

## ANALISIS PENGARUH JUMLAH PENGAKU TERHADAP PERILAKU BALOK KASTELA DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Havi Yoga Prastyo<sup>1</sup> dan Leo S. Tediato<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
Havi.325180123@stu.untar.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
leotedi@ft.untar.ac.id

Masuk: 23-01-2022, revisi: 22-03-2022, diterima untuk diterbitkan: 18-04-2022

### ABSTRACT

*Castellated beam is a modification of the IWF beam which is often used in construction purposes. The increase in beam height causes the strength and flexural stiffness increase. However, due to web openings, the failure behavior is more complex than IWF beam, particularly the web-post buckling phenomenon caused by the lack of lateral resistance in the web. Stiffeners can be solution to minimize buckling failures in the web-post. In this research, there are 5 cases of hexagonal beams with variations in the number of vertical stiffeners whose installation patterns were set every  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{6}$ ,  $\frac{1}{12}$  spans. The analysis was carried out using the finite element method (MIDAS FEA v1.1). The results of the analysis showed that stiffeners can prevent web-post buckling due to concentrated loads. The highest increase in load capacity occurred in case 5, which was 28,53%. The effect of a pair of stiffeners in increasing the strength of the castellated beam was 2,19% to 2,57%. From the results of the study, it can be concluded that the greater the number of stiffeners installed, the greater the increase in load capacity, but the smaller the effect of a pair of stiffeners in providing strength to the castellated beam.*

*Keywords: castellated beam, vertical stiffeners, web-post buckling, finite element method*

### ABSTRAK

*Balok kastela merupakan modifikasi bentuk dari balok IWF yang sering digunakan dalam keperluan konstruksi. Peningkatan tinggi dimensi pada balok kastela menyebabkan peningkatan pada kekuatan dan kekakuan lenturnya tanpa disertai penambahan beban. Namun adanya bukaan di sisi web, perilaku kegagalan pada balok kastela lebih kompleks dibandingkan balok IWF, khususnya fenomena tekuk pada web-post yang disebabkan oleh kurangnya tahanan lateral pada badan. Pengaku dapat menjadi salah satu solusi untuk meminimalisasi kegagalan tekuk pada pelat badan. Pada penelitian ini, terdapat 5 studi kasus balok kastela dengan bukaan heksagonal dengan variasi jumlah pengaku vertikal yang pola pemasangannya ditetapkan setiap  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{6}$ ,  $\frac{1}{12}$  bentang. Analisis dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan software MIDAS FEA v1.1. Hasil analisis memperlihatkan bahwa pemasangan pengaku vertikal pada balok kastela dapat menghindari tekuk pada web-post akibat beban terpusat. Peningkatan kapasitas beban tertinggi terjadi pada kasus 5 yaitu sebesar 28,53%. Pengaruh sepasang pengaku dalam memberikan penambahan kekuatan balok kastela pada setiap kasus sebesar 2,19% sampai 2,57%. Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan semakin banyak jumlah pengaku vertikal yang terpasang, semakin besar peningkatan kapasitas beban, namun semakin kecil pengaruh sepasang pengaku dalam memberikan kekuatan pada balok kastela.*

*Kata kunci: balok kastela, pengaku vertikal, tekuk pelat badan, metode elemen hingga*

### 1. PENDAHULUAN

Balok kastela adalah bentuk modifikasi geometri baja yang banyak digunakan untuk keperluan konstruksi. Balok kastela mengalami peningkatan tinggi sebesar 40-60% dari balok induknya, yaitu IWF (Sonck & Belis, 2017). Sehingga balok kastela mengalami peningkatan pada momen inersia dan modulus penampangannya. Karena hal itu, kekuatan dan kekakuan lenturnya meningkat juga tanpa adanya pertambahan beban pada struktur (Megharief, 1997). Selain itu, balok kastela mengalami peningkatan pada kapasitas momen lenturnya juga (Pachpor et al., 2011).

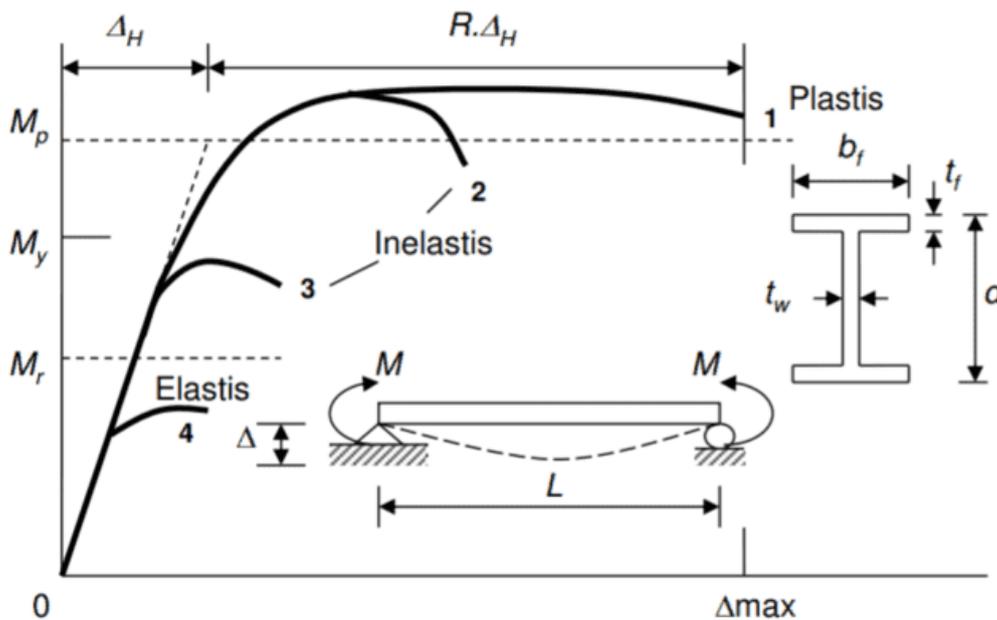
Bukaan pada balok kastela membuat kekakuan torsi dan lateral berkurang sehingga menyebabkan defleksi lateral pada balok bertambah besar (Demirdjian, 1999). Berdasarkan penelitian Kerdal & Nethercot (1984), terdapat enam kegagalan umum yang dapat terjadi pada balok kastela, yaitu *vierendeel mechanism*, mekanisme lentur, tekuk torsi lateral, putusnya sambungan las, *web-post buckling* akibat geser, dan *web-post buckling* akibat tekan.

Efek negatif lain yang disebabkan oleh adanya bukaan adalah gaya geser yang tidak terdistribusi secara merata dan timbulnya konsentrasi tegangan yang dapat mengakibatkan *web-post buckling* pada balok kastela. Pemasangan pengaku vertikal pada *web-post* bisa menjadi langkah preventif untuk meminimalisasi terjadinya kegagalan tekuk khususnya *web-post buckling*. Adanya pengaku vertikal dapat membuat tegangan terdistribusi lebih merata sehingga *web-post buckling* dapat dihindari sebelum penampang menjadi plastis seluruhnya.

