

## PENGARUH SUDUT BUKAAN HEKSAGONAL TERHADAP KAPASITAS GESER CASTELLATED STEEL BEAM

Ida Barkiah<sup>1</sup>, Arya Rizki Darmawan<sup>1</sup> dan Muhammad Fitrah Dziky<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup>Program Studi S-1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, ULM, Banjarbaru, Indonesia

### ABSTRACT

The opening in the castellated steel beam body affects the increase in the flexural capacity and the shear capacity of the steel beam. The research was conducted by determining the span of elements of conventional steel beams and castellated steel beams which have the same length. Steel beams are subjected to two concentrated loads at two points in 1/3 of the span. This study concludes that the effect of the geometric opening on the castellated steel beam will decrease the shear capacity. At the hexagonal opening angle of 45°-50° there is a decrease in shear capacity of about 18%. The optimum shear capacity value occurs at an opening angle of 20° with a decrease in shear capacity of 3%. The failure pattern that occurs is diagonal buckling (buckling due to shear) of the body at 1/3 of the span.

Keywords : Castellated Steel Beam, Shear Capacity, Hexagonal Opening Angle.

### ABSTRAK

Bukaan pada badan castellated steel beam mempengaruhi peningkatan kapasitas lentur balok baja dan kapasitas geser pada profil baja castellated steel beam. Penelitian dilakukan dengan menentukan bentang elemen balok baja konvensional dan castellated steel beam yang memiliki panjang yang sama. Balok baja diberikan pembebanan dua beban terpusat pada dua titik di 1/3 bentang. Penelitian ini menyimpulkan bahwa efek dari geometrik bukaan pada castellated steel beam akan menurunkan kapasitas geser. Pada sudut bukaan heksagonal 45°-50° terjadi penurunan kapasitas geser sekitar 18%. Nilai kapasitas geser optimum terjadi pada sudut bukaan 20° dengan penurunan kapasitas geser sebesar 3%. Pola keruntuhan yang terjadi merupakan tekuk diagonal (tekuk akibat geser) badan di 1/3 bentang.

Kata kunci : Castellated Steel Beam, Kapasitas Geser, Sudut Bukaan Heksagonal.

## 1. PENDAHULUAN

Ketersediaan baja tidak luput dari bahan baku pembentuknya yaitu bijih besi. Bijih besi merupakan bahan tambang dengan sumber alam yang tidak dapat diperbarui. Memanfaatkan material baja sebaik-baiknya bertujuan agar keter-sediaan tidak mempengaruhi bahan baku pembentuk baja. Pemanfaatan yang telah dilakukan seperti memodifikasi dari profil baja konvensional.

Baja konvensional yang telah difabrikasi sebelumnya dimodifikasi agar tidak menambah penggunaan material pembuatan baja. Modifikasi bertujuan meningkatkan kapasitas baja konvensional tersebut.

Castellated steel beam merupakan salah satu jenis modifikasi profil baja pada bagian web profil baja konvensional. Manfaat

dari *castellated steel beam* ialah terjadinya penambahan pada tinggi profil baja. Dengan bertambahnya tinggi profil baja, maka akan bertambah jua inersia dari profil, sehingga menambah kemampuan profil menahan beban. *Castellated steel beam* dengan bukaan heksagonal meningkatkan kapasitas lentur 8-19% dan kuat lentur maksimum terjadi pada sudut bukaan 45°-50° (Barkiah dan Darmawan, 2020 : 5).

Selain kapasitas lentur yang dipengaruhi oleh bukaan, kapasitas geser pada profil baja *castellated steel beam* juga akan dipengaruhi. Kapasitas geser pada *castellated steel beam* yang akan diteliti pada penelitian ini ialah dengan bentuk bukaan heksagonal dan sudut bukaan sebesar 20°, 30°, 40°, 55° dan 60°. Pada penelitian ini direncanakan profil baja konvensional maupun *castellated steel beam* mengalami kegagalan geser.

---

Correspondence: Ida Barkiah  
Email: [idabarkiah@ulm.ac.id](mailto:idabarkiah@ulm.ac.id)

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Karakteristik sifat mekanik material baja

Diagram regangan-tegangan dimulai dengan garis lurus, yang berarti bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah awal ini bukan hanya linier melainkan juga proporsional. Untuk baja ber-karbon rendah, limit ini berada pada selang 30 sampai 50 ksi (210 sampai 350 Mpa), tetapi baja ber-kekuatan tinggi (dengan kandungan karbon lebih tinggi ditambah unsur paduan lain) dapat mempunyai batas pro-porsional lebih dari 80 ksi (550 Mpa).

Dengan meningkatnya tegangan hingga melewati limit proporsional, maka regangan mulai meningkat secara lebih cepat lagi untuk setiap penambahan tegangan. Dengan demikian, kurva tegangan-regangan mempunyai kemiripan yang ber-angsur-angsur semakin kecil. Selanjutnya, terjadi perpan-jangan yang cukup besar pada benda uji tanpa adanya penambahan gaya tarik. Fenomena ini disebut luluh dari bahan. Tegangan yang berkaitan dengan ini disebut tegangan luluh dari baja (Gere dan Timoshenko, 2000).

