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas profil dalam menahan beban terpusat tertinggi terjadi pada model 2 dengan beban terpusat yang mampu dipikul sebesar 79,80 kN dan apabila dibandingkan dengan model

- 1 peningkatan beban terpusat maksimum yang terjadi sebesar 15,27%.
- d. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga untuk kapasitas profil yang mengalami peningkatan terendah terjadi pada model 3 dengan beban terpusat yang mampu dipikul sebesar 82,56 kN dan apabila dibandingkan dengan model 1 peningkatan beban terpusat maksimum yang terjadi sebesar 21,39%.
2. Hasil analisis pada IWF 150x75x5x7 (model 1) dengan menggunakan perhitungan manual lebih rendah -14,22% apabila dibandingkan dengan analisis menggunakan metode elemen hingga, hal tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan manual pada model 1 memberikan hasil yang lebih aman. Sedangkan untuk hasil perhitungan manual pada kedua model lainnya memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan metode elemen hingga, dari perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan manual tidak aman. Hal ini terjadi dikarenakan adanya pembatasan terhadap mekanisme kegagalan yang ditinjau pada penelitian ini.
3. Perbedaan hasil antara metode perhitungan manual dengan metode elemen hingga disebabkan oleh belum adanya rumus khusus yang membahas mengenai profil *octagonal beam* sehingga untuk perhitungan secara manual pada profil *octagonal beam* masih menggunakan rumus yang digunakan untuk profil IWF dan *hexagonal beam*.
4. Dari penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa peningkatan signifikan terjadi pada profil IWF yang dimodifikasi menjadi *hexagonal beam*, sehingga apabila dibandingkan dengan ketiga model yang telah di analisis model kedua yang akan lebih direkomendasikan untuk dijadikan sebagai struktur balok.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah didapatkan penulis memiliki beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Diperlukannya melakukan pengujian secara laboratorium.
2. Meninjau terhadap kegagalan tekuk.
3. Meninjau pengaruh pola kegagalan yang dapat terjadi akibat adanya modifikasi profil.
4. Dapat menambahkan *stiffeners* pada profil untuk meningkatkan kemampuan dari profil.
5. Perlunya peninjauan kembali terhadap penggunaan rumus profil *octagonal beam* yang digunakan untuk memperhitungkan kemampuan profil dalam menahan beban.

REFERENSI

- Akbar, F., & Pratiwi, V. (2020). Evaluasi Kapasitas Waduk Setiabudi Barat Dalam Penanggulangan Banjir Jakarta Selatan Dengan Pemodelan Hec-Ras 4.1.0. *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, 1(2), 57–67. <https://doi.org/10.34010/crane.v1i2.4184>
- Al-Thabthawee, H. W., & Mohammed, A. A. (2019). Reinforcing the Octagonal Web Openings of Castellated Beam by Steel Rings. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 12(1), 7–16. <https://doi.org/10.30772/qjes.v12i1.581>
- Boyer, J. . (1964). *Castellated Beams — New Developments Related papers Castellated Beams — New Developments*. 104–108.
- Darajati, W., Pratiwi, S., Herwinda, E., Radiansyah, A. D., Nalang, V. S., Nooryanto, B., Rahajoe, J. S., Ubaidillah, R., Maryanto, I., Kurniawan, R., Prasetyo, T. A., Rahim, A., Jefferson, J., & Hakim, F. (2016). *Indonesia Biodiversity Startegy and Action Plan (IBSAP) 2012-2020*.
- Durif, S., Bouchair, A., & Lopes, N. (2021). *Numerical and analytical study of intermediate web-post buckling*. 4. <https://doi.org/10.1002/cepa.1395>
- Fadillawaty. (2019). *Metode Elemen Hingga*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Fares, S. S., John, C., & Dinehart, D. W. (2016). ASIC Steel Design Guide 31: Castellated and Cellular Beam Design.
- Hutami, P., Tediando, L. S., & Leman, S. (2020). Analisis Pengaruh Panjang Profil Terhadap Kekuatan Hexagonal Castellated Beam Dengan Metode Elemen Hingga. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.24912/jmts.v3i1.6943>
- Krisnadi, S. (2017). *Studi Eksperimental dan Numerikal Perilaku Lentur Balok Boks Glulam*.
- Liu, M., Liang, M., Ma, Q., Wang, P., & Ma, C. (2020). Web-post buckling of bolted castellated steel beam with octagonal web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105794>
- Oentoeng. (2000). *Konstruksi Baja*. In *Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Kristen Petra Surabaya*.
- PT Gunung Garuda, P. (2017). *Product Cataloge*.
- Putri Rahayu, A. (2016). Pengaruh Tinggi Pemotongan Profil (h), Terhadap Kekuatan Lentur Castellated Beam Bukaian Belah Ketupat (Rhomb). *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 1(1), 69–75.
- Santoso, Y. A., Sulandari, N., & Pranata, Y. A. (2019). Studi Pendahuluan Simulasi Numerikal Metode Elemen Hingga Linier Sambungan Balik-Kolom Baja Tipe Clip-Angle. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 123–132. <https://doi.org/10.28932/jts.v8i2.1362>
- Situmorang, A. H. M. (2017). *Analisa Perbandingan Cellular Beam dan Honeycomb Beam Dengan Program Ansys*.
- SNI 1729, S. (2020). SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural Badan Standardisasi Nasional.
- Swastika, T. W. (2015). *Studi Perilaku Web Post Buckling dan Vierendeel Mechanism pada Castellated Beams*. 14(1).
- Ulum, S., Suswanto, B., & Kristijanto, H. (2018). *Analisa Perbandingan Model Keruntuhan Profil Hexagonal*.
- Yasin, M. I. (2017). Pengaruh Sudut Pemotongan Profil (Æ) Terhadap Kekuatan Lentur Castellated Beam Pada Bukaian Rhomb (Rhomb).
- Yuliatni, H. H. (2007). *Kapasitas Lentur Balok Castella Berdasarkan Kondisi Batas Tekuk Lokal*.