Penelitian dilakukan secara uji numerik dengan metode elemen hingga dengan menggunakan perangkat lunak MIDAS FEA V1.1. Analisis yang dilakukan terjadi 2 tahap. Tahap yang pertama melakukan *linear buckling analysis* untuk mencari *eigenvalue* dan *mode shape* pada setiap kasus, lalu tahap yang kedua melakukan *nonlinear static analysis* untuk mendapatkan beban ultimit saat kondisi pelelehan yang dapat dicapai oleh setiap kasusnya. *geometry nonlinearity* tidak dipertimbangkan sehingga hasil analisis akan berfokus kepada ketidaksempurnaan material leleh.

**Tekuk torsi lateral**

Beban yang terkonsentrasi bisa membuat struktur balok mengalami tekuk ke samping pada bagian flens balok (daerah tegangan tekan penampang). Tekuk ini biasanya disebut tekuk torsi lateral. Fenomena tekuk torsi lateral dapat dijadikan batas kegagalan pada balok kastela. Menurut Yura et al. (1978), terdapat 3 jenis perilaku umum balok yaitu perilaku plastis ( $L_b < L_p$ ), perilaku inelastis ( $L_p < L_b < L_r$ ), dan perilaku elastis ( $L_b > L_r$ ) yang dapat dilihat pada Gambar 1. Perilaku inelastis dapat dibagi menjadi 2, yaitu keadaan inelastis ketika sudah melewati momen plastis, terjadi saat rasio badan dan flens adalah kompak, dan keadaan inelastis ketika penampang mengalami momen kritis (sebelum mencapai momen plastis) saat rasio badan dan flens non-kompak/langsing. Keadaan plastis akan mengalami *large deformation* setelah melewati momen plastis sedangkan pada perilaku inelastis dan elastis, deformasi yang dialami balok akan terjadi secara tiba-tiba.



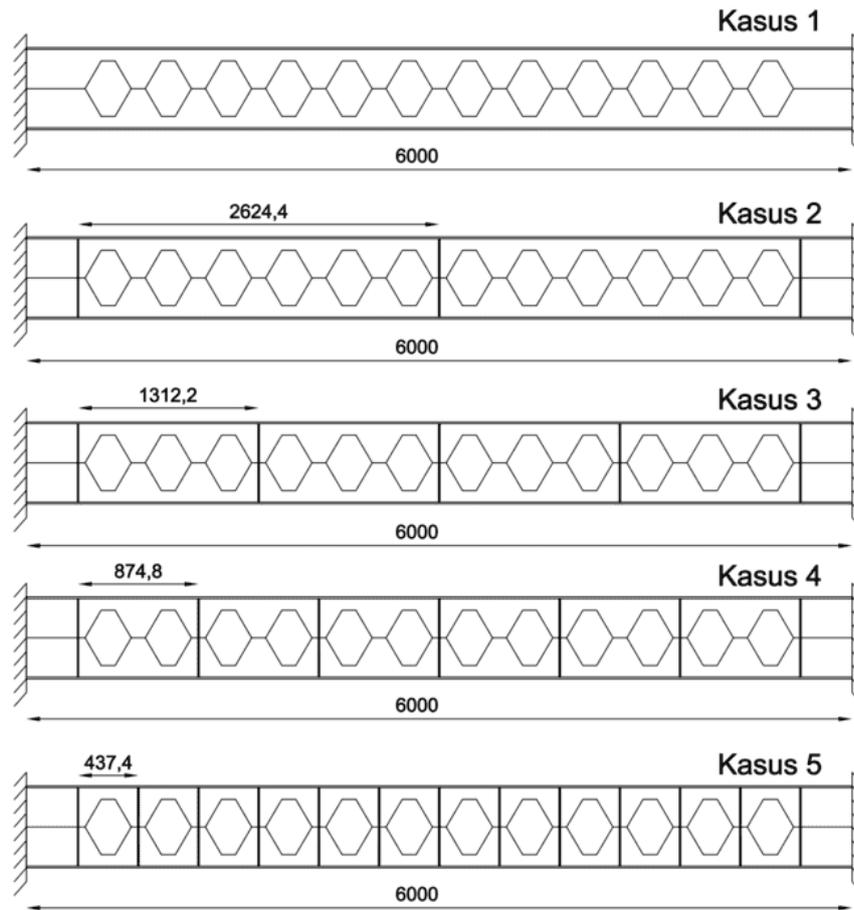
Gambar 1 Jenis-jenis perilaku tekuk torsi lateral (Sumber: Yura et al., 1978).

**Studi kasus**

Terdapat 5 studi kasus yang dipakai dalam analisis, dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian ini akan memakai balok kastela HC 600 x 200 x 8 x 13. Geometri dan material yang dipakai berdasarkan spesifikasi pabrikan, mengacu pada JIS 3101:2015 dan parameter lubang yang dipakai mengacu pada JIS 3192:2014 yang dapat dilihat pada Gambar 3. Pada Tabel 1 dijabarkan dimensi-dimensi balok kastela yang dipakai.

Tabel 1. Spesifikasi Penampang HC 600 x 200 x 13 x 8

d	$b_f$	$t_f$	$t_w$	$D_o$	s	e	b
600 mm	200 mm	13 mm	8 mm	405 mm	437,4 mm`	101,25 mm	117,45 mm



Gambar 2. Studi kasus yang dipakai dalam analisis.

Desain bukaan yang ditentukan mengikuti panduan yang diberikan oleh *Eurocode 3* berdasarkan pertimbangan yang konservatif di lapangan (Persamaan 1 sampai Persamaan 5).

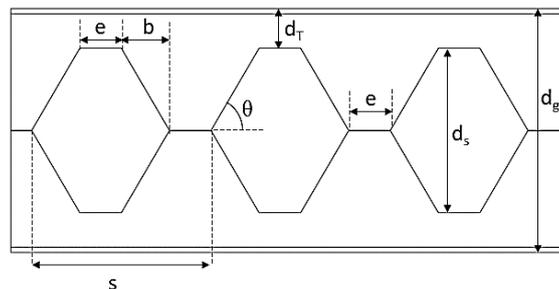
$$1,08 < \frac{S}{D_o} < 1,5 \quad (1)$$

$$1,25 < \frac{D}{D_o} < 1,75 \quad (2)$$

$$D_o \leq 0,8 D \quad (3)$$

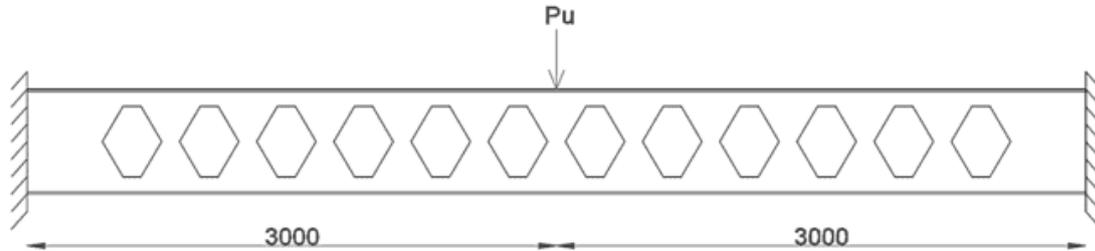
$$e \leq 0,4 D_o \quad (4)$$

$$\text{Width of End post} \geq 0,5 D_o \quad (5)$$



Gambar 3 Parameter bukaan pada balok kastela.