### 2.2 Kapasitas geser balok konvensional

Mengacu pada SNI 03-1729-2015 Pasal G2 ayat (1), kapasitas geser suatu balok konvensional dapat diperhitungkan dengan rumus :

$$V_n = 0,6 \cdot f_y \cdot A_w \cdot C_v$$

Untuk badan komponen struktur profil-I canai panas dengan:

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

maka :  $C_v = 1,0$

Tegangan geser bekerja sejajar sumbu y dan terdistribusi terbagi rata seluruh tebal badan. Rumus untuk tegangan geser:

$$v = \frac{VQ}{It}$$

Kontrol penampang menurut SNI 03-1729-2015 tabel B4. 1b:

Pelat sayap :

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} ; \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Pelat badan :

$$\lambda = \frac{h}{t_w} ; \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

### 2.3 Kapasitas geser *Castellated Steel Beam*

AISC (2003) menjelaskan mengenai gaya – gaya yang bekerja pada balok baja komposit berlubang, namun persamaan yang dihasilkan dapat diaplikasikan juga pada balok baja berlubang (non komposit). Untuk momen positif bagian di bawah lubang atau *bottom tee*, terkena gaya tarik,  $P_b$ , gaya geser,  $V_b$ , dan gaya momen sekunder,  $M_{bd}$  dan  $M_{bh}$ . Bagian atas dari lubang atau *top tee* terkena gaya tekan,  $P_t$ , gaya geser,  $V_t$ , dan gaya momen sekunder,  $M_{td}$  dan  $M_{th}$ .

Kapasitas geser nominal pada balok baja berlubang,  $V_m$ , merupakan penjumlahan dari kapasitas geser pada *bottom tee*,  $V_{mb}$ , dan *top tee*,  $V_{mt}$ .

$$V_m = V_{mb} + V_{mt}$$

$a_v$ , Rasio kapasitas geser nominal dari *Tee section*,  $V_{mb}$ , ataupun  $V_{mt}$ , terhadap kapasitas geser plastis dari badan *tee section*,  $V_{pb}$ , atau  $V_{pt}$ , dapat dihitung dengan persamaan:

$$a_v = \frac{V_{mb}}{V_{pb}} \text{ atau } \frac{V_{mt}}{V_{pt}} = \frac{\sqrt{6+\mu}}{v+\sqrt{3}}$$

Dengan nilai dari  $V_{pb}$ , atau  $V_{pt}$ , didapat dengan Persamaan:

$$V_{pb} \text{ atau } V_{pt} = \frac{F_y \cdot t_w \cdot S}{\sqrt{3}}$$

Kontrol Tekuk Badan untuk profil *Castellated* (eq. 4.2 ASCE journal page 3319):

$$\frac{d-2t_f}{t_w} \leq \frac{1365}{\sqrt{F_y}} ; \frac{d-2t_f}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{F_y}}$$

Untuk balok non-komposit dan balok komposit pada momen negatif digunakan rumus:

$$V_m \leq \frac{2}{3} V_p$$

Untuk balok komposit pada momen positif:

$$V_m \leq \frac{2}{3} V_p + V_c$$

Kontrol Kuat Geser (eq. 3.3a ASCE journal page 3317):

$$V_n = \Sigma V_{nt}$$

Untuk tee bawah dan atas :

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} V_{pt} \leq V_{pt}$$

## 2.4 Kegagalan *Castellated Steel Beam*

Salah satu kegagalan struktur baja adalah kegagalan tekuk/buckling. Pada umumnya, tekuk diakibatkan oleh gaya aksial, atau gaya yang bekerja pada sumbu utama penampang struktur. Tekuk pada profil baja terbagi terbagi menjadi 2 jenis, yaitu tekuk global dan tekuk lokal.

Tekuk merupakan suatu proses dimana suatu struktur tidak mampu mempertahankan bentuk aslinya, sehingga terjadilah perubahan bentuk dalam rangka menemukan keseimbangan baru. Tekuk merupakan fenomena instabilitas yang terjadi pada batang langsing, pelat dan cangkang yang tipis. Konsekuensi tekuk pada dasarnya adalah masalah geometrik dasar, dimana terjadi lendutan besar akan mengubah bentuk struktur.

Pada fenomena tekuk, struktur secara keseluruhan belum tentu gagal. Struktur dapat saja kembali seperti semula. Hal ini dikarenakan proses terjadinya buckling adalah pada daerah elastis. Sehingga ketika badan tekan yang terjadi dihilangkan, struktur akan kembali seperti semula. (Agus Triono, 2007).

Tekuk yang terjadi pada elemen-elemen pelat profil. Untuk IWF, elemen-elemennya ada tiga : sayap atas (*top flange*), sayap bawah (*bottom flange*), dan pelat badan (*web*).

Pada saat menerima momen lentur positif, seluruh *top flange* akan mengalami tegangan tekan, seluruh *bottom flange* akan mengalami tegangan tarik, sementara sebagian pelat badan akan mengalami tekan dan sebagian lainnya tarik.

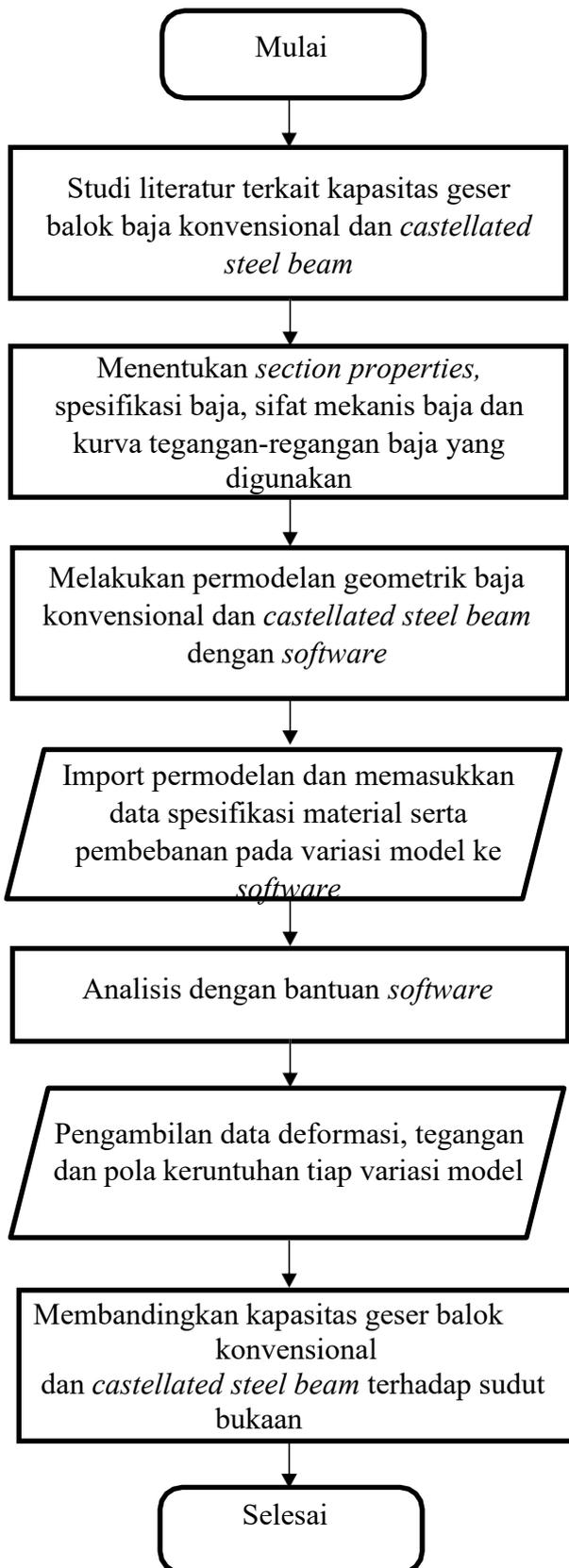
## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Umum

Benda uji yang direncanakan dan dianalisis pada penelitian ini adalah profil baja yang dibentuk sedemikian rupa sehingga memiliki bukaan pada bagian badannya. Penelitian ini merupakan percobaan eksperimental terhadap bentuk bukaan *heksagonal* dengan variasi sudut bukaan pada bagian badan profil baja. Bentuk variasi bukaan pada bagian badan yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah bukaan 20°, 30°, 45°, 55° dan 60°.

Untuk menganalisis kemampuan dari profil baja yang memiliki bukaan pada bagian badan digunakan bantuan program *software*. Penelitian dilakukan pada profil baja dengan bukaan pada bagian badannya yang difungsikan sebagai balok. Tumpuan yang digunakan pada balok adalah tumpuan sederhana (balok dengan tumpuan sendi dan sendi). Balok diberikan pembebanan dua beban terpusat pada dua titik. Panjang bentang elemen balok untuk konvensional dan *castellated steel beam* yang akan dianalisis memiliki panjang yang sama. Dari hasil yang didapatkan dari analisis akan dibandingkan kapasitas geser dari semua permodelan. Pada diagram alur dibawah akan menjelaskan secara umum proses pengerjaan penelitian ini dari awal sampai akhir.

**Diagram alur penelitian:**



**Tabel 3. 1.** Konsep Variabel dan Indikator Penelitian

Konsep	Variabel Bebas
Membandingkan nilai kapasitas geser balok baja konvensional 150.75.5.7, terhadap kapasitas geser masing-masing model <i>castellated steel beam</i> .	Besarnya kapasitas geser dari sudut bukaan heksagonal yang didapat dari tiap-tiap model <i>castellated steel beam</i> .
Variabel Terikat	Indikator
Variabel terikat pada penelitian ini adalah ditentukannya sudut bukaan tiap-tiap model <i>castellated steel beam</i> dengan nilai sudut bukaan sebesar 20°, 30°, 45°, 55° dan 60°.	Diberikannya nilai sudut bukaan pada pembuatan <i>castellated steel beam</i> ditunjukkan adanya penurunan kapasitas geser tiap-tiap permodelan <i>castellated steel beam</i> terhadap balok baja konvensional 150.75.5.7.

**3.2 Perencanaan Castellated Steel Beam**

Pada Penelitian ini, profil baja awal yang digunakan adalah profil WF 150. 75.5.7, dengan data sebagai berikut:

**Tabel 3. 2.** Data Balok Konvensional

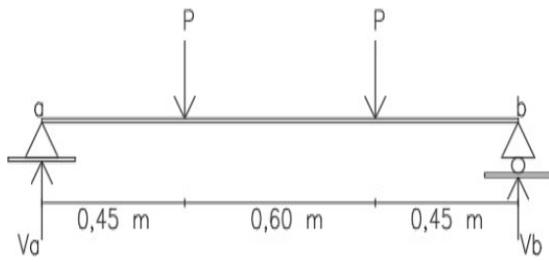
Data Balok WF 150.75.5.7					
E	=	200000 MPa	Fy	=	240 MPa
h	=	150 mm	Ix	=	666 cm <sup>4</sup>
b	=	75 mm	Iy	=	49,5 cm <sup>4</sup>
tw	=	5 mm	Zx	=	88,8 cm <sup>3</sup>
tf	=	7 mm	Zy	=	13,2 cm <sup>3</sup>
A	=	17,85 cm <sup>2</sup>	Rx	=	6,11 cm
Bj	=	14,0 kg/m	Ry	=	1,66 cm