Perletakan yang dipakai pada kedua ujungnya adalah jepit (*fixed*) dengan pertimbangan translasi dan rotasi akan dikunci ke segala arah dengan tujuan agar struktur balok memiliki perilaku yang menyerupai balok pada portal (terdapat momen ujung). Pada Gambar 4, terlihat beban yang dipakai adalah beban terpusat ( $P_u$ ) yang didistribusikan merata secara melintang di tengah bentang agar menimbulkan efek *web-post buckling* yang diakibatkan oleh beban terpusat. Beban sendiri pada balok diabaikan.



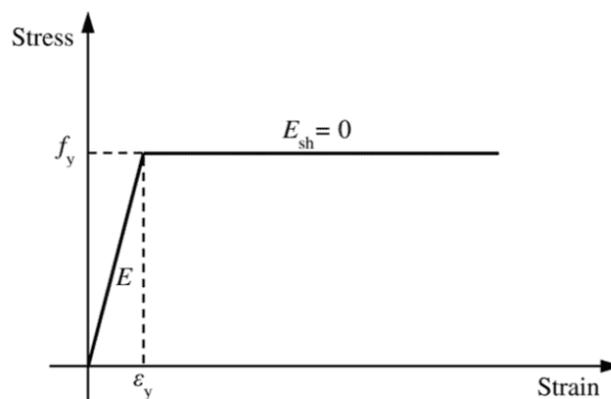
Gambar 4 Ilustrasi pembebanan dan perletakan (tampak samping).

Jenis pengaku yang dipasang pada balok kastela adalah pengaku vertikal yang berasal dari pelat baja. Pengaku vertikal akan diletakan di sumbu tengah pada *web-post* dan diletakkan secara berpasangan (bagian depan dan belakang) yang sudah sesuai dengan ketentuan *Eurocode 3* dan *JIS 3101:2015*. Pengaku vertikal mempunyai sifat dan karakteristik yang sama dengan material pada balok kastela dengan tebal yang sama dengan *web* yaitu 8 mm. jumlah pengaku pada setiap kasus dibedakan dengan jarak antar pengaku yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Konfigurasi Pemasangan Pengaku Vertikal untuk Setiap Kasus

Kasus	Jarak antar pengaku	Jumlah pengaku
1	-	-
2	2624,4 mm	3 pasang
3	1312,2 mm	5 pasang
4	874,8 mm	7 pasang
5	437,4 mm	13 pasang

Balok kastela dan pengaku memiliki bahan material dasar baja dengan grade SS400 (*structural steel*) dengan tidak memepertimbangkan tegangan sisa pada penampang, dengan modulus elastisitas ( $E$ ) sebesar 200000 MPa dan poisson's ratio 0,3. Tegangan batas leleh baja ditetapkan sebesar 250 MPa. Hubungan tegangan-regangan yang dipakai dalam analisis diasumsikan *elastic, perfectly plastic* dengan persamaan grafik yang dapat dilihat pada Gambar 5. Menurut Yun & Gardner, (2017), model hubungan tegangan-regangan ini dapat dipakai untuk membuat simplifikasi pada perhitungan di MIDAS FEA dan perilaku *strain-hardening* diabaikan karena model yang dipakai bersifat inelastik dan plastis dimana tekuk torsi lateral terjadi setelah penampang menjadi sepenuhnya plastis sehingga batas kegagalan balok kastela dibatasi oleh momen plastis (perilaku pelelehan).



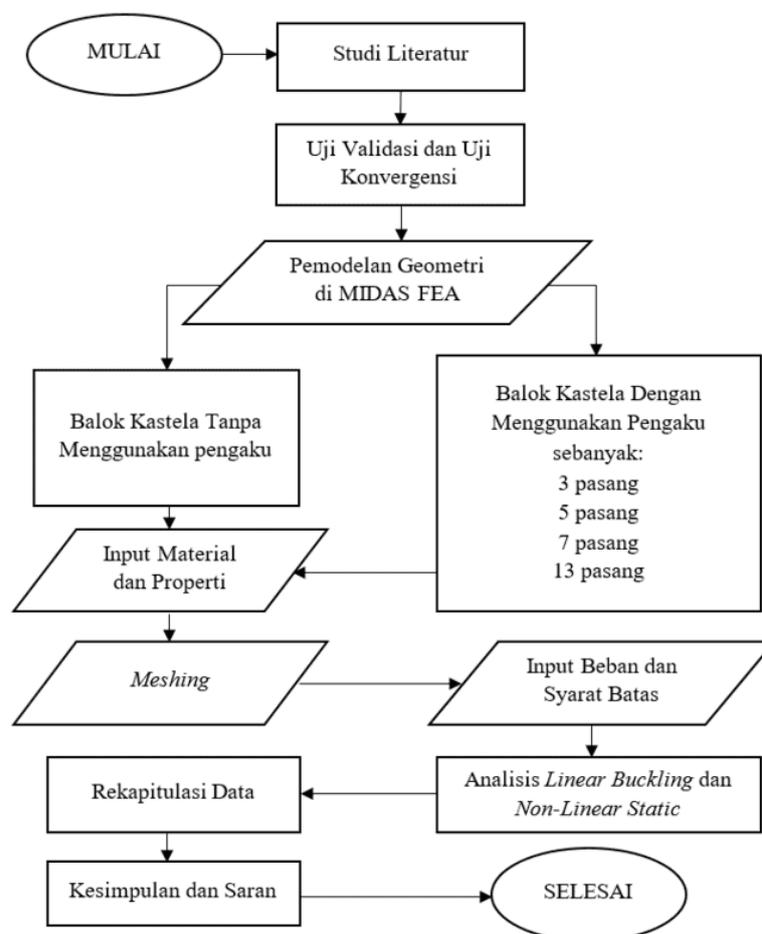
Gambar 5 Model *elastic, perfectly plastic* (Sumber: Yun & Gardner, 2017).

Elemen yang digunakan dalam penelitian adalah *shell* dengan 4 nodal/eleman untuk elemen *quadrilateral* dan 3 nodal/eleman untuk elemen *triangle*. Setiap nodalnya memiliki 6 DOF (*degree of freedom*) dimana elemen memiliki tingkat keakuratan *first order element* dimana hubungan interpolasi antar nodal bersifat linear. Elemen bersifat *full integration element*, dimana integrasi elemen yang memakai keseluruhan nodal untuk merakit matriks kekakuan, massa, dan beban. Untuk *flange* dipakai mesh bentuk *quadrilateral* sedangkan untuk *web* dipakai bentuk *triangle* karena adanya bukaan pada *web*.