(Sumber : Ir. Sunggono kh, 1995)

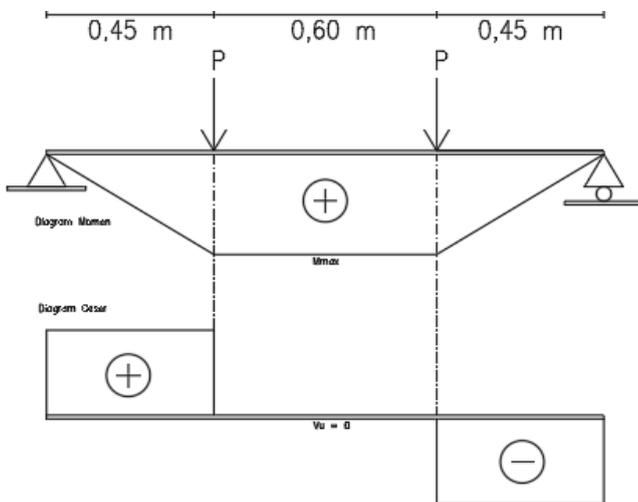
**3.3 Setup Pengujian**

Dengan mengikuti variasi para-meter pemotongan diatas, profil WF yang sudah dibentuk menjadi *cas-tellated steel beam* (seperti pada tabel 3.2) akan dianalisis. Profil

WF akan dianalisis sebagai elemen balok dengan tumpuan sederhana yang akan diberi dua beban terpusat.



(a)



(b)

**Gambar 3.1.** (a) Ilustrasi *setup* pengujian (b) Ilustrasi gaya dalam momen dan lintang pada balok.

**Tabel 3. 3.** Parameter Balok Konvensional dan *Castellated steel beam*:

Model	Parameter Bukaannya	Gambar
A <sub>0</sub>	$\phi = 0^\circ$ h = 150 mm	
A <sub>1</sub>	$\phi = 20^\circ$ dg = 168 mm e = 50 mm b = 50 mm	
A <sub>2</sub>	$\phi = 30^\circ$ dg = 179 mm e = 50 mm b = 50 mm	
A <sub>3</sub>	$\phi = 45^\circ$ dg = 200 mm e = 50 mm b = 50 mm	
A <sub>4</sub>	$\phi = 55^\circ$ dg = 210 mm e = 50 mm b = 50 mm	

### 3.3 Program *Software*

Teknologi *software* mekanis mempersatukan struktur dan material yang bersifat non-linear. *software* ini juga mengatasi masalah panas, struktur, elektromagnetik, dan ilmu bunyi. Program dapat digunakan dalam teknik sipil, teknik listrik, fisika dan kimia. Program ini merupakan tujuan utama dari paket permodelan elemen hingga untuk secara numerik memecahkan masalah mekanis yang berbagai macam. Masalah yang ada termasuk analisa struktur statis dan dinamis (baik linear dan non-linear), distribusi panas dan masalah cairan, begitu juga dengan ilmu bunyi dan masalah elektromagnetik.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Material

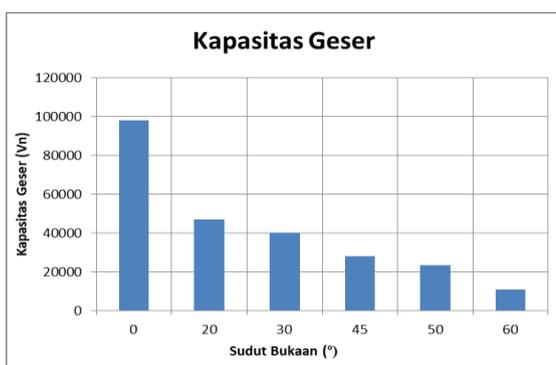
Yield strength, $f_y$	240	Mpa =	34833.091	Psi
Ultimate Strength, $f_u$	370	Mpa =	53701.016	Psi
Modulus Elastis, $E_s$	200000	Mpa =	29027576	Psi
Yield strain, $\epsilon_y$	0.0012			
Plateau strain, $\epsilon_{sh} = 6 \epsilon_y$	0.0072			
Ultimate strain, $\epsilon_{su}$	0.05			

### 4.2 Hasil permodelan

**Tabel 4.1.** Parameter Balok Konvensional dan *Castellated steel beam*:

Benda Uji	Sudut bukaan heksagonal	Bagian tanpa lubang	Bagian berlubang
Ao	0	6660000,00	
A1	20	8330326,67	7645730,00
A2	30	9641806,25	9131371,67
A3	45	12463340,00	12198316,67
A4	50	13958956,67	13768734,58
A5	60	18511190,42	18459107,08

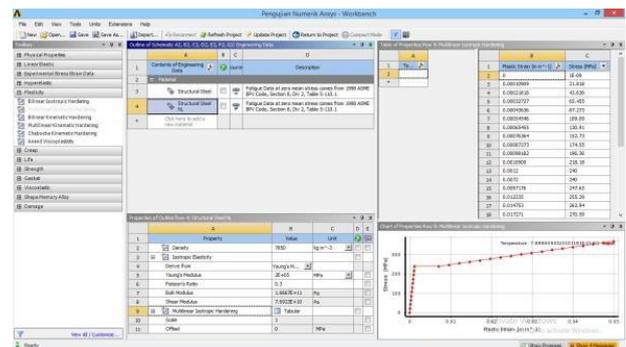
M	P	Kapasitas Geser, $V_n$ (kN)
Bagian tanpa lubang	Bagian berlubang	
98195,00		97,92
114170,00	7645730,00	46,85
124331,25	120126,25	40,03
144570,00	132070,00	27,96
154595,00	136893,75	23,22
182911,25	145500,00	10,97



**Gambar 4.1.** Hubungan kapasitas geser ( $V_n$ ) dengan sudut bukaan heksagonal berdasarkan Perhitungan Manual.

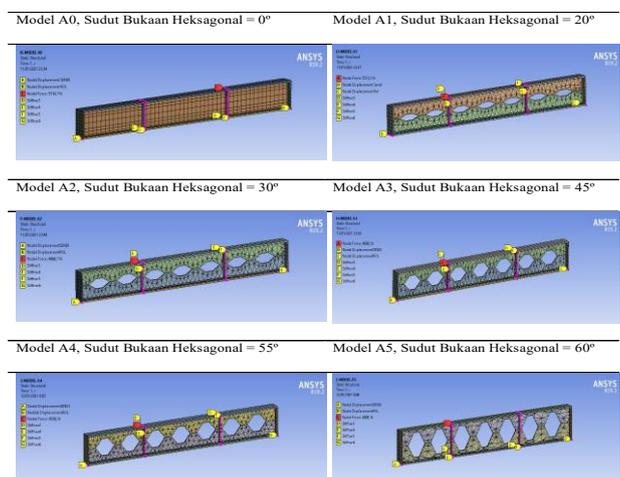
Dari tabel Rekapitulasi Perhitungan Manual di atas, menunjukkan nilai inersia penampang ( $I_x$ ) dan modulus plastis ( $Z_x$ ) dari masing-masing benda uji meningkat dengan bertambahnya besaran sudut bukaan heksagonal pada *castellated steel beam*. Namun jika dilihat dari hasil kapasitas geser ( $V_n$ ) yang diberikan, ditunjukkan bahwa saat diberikan sudut bukaan di antara  $20^0$  sd  $60^0$  akan menghasilkan nilai kapasitas geser menurun dibandingkan dengan balok konvensional.

Untuk memvalidasi hasil perhitungan manual berdasarkan persamaan ASCE journal page 3319 dalam penelitian ini digunakan pengujian numerik dengan program bantu komputer *Software*. Adapun tahap awal dalam pengujian numerik dengan program ini yaitu memasukkan data material berupa *Non Linier Steel (Structural Steel NL)*.



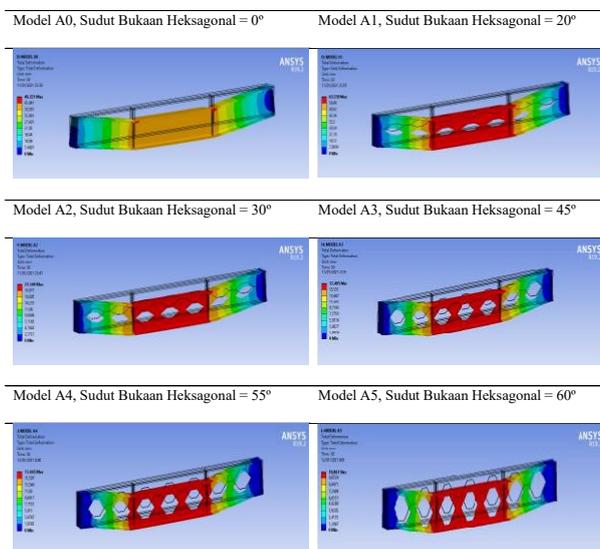
**Gambar 4.2.** Input data material baja pada program *software, Structural Steel NL*.

**Tabel 4. 2.** Model Pengujian Numerik dengan *Software*



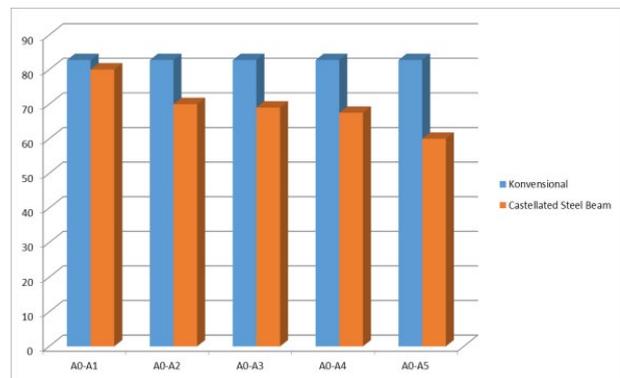
Pada Tabel 4.2 menunjukkan kondisi pemodelan benda uji dengan program. Definisi perletakan dan beban diterapkan pada titik-titik nodal yang telah ditentukan. Label A merupakan letak nodal beban. Sedangkan label B dan C merupakan nodal perletakkan sendi dan rol. Label D-G merupakan nodal untuk pengaku pada badan. Nodal pertelakan memiliki masing-masing 5 titik nodal, sedangkan nodal beban memiliki total 10 titik nodal, dibuatnya jumlah titik nodal ini agar pemecahan gaya tidak terkonsentrasi pada satu titik saja, sehingga dapat mendistribusikan gaya yang merata pada bagian sayap balok. Pemberian jumlah *load step* saat permodelan dengan *Software* sebanyak 30 step, sehingga didapat kurva yang tidak begitu kasar. Pola deformasi masing-masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pada deformasi ini perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, apakah pada balok terjadi *local buckling* atau tidak.