## 2. METODE PENELITIAN

### Prosedur penelitian

Penelitian ini dimulai dari proses studi literatur dimana peneliti mengumpulkan informasi mengenai balok kastela, perilaku kegagalan balok kastela, metode elemen hingga dan teori-teori yang berkaitan dengan penelitian. Setelah itu uji validasi dan konvergensi dilakukan untuk mengetahui asumsi-asumsi yang bisa dipakai untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Setelah itu proses analisis dengan metode elemen hingga menggunakan MIDAS FEA dapat dilakukan dan alur penelitian selanjutnya dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Diagram alir penelitian.

### Metode elemen hingga

Penelitian yang akan dilakukan melakukan analisis dengan metode elemen hingga menggunakan bantuan *software* MIDAS FEA v1.1. metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik yang memakai operasi matriks untuk menyelesaikan masalah fisik yang dijelaskan dengan persamaan diferensial parsial dengan cara membagi kasus menjadi elemen-elemen kecil yang sederhana sehingga bisa didapatkan model penyelesaian matematika yang lebih sederhana. Langkah-langkah umum dalam penyelesaian masalah dengan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

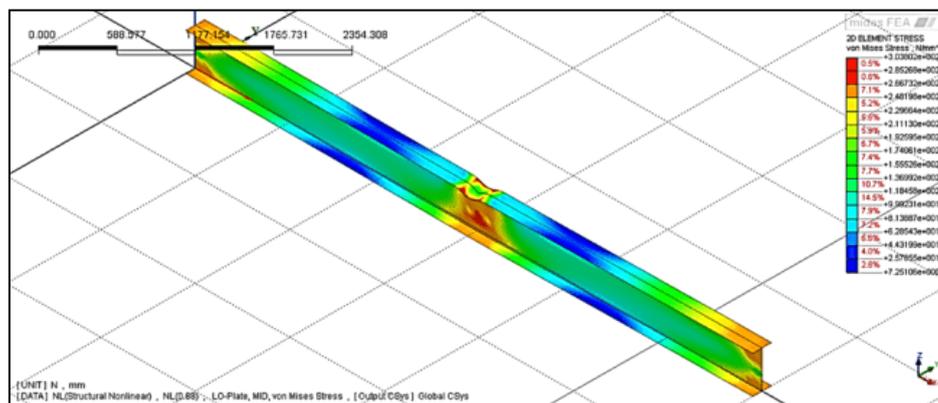
1. Pemilihan konfigurasi elemen;
2. Pemilihan fungsi pendekatan;

3. Menentukan hubungan tegangan-regangan;
4. Menurunkan persamaan elemen;
5. Menggabungkan persamaan-persamaan elemen;
6. Memasukkan syarat-syarat batas;
7. Menyelesaikan besaran pertama dengan metode iterasi;
8. Menyelesaikan besaran kedua;
9. Menginterpolasi hasil.

### Uji validasi terhadap AISC 360-16

Untuk mengetahui tingkat akurasi analisis menggunakan MIDAS FEA, dilakukan perbandingan beban ultimit saat leleh antara hasil dari MIDAS FEA dengan hasil perhitungan dari persamaan rumus ANSI/AISC 360-16. Struktur yang dianalisis adalah balok IWF 400 x 200 x 8 x 13 dengan bentang 6 meter. Asumsi pembebanan dan perletakkan disamakan dengan studi kasus yang sudah ditetapkan.

Hasil yang diperoleh mengatakan bahwa beban ultimit yang didapatkan dari persamaan AISC 360-16 sebesar 426,0107 kN. Sedangkan hasil analisis dari MIDAS FEA sebesar 391,7188 kN yang dapat dilihat pada Gambar 7. Persentase penyimpangan yang didapatkan adalah sebesar 8,05% (dibawah 10%). Sehingga dapat dikatakan hasil analisis *nonlinear static* dengan MIDAS FEA untuk mencari beban ultimit saat leleh memberikan hasil yang cukup akurat.



Gambar 7 hasil analisis uji validasi dengan IWF 400 x 200.

### Uji validasi terhadap uji eksperimental

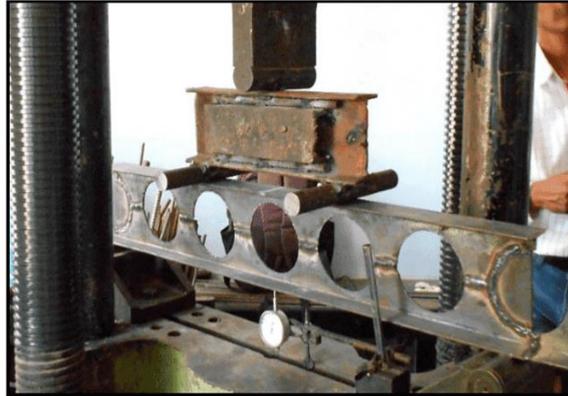
Untuk memastikan batasan kegagalan leleh pada MIDAS FEA lebih lanjut, selain membandingkan hasil analisis MIDAS FEA dengan AISC 360-16, diperlukan juga uji validasi untuk membandingkan hasil analisis MIDAS FEA terhadap suatu uji eksperimental di laboratorium. Jamadar & Kumbhar, (2015) melakukan penelitian mengenai kapasitas beban saat leleh pada balok kastela (Gambar 8). Peneliti mengambil salah satu sampel balok kastela yang akan dipakai untuk uji validasi.

Penampang yang digunakan dalam uji validasi adalah CB 150 x 60 x 5 x 5 dengan bentang 900 mm. Pembebanan yang digunakan adalah beban terpusat di setiap sepertiga bentang dan perletakkan yang digunakan adalah sendi-sendi di kedua ungunya.

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, dapat dilihat beban leleh yang terjadi pada balok kastela sebesar 32,5 kN. Dan tegangan *vonmises* yang terjadi adalah 255,019 MPa. Sedangkan hasil analisis *nonlinear static* pada MIDAS FEA menghasilkan nilai beban leleh dan tegangan yang cukup mendekati yaitu sebesar 32,9 KN untuk beban lelehnya dan sebesar 254,663 MPa untuk tegangan *vonmises*. Dapat dilihat pada Tabel 3, persentase penyimpangan tertinggi adalah sebesar 1,231%.

### Uji konvergensi

Uji konvergensi bertujuan untuk mendapatkan hasil yang dapat diterima dan ditoleransi. Uji konvergensi dilakukan sebelum setiap studi kasus dianalisis agar dapat memastikan ukuran elemen yang optimal, dengan waktu yang seefisien mungkin. Semakin besar ukuran elemen yang dipakai, semakin sedikit jumlah total elemen, dan proses analisis akan memakan waktu lebih cepat dengan catatan hasilnya mungkin kurang tepat, sebaliknya, semakin kecil ukuran elemen yang dipakai, semakin dekat hasilnya dengan hasil eksak, tetapi proses analisis akan memakan waktu lebih lama.