**Tabel 4. 3.** Pola deformasi pada benda uji



**Tabel 4.4.** Deformasi hasil dari Analisis Numerik

No	A0 (mm)	A1 (mm)	A2 (mm)	A3 (mm)	A4 (mm)	A5 (mm)
0	0	0	0	0	0	0
1	-0.19	-0.19	-0.15	-0.14	-0.14	-0.14
2	-0.38	-0.37	-0.30	-0.28	-0.28	-0.27
3	-0.57	-0.56	-0.45	-0.42	-0.42	-0.41
4	-0.76	-0.75	-0.60	-0.56	-0.56	-0.54
5	-0.95	-0.94	-0.74	-0.70	-0.69	-0.68
6	-1.14	-1.12	-0.89	-0.84	-0.83	-0.81
7	-1.33	-1.31	-1.04	-0.98	-0.97	-0.95
8	-1.54	-1.51	-1.19	-1.12	-1.11	-1.08
9	-1.77	-1.71	-1.34	-1.26	-1.25	-1.22
10	-2.02	-1.92	-1.50	-1.41	-1.39	-1.35
11	-2.29	-2.16	-1.65	-1.55	-1.53	-1.49
12	-2.57	-2.41	-1.82	-1.70	-1.68	-1.63
13	-2.88	-2.68	-1.99	-1.85	-1.82	-1.77
14	-3.21	-2.99	-2.18	-2.00	-1.97	-1.92
15	-3.57	-3.35	-2.38	-2.17	-2.13	-2.07
16	-3.97	-3.77	-2.60	-2.35	-2.29	-2.23
17	-4.42	-4.26	-2.86	-2.54	-2.49	-2.39
18	-4.91	-4.84	-3.16	-2.77	-2.73	-2.57
19	-5.47	-5.57	-3.49	-3.04	-3.04	-2.75
20	-6.15	-6.59	-3.87	-3.37	-3.46	-2.96
21	-7.02	-8.08	-4.29	-3.77	-3.87	-3.21
22	-8.28	-10.24	-4.76	-4.22	-4.34	-3.60
23	-10.36	-12.94	-5.35	-4.75	-4.89	-4.07
24	-13.29	-16.10	-6.10	-5.40	-5.53	-4.57
25	-16.78	-20.02	-7.12	-6.24	-6.30	-5.14
26	-20.69	-25.17	-8.52	-7.35	-7.27	-5.78
27	-25.05	-31.34	-10.43	-8.83	-8.56	-6.53
28	-29.94	-38.61	-12.76	-10.78	-10.31	-7.47
29	-35.60	-47.36	-15.75	-13.19	-12.73	-8.64
30	-42.39	-58.72	-19.58	-16.00	-16.11	-10.10



**Gambar 4.3.** Grafik hasil pengujian numerik menggunakan *software*, hubungan nilai kapasitas geser balok baja konvensional dengan masing-masing permodelan *castellated steel beam*.

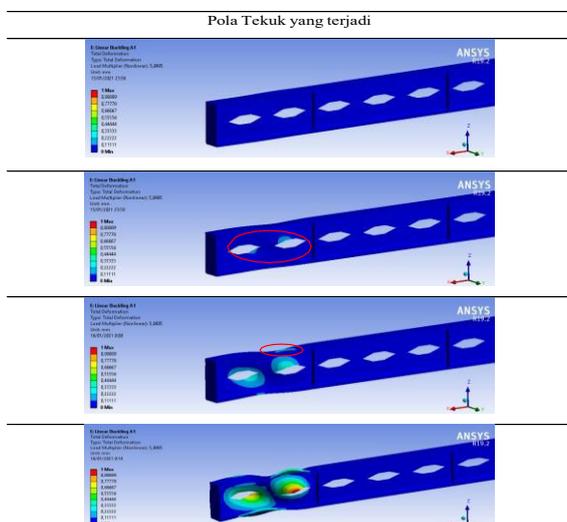
**Tabel 4. 5.** Perbandingan Beban Saat Leleh antara Analitis Manual dan Pengujian Numerik

Model	Sudut bukaan heksagonal (°)	Beban saat leleh, Py(kN)	
		Analitis manual	Pengujian Numerik
Ao	0	97,92	82,75
A1	20	46,85	80,00
A2	30	40,03	70,00
A3	45	27,96	69,00
A4	50	23,22	67,50
A5	60	10,97	60,00

Selisih Analitis vs Numerik	Sketsa rumusan analitis manual
0,15%	
-0,71%	
-0,75%	
-1,47%	
-1,91%	
-4,47%	