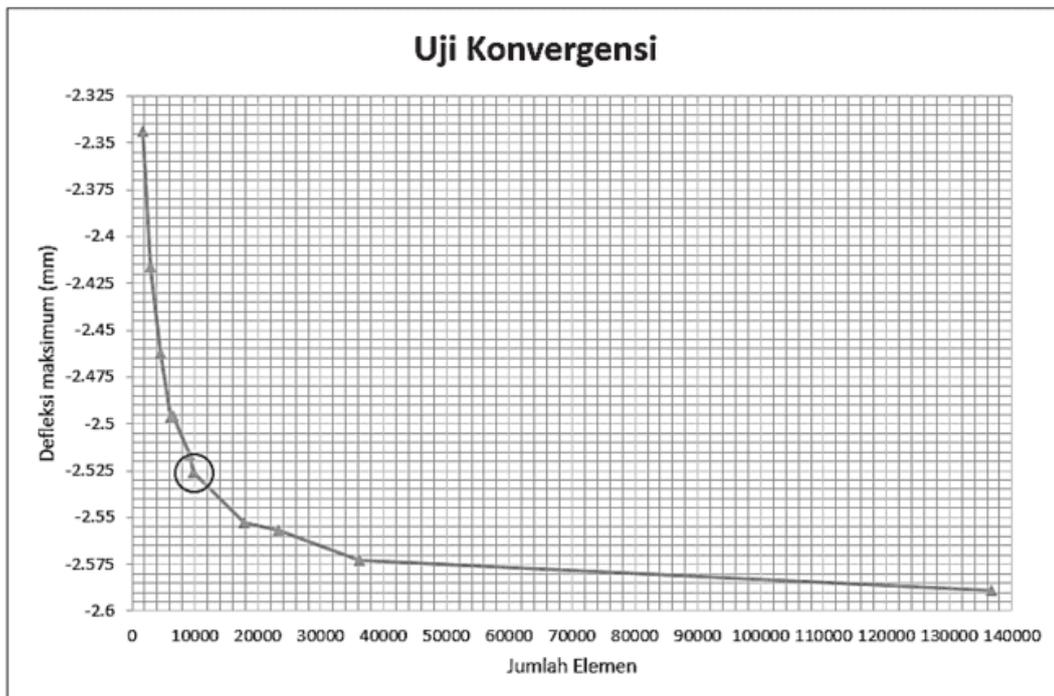


Gambar 8 Uji eksperimental yang dilakukan oleh Jamadar dan Kumbhar (Sumber: Jamadar & Kumbhar, 2015).

Tabel 3. Perbandingan Uji Eksperimental dengan MIDAS FEA

Pengujian	Load at yield	Vonmises Stresses
Eksperimental	32,5 kN	255,019 MPa
MIDAS FEA	32,9 kN	254,663 MPa
% Penyimpangan	1,231%	0,14%

Uji konvergensi dilakukan terhadap kasus 1 (balok kastela tanpa pengaku). Pada uji konvergensi, jumlah elemen yang ditetapkan dibuat bervariasi dengan membedakan ukuran elemen yang digunakan. Dari hasil uji konvergensi, dapat dilihat pada Gambar 9 bahwa *meshing* yang menghasilkan kurang lebih 10000 elemen dapat dipakai untuk menghasilkan perhitungan yang optimal dan dapat ditoleransi pada analisis *linear buckling* maupun analisis *nonlinear static*.



Gambar 9 Uji konvergensi defleksi dengan sampel HC 600 x 200.

### Material dan properti

Material yang digunakan homogen/*isotropic* untuk balok kastela dan pengaku yaitu baja (*steel*) SS400 dengan asumsi material:

- Elastic modulus (E): 200000 MPa
- Poisson's ratio: ( $\mu$ ): 0,3
- Weight Density (w): 7,85e-005 N/m
- Model Type: Vonmises (elastic perfectly plastic)
- Initial Yield Stress ( $f_y$ ): 250 MPa

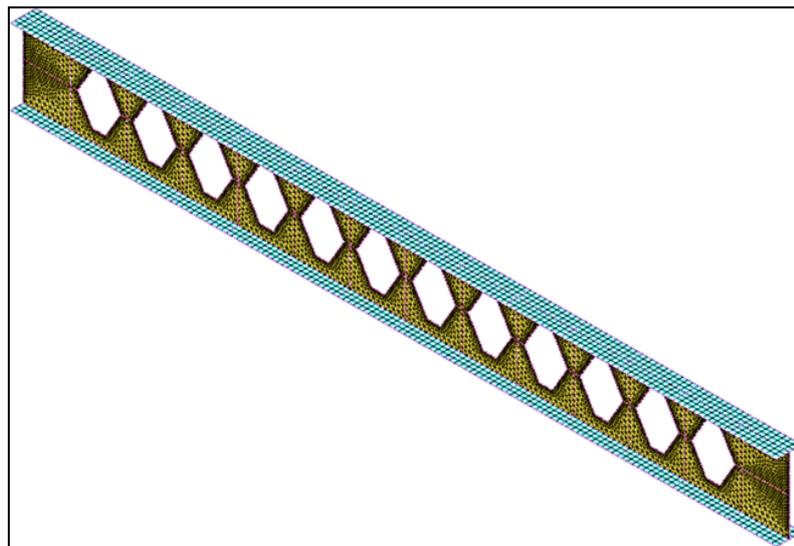
Properti yang digunakan bertipe 2 dimensi berjenis *plate* dengan tebal yang disesuaikan dengan data penampang dengan asumsi deformasi akibat geser tidak diabaikan.

**Diskritisasi elemen**

Tabel 4. Diskritisasi Elemen di Setiap Kasus

Kasus	Jumlah nodal	Jumlah elemen <i>quadrilateral</i>	Jumlah elemen <i>triangle</i>	Jumlah total elemen
1	6171	1800	7684	9484
2	6429	1800	8242	10042
3	6601	1800	8614	10414
4	6773	1800	8986	10786
5	7289	1800	10102	11902

Tabel 4 menunjukkan konfigurasi jumlah elemen pada setiap kasus, berdasarkan hasil uji konvergensi, maka jumlah elemen pada setiap kasus berkisar di antara 9000 sampai 12000, dengan jumlah nodal diantara 6000 sampai 7300. Dapat dilihat pada Gambar 10 untuk diskritisasi elemen pada kasus 1 dan Gambar 11 untuk diskritisasi elemen pada kasus 5.



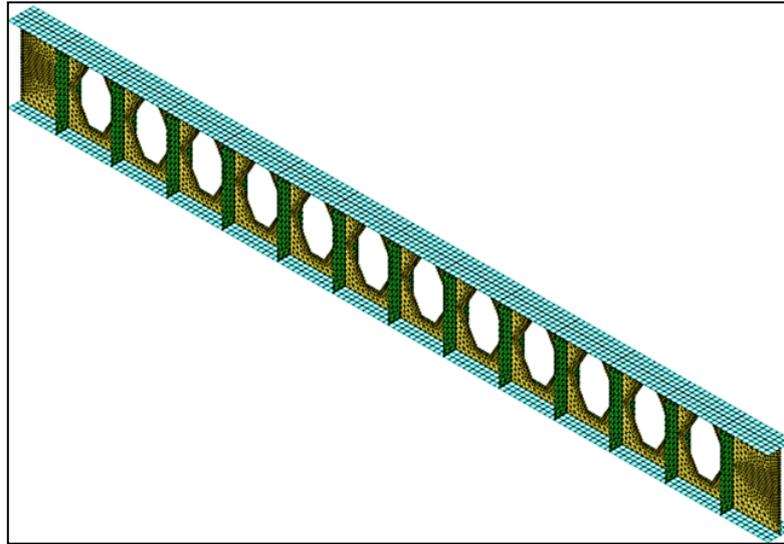
Gambar 10 Diskritisasi elemen pada kasus 1.

**Analisis linear buckling**

Analisis *linear buckling* dilakukan untuk melihat *mode shape* dan *eigenvalue* yang terjadi pada setiap kasus. Resultan beban yang ditentukan sebesar 1 kN. Hasil analisis *linear buckling* pada MIDAS FEA menghasilkan beberapa *mode shape* dan *eigenvalue* yang bisa diatur oleh peneliti. *Eigenvalue* yang bernilai positif pertama diambil sebagai pola tekuk yang terjadi pada balok kastela dan nilai *eigen* yang menyebabkan tekuk torsi lateral pada balok kastela dipakai untuk analisis *nonlinear static* sebagai nilai resultan beban yang akan diaplikasikan.

Nilai *eigen* atau *Eigenvalue* adalah nilai besaran gaya/beban yang mengakibatkan tekuk (*buckling*) pada struktur, sedangkan *mode shape* atau sering disebut *eigenvectors* adalah bentuk/arah dari perilaku tekuk yang diakibatkan oleh

nilai *eigen*. Tekuk akan terjadi ketika kekakuan tegangan direduksi oleh beban tekan dari kekakuan elastis sehingga resultan struktur tereduksi sampai nol.



Gambar 11 Diskritisasi elemen pada kasus 5.

### Analisis nonlinear static

Analisis *nonlinear static* menghasilkan *load factor* untuk mencari kapasitas beban ultimate (*load capacity*). Pada pemodelan di MIDAS FEA, kriteria kegagalan yang digunakan adalah *vonmises*. Kriteria tersebut menyatakan bahwa kegagalan struktur akan terjadi jika tegangan *vonmises* pada struktur mencapai nilai tegangan leleh material. *Load step* dan jumlah iterasi yang digunakan dalam analisis harus ditentukan sebelum proses analisis *nonlinear* dimulai. Saat proses analisis *nonlinear* berlangsung, beban akan ditambahkan secara bertahap serta matriks kekakuan akan terus diperbaharui di setiap iterasinya. Batas kegagalan yang ditetapkan berdasarkan uji validasi yang sudah dilakukan adalah 1 step sebelum struktur mengalami plastis total dan tegangan *von-mises* sudah melewati tegangan leleh, atau terjadi *large displacement* pada struktur. Kriteria konvergen yang dipakai adalah *energy norm*, *displacement norm*, dan *force norm*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan **Error! Not a valid bookmark self-reference.** mengenai hasil yang didapatkan dari MIDAS FEA dalam analisis *linear buckling*, dapat dinyatakan bahwa balok kastela tanpa pengaku mengalami *web-post buckling*. Hal tersebut terjadi karena lubang pada balok kastela menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada sisi-sisi bukaan yang akhirnya menyebabkan *web-post* sudah tidak dapat menahan tegangan tekan akibat beban terpusat dan kurangnya tahanan lateral yang memadai pada *web-post*.

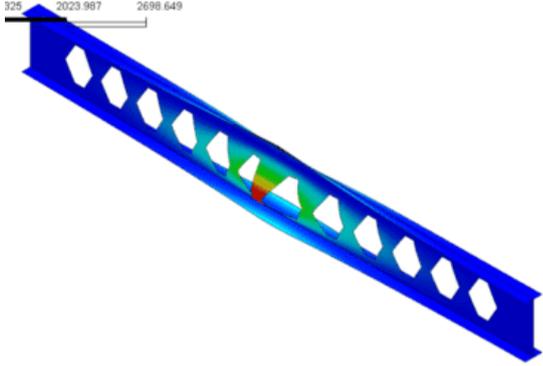
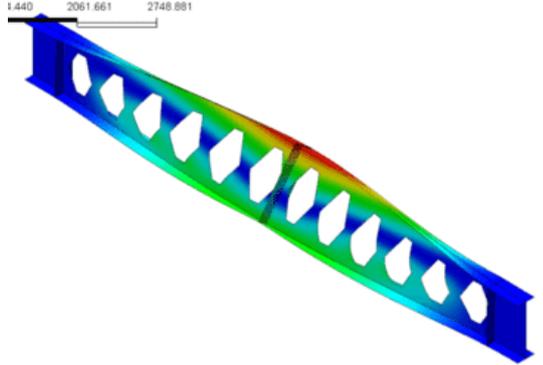
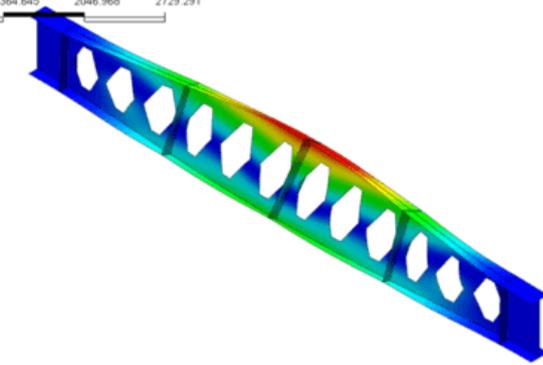
Setelah pengaku diletakkan pada beban terpusat dan perletakan yang merupakan sebuah daerah kritis, *web-post buckling* tidak terjadi. Hal ini dikarenakan adanya tahanan lateral pada *web-post* yang diberikan oleh pengaku vertikal, hingga simpangan lateral pada *web-post* dapat terminimalisasikan. Kehadiran pengaku vertikal berperan sebagai kolom pendek tunggal yang akan menjadi penghubung yang tepat untuk menghantarkan beban ke *flange* bawah.

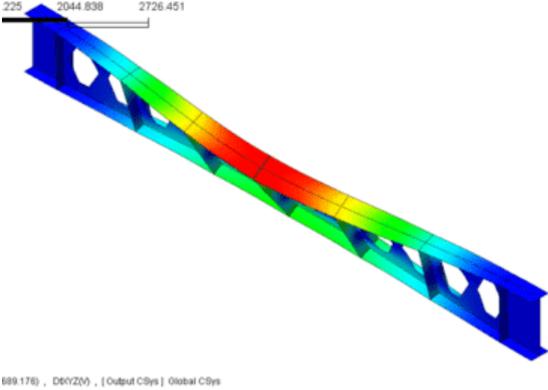
Dapat dilihat pada **Error! Not a valid bookmark self-reference.** bahwa kasus 2 sampai kasus 5 menunjukkan perilaku tekuk yang sama pada *mode shape* pertamanya yaitu tekuk torsi lateral. Hal ini disebabkan karena dukungan lateral kurang memadai pada sayap tekannya (*top flange*) dan kekakuan torsi badan yang berkurang akibat adanya lubang pada badan karena pengaku vertikal tidak terlalu efektif untuk meningkatkan kekakuan torsi secara keseluruhan.

Perilaku yang dialami kasus 1 dan 2 adalah tekuk torsi lateral inelastis dimana panjang bersih tidak terkekang secara lateralnya berada diantara batas tekuk torsi lateral elastis dan kondisi pelelehan ( $L_p < L_b < L_r$ ) dan penampang *net* pada balok kastela juga memiliki *web* dan *flange* yang kompak ( $\lambda_f < \lambda_{pf}$  dan  $\lambda_w < \lambda_{pw}$ ). Hal ini membuat tekuk torsi lateral akan terjadi setelah melewati kekuatan momen plastis penampang sehingga defleksi yang diakibatkan oleh tekuk bersifat *permanent* atau tidak kembali ke bentuk semula (*full plastic*). Sedangankan kasus 3 sampai kasus 5 mengalami perilaku plastis ( $L_b < L_p$ ), dimana kegagalan diawali dengan pelelehan dan diikuti dengan *large*

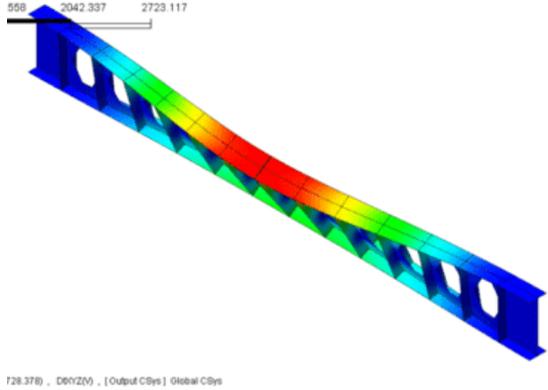
*deformation*. Maka dari itu batas kegagalan yang terjadi pada semua kasus adalah saat momen plastis tercapai atau saat penampang menjadi plastis sepenuhnya (kondisi pelelehan).

Tabel 5. Hasil Analisis *Linear Buckling* pada MIDAS FEA  
(Skala Gambar untuk Setiap Kasus Tidak Sama)

Kasus	Mode Shape pertama	Jenis kegagalan tekuk
1		<i>Web Post Buckling</i>
2		<i>Lateral Torsional Buckling</i>
3		<i>Lateral Torsional Buckling</i>

Kasus	Mode Shape pertama	Jenis kegagalan tekuk
4		<i>Lateral Torsional Buckling</i>

Tabel 6 (lanjutan). Hasil Analisis *Linear Buckling* pada MIDAS FEA (Skala Gambar untuk Setiap Kasus Tidak Sama)

Kasus	Mode Shape pertama	Jenis kegagalan tekuk
5		<i>Lateral Torsional Buckling</i>

Tabel 7. Perilaku pada Seluruh Kasus

Kasus	$L_p$ (mm)	$L_r$ (mm)	$L_b$ (mm)	Perilaku balok kastela
1			6000	Tekuk torsi lateral inelastis
2			2624,4	Tekuk torsi lateral inelastis
3	2520,12	6083	1312,2	Momen plastis
4			874,8	Momen plastis
5			437,4	Momen plastis

Dari hasil analisis *nonlinear static* yang telah diuraikan pada

Tabel 8, kegagalan yang terjadi pada setiap kasus adalah pelelehan yaitu saat momen plastis tercapai atau saat penampang menjadi plastis keseluruhan. berdasarkan *output* yang dihasilkan oleh MIDAS FEA, balok kastela gagal sesaat sebelum tegangan yang terjadi melewati tegangan leleh baja yaitu sebesar 250 MPa serta defleksi tidak terjadi secara tiba-tiba sebelum balok kastela gagal. Sehingga dapat disimpulkan balok kastela dengan bentang menengah atau berperilaku inelastis memiliki batas kegagalan pelelehan, yaitu saat balok kastela mencapai momen plastis. Setelah melewati fase plastis, balok kastela baru menunjukkan perilakunya (berdasarkan teori).

Analisis *nonlinear static* yang tertera pada



Tabel 9 (lanjutan). Hasil Analisis *Nonlinear Static* pada MIDAS FEA  
 (Skala Gambar untuk Setiap Kasus Tidak Sama)

Kasus	Vonmises stresses sebelum leleh	Load factor	Resultan beban
5		0,64	728,378 kN

Tabel 10, menunjukkan bahwa pada kasus 5 terjadi peningkatan yang maksimum bila ditinjau terhadap kasus 1 (balok kastela tanpa pengaku) yaitu sebesar 28,532%. Dimana jumlah pengaku yang diletakkan pada balok kastela berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas bebannya. Namun jika peningkatan kapasitas beban ditinjau dari penambahan jumlah pengaku pada tiap kasus, maka peningkatan paling besar dialami oleh kasus 5 yang kapasitas bebannya meningkat sebesar 12,6184% karena pada kasus 5 ditambahkan sebanyak 6 pasang pengaku dari kasus 4. Lalu disusul dengan kasus 2 (penambahan 3 pasang pengaku dari kasus 1) sebesar 7,704%. Dan peningkatan terkecil terjadi pada kasus 3 dan 4, karena hanya ditambahkan 2 pasang pengaku dari kasus sebelumnya. Sehingga dapat dikatakan semakin banyak jumlah pengaku vertikal yang ditambahkan pada balok kastela, semakin tinggi pula peningkatan kapasitas beban yang terjadi pada balok kastela.

Berdasarkan Gambar 12, Peningkatan daya dukung terhadap setiap kasus meningkat secara linier. Namun pada kasus 5, peningkatan yang terjadi terlihat lebih signifikan, karena efek penambahan pengaku yang lebih banyak dibandingkan kasus-kasus sebelumnya. Laju peningkatan kapasitas beban pada balok kastela menunjukkan *trend* yang sama dengan penelitian secara eksperimental yang dilakukan oleh Jawad (2002).