Dari Gambar 4.3 menunjukkan hasil dari pengujian numerik menggunakan *software*. Dapat dilihat bahwa hasil kapasitas geser pada *castellated steel beam* akan bervariasi. Jika dibandingkan dengan balok baja konvensional maka nilai kapasitas geser akan menurun seiring dengan bertambahnya sudut bukaan. Pada permodelan *castellated steel beam* dengan sudut bukaan  $20^\circ$  (Model A1) nilai kapasitas geser tidak jauh dibandingkan dengan balok baja konvensional. Sedangkan, pada sudut bukaan  $60^\circ$  (Model A5) nilai kapasitas geser menurun drastis dibandingkan dengan balok baja konvensional. Hal itu disebabkan tekuk yang terjadi pada badan Model A5 terjadi pada saat beban sebesar 34,20 kN atau sebesar 57% dibandingkan dengan beban tekuk seluruhnya pada Model A5. Tabel 4.6 menunjukkan perbandingan nilai beban yang menyebabkan balok baja mengalami leleh (batas elastis) dari hasil perhitungan manual dan pengujian numerik *Software*. Perbedaan selisih beban leleh antara analitis perhitungan manual dengan pengujian numerik maksimum tidak lebih dari 5%.

**Tabel 4. 6.** Ilustrasi pola tekuk yang terjadi pada penampang



Pola tekuk yang terjadi pada benda uji terlihat pada 1/3 bentang. Pola tekuk yang terjadi yaitu tekuk lokal pada badan dan sayap penampang. Terjadinya tekuk pada baja konvensional diawali saat persentase beban 56% dari beban tekuk seluruhnya yaitu sebesar 46,34 kN. Sedangkan pada *castellated steel beam*, terjadinya tekuk diawali pada persentase 57% dari beban tekuk seluruhnya. Tekuk yang terjadi pada tiap-tiap permodelan diawali dengan tekuk badan. Penjelasan besar beban terjadinya tekuk pada tiap-tiap permodelan akan ditampilkan pada tabel 4.7. untuk tekuk pada badan dan tabel 4.8. untuk tekuk pada sayap berikut:

**Tabel 4. 7.** Persentase beban tiap model saat terjadi tekuk badan, berdasarkan hasil analisis numerik dengan bantuan *software*.

Model	Sudut bukaan heksagonal ( $^\circ$ )	Persentase beban saat mulai terjadi tekuk lokal (%)
A0	$0^\circ$	56%
A1	$20^\circ$	57%
A2	$30^\circ$	57%
A3	$45^\circ$	57%
A4	$50^\circ$	57%
A5	$60^\circ$	57%

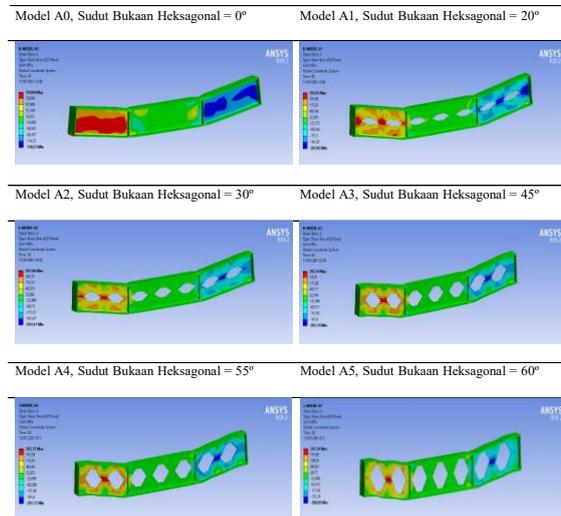
Beban saat mulai terjadi tekuk badan (kN)	Beban maksimum yang diberikan pada model (kN)
46,34	82,75
45,60	80,00
39,90	70,00
39,33	69,00
38,48	67,50
34,20	60,00

**Tabel 4. 8.** Persentase beban tiap model saat terjadi tekuk sayap, berdasarkan hasil analisis numerik dengan bantuan *software*.

Model	Sudut bukaan heksagonal (°)	Persentase beban saat mulai terjadi tekuk lokal (%)
A0	0°	58%
A1	20°	68%
A2	30°	68%
A3	45°	68%
A4	50°	68%
A5	60°	68%

Beban saat mulai terjadi tekuk sayap (kN)	Beban maksimum yang diberikan pada model (kN)
48,00	82,75
54,40	80,00
47,60	70,00
46,92	69,00
45,90	67,50
40,80	60,00