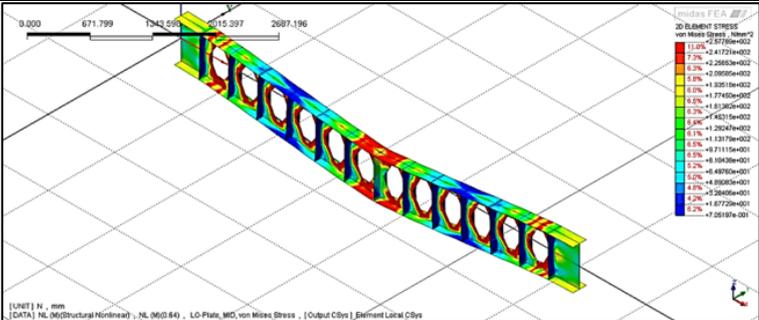
Tabel 11 menunjukkan persentase peningkatan kapasitas beban balok kastela dengan jumlah pengaku yang berbeda pada setiap kasus. Hal ini akan memperlihatkan seberapa efektif sepasang pengaku dapat memberikan peningkatan kapasitas beban balok kastela. Pengaruh sepasang pengaku dalam setiap studi kasus memberikan peningkatan kapasitas beban yang tidak berbeda jauh, yaitu sebesar 2,19% sampai 2,57%. Hal ini membuktikan bahwa semakin banyak jumlah pengaku vertikal pada balok kastela, semakin tinggi peningkatan kapasitas beban balok kastela, namun semakin rendah pengaruh sepasang pengakunya dalam memberikan kekuatan pada balok kastela (Patil & Kumbhar, 2016).

Tabel 8. Hasil Analisis *Nonlinear Static* pada MIDAS FEA (Skala Gambar untuk Setiap Kasus Tidak Sama)

Kasus	Vonmises stresses sebelum leleh	Load factor	Resultan beban
1		0,67	541,315 kN
2		0,69	566,120 kN
3		0,62	656,785 kN
4		0,61	689,176 kN

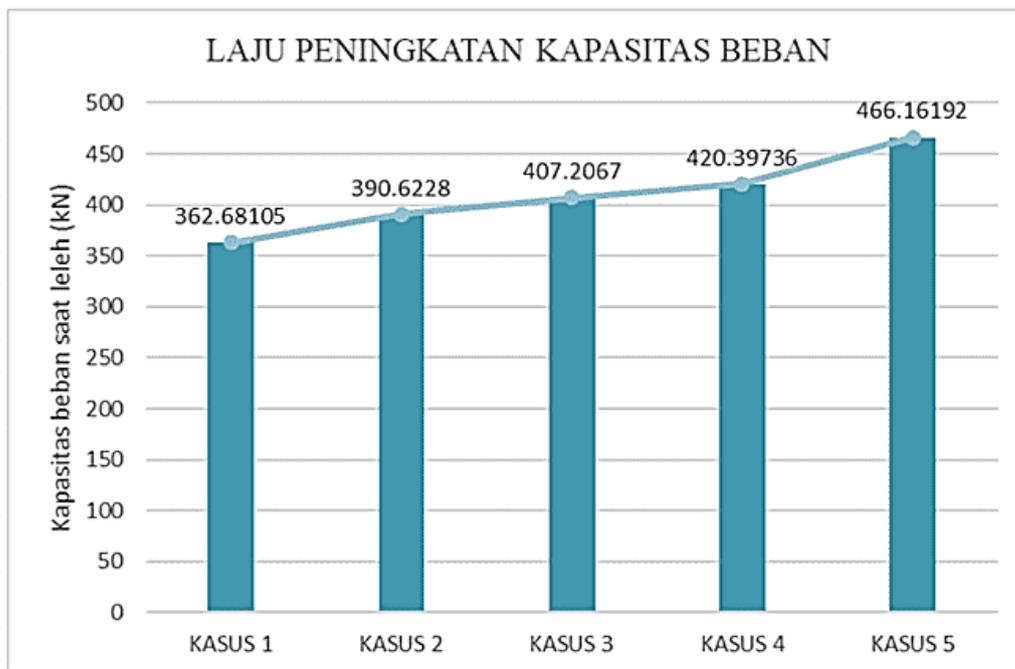


Tabel 9 (lanjutan). Hasil Analisis *Nonlinear Static* pada MIDAS FEA (Skala Gambar untuk Setiap Kasus Tidak Sama)

Kasus	Vonmises stresses sebelum leleh	Load factor	Resultan beban
5		0,64	728,378 kN

Tabel 10. Peningkatan Kapasitas Beban Terhadap Perilaku Pelelehan

Kasus	Kapasitas Beban	Terhadap kasus 1		Terhadap kasus sebelumnya	
		Peningkatan Kapasitas Beban	Persentase Peningkatan	Peningkatan Kapasitas Beban	Persentase Peningkatan
1	362,6812 kN	-	-	-	-
2	390,6228 kN	27,94175 kN	7,704%	27,9418 kN	7,704%
3	407,2067 kN	44,52565 kN	12,277%	16,5839 kN	4,573%
4	420,3974 kN	57,71631 kN	15,914%	13,1907 kN	3,6370%
5	466,1619 kN	103,48087 kN	28,532%	45,7646 kN	12,6184%



Gambar 12 Grafik laju peningkatan kapasitas beban.

Tabel 11 Analisis Pengaruh Pengaku Terhadap Peningkatan Kapasitas Beban

Kasus	Peningkatan Kapasitas beban	Jumlah Pengaku	Pengaruh Sepasang Pengaku	Persentase Peningkatan
Kasus 1	-	-	-	-
Kasus 2	27,94175 kN	3	9,3139 kN	2,5681%
Kasus 3	44,52565 kN	5	8,9051 kN	2,4554%
Kasus 4	57,71631 kN	7	8,2452 kN	2,2734%
Kasus 5	103,48087 kN	13	7,9601 kN	2,1948%

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

##### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kehadiran pengaku pada *web* dapat mencegah *web-post buckling* pada balok kastela dan menambah kekakuan lateral pada balok kastela.
2. Banyaknya jumlah pengaku vertikal yang terpasang pada balok kastela berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas beban pada balok kastela. Peningkatan kapasitas beban terbesar terjadi pada kasus 5 sebesar 28,532%.
3. Penambahan pengaku vertikal sangat efektif ketika diletakkan pada daerah beban terpusat dan perletakan yaitu pada kasus 2 dengan peningkatan kapasitas beban sebesar 7,704%.
4. Peningkatan terbesar jika ditinjau dari penambahan jumlah pengaku vertikal terhadap kasus sebelumnya, terjadi pada kasus 5, yaitu sebesar 12,6184%.
5. Setiap sepasang pengaku vertikal pada setiap kasus menyumbangkan kekuatan sebesar 2,19% sampai 2,57%, dimana semakin banyak pengaku yang diletakkan pada balok kastela, semakin kecil pengaruh sepasang pengaku dalam memberikan kekuatan pada balok kastela.

##### Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan bagi peneliti selanjutnya, yaitu memvariasikan jenis dan posisi pengaku yang dipakai pada balok kastela agar mendapatkan tingkat keefektifan suatu pengaku terhadap perilaku balok kastela, juga dapat mempertimbangkan