**Tabel 4. 9.** Visualisasi Hasil Tegangan Geser pada Penampang.

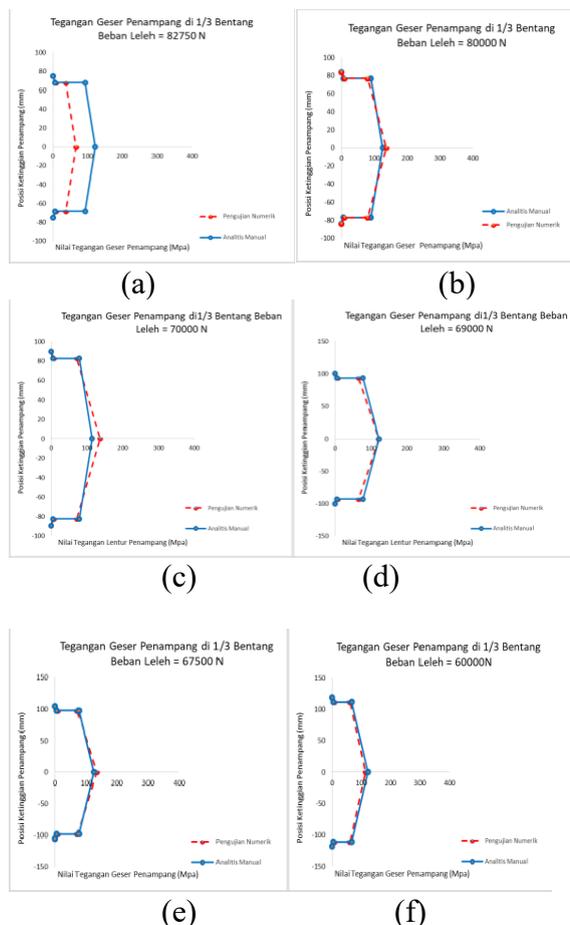


## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Pengaruh geometrik dari sudut bukaan heksagonal tiap-tiap model *castellated steel beam* terjadinya penambahan tinggi yang berbeda-beda pada penampang. Pengaruh geometrik tersebut juga menurunkan nilai kapasitas geser tiap-tiap permodelan *castellated steel beam* dibandingkan dengan balok konvensional.
2. Perbandingan nilai kapasitas geser balok baja konvensional terhadap nilai kapasitas geser *castellated steel beam* terlihat akan menurun seiring dengan bertambahnya sudut bukaan. Pada permodelan *castellated steel beam* dengan sudut bukaan 20° (Model A1) nilai kapasitas geser tidak jauh dibandingkan dengan balok baja konvensional. Sedangkan, pada sudut bukaan 60° (Model A5) nilai kapasitas geser menurun drastis dibandingkan dengan balok baja konvensional.
3. Dari hasil pengujian numerik menggunakan program *software* didapatkan:



**Gambar 4. 4.** Kurva Tegangan Geser tiap-tiap model (a) Model A<sub>0</sub>, (b) Model A<sub>1</sub>, (c) Model A<sub>2</sub>, (d) Model A<sub>3</sub>, (e) Model A<sub>4</sub>, (f) Model A<sub>5</sub>

a) Nilai deformasi yang didapat:

Model	Beban (kN)	Deformasi (mm)
A <sub>0</sub>	82,75	-33,11
A <sub>1</sub>	80,00	-39,56
A <sub>2</sub>	70,00	-14,37
A <sub>3</sub>	69,00	-14,63
A <sub>4</sub>	67,50	-14,90
A <sub>5</sub>	60,00	-16,19

b) Nilai tegangan (maksimum) yang didapat:

Model	Pengujian Numerik (MPa)	Analitis Manual (MPa)
A <sub>0</sub>	63,69	122,0
A <sub>1</sub>	127,0	125,7
A <sub>2</sub>	87,21	114,6
A <sub>3</sub>	98,66	122,5
A <sub>4</sub>	115,9	124,8
A <sub>5</sub>	91,95	123,6

c) Hasil pengujian numerik menggunakan program *software* menampilkan pola tekuk pada 1/3 bentang. Tekuk yang terjadi ialah tekuk lokal pada badan dan sayap.

## 5.2 Saran

1. Untuk tahap selanjutnya dilakukan Pengujian di laboratorium, guna memastikan pola tekuk yang terjadi pada penampang merupakan tekuk diagonal (tekuk akibat geser).
2. Penelitian bisa dilanjutkan dengan nilai inersia ditetapkan diawal, untuk mengetahui kapasitas geser tiap-tiap model *castellated steel beam* dengan nilai inersia yang sama.

## DAFTAR RUJUKAN

Altifillisch MD, Cooke BR and Toprac AA. (1957). "An investigation of open web expanded beams." Welding Research Council Bulletin Series No.47: 77-88.

- Bardley, Patrick. (2007). "Making Heksagonal Castellated Beam". The James F. Lincoln Arc Welding Foundation.
- Barkiah, Ida. Darmawan, AR. 2020. *Comparative analysis of the flexural capacity of conventional steel beams with Castellated Beams*. Indonesia: Department of Civil Enguneerung, Faculty of Engineering, Lambung Mangkurat University.
- Darmawan, AR et al. 2017. *Perilaku plate girder Badan Bergelombang*. Rekayasa Sipil 11(2):116-123. DOI:10.21776/ub.rekayasasipil/2017.01.1.02.5
- Departemen Pekerjaan Umum. 2015. *SNI 03 – 1729 – 2015 "Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural"*. Jakarta (ID): BSN
- Faress, Sameer S. Coulson, John.
- Dinehart, David W. 2016. *Castellated and Cellular Beam Design*. America: The United States of America. Gere, James M. Timoshenko, Stephen
- P. 1972. *Mekanika Bahan Jilid 1 Edisi Keempat*. Jakarta (ID): Penerbit Erlangga. Journal of Structural Engineering, 1992. "Proposed Specification for structural Steel Beams with Web Openings". ASCE. Volume 118 ; Issue Number: 12.
- L. Amayreh and M. P. Saka, 2005, "Failure Load Prediction of Castellated Beams Using Artificial Neural Networks", Department of Civil Engineering, University of Bahrain, Bahrain.
- Malley, James O. (2003). *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction (AISC), Vol. 40, pp. 133-138.
- I. Salmon, Charles G. Johnson, John E. 1996. *Steel Structures Design and Behavior Fourth Edition*. New York: Harper Collins Collage Publishers.
- Setiawan, Agus., 2008. "Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD Semarang: Erlangga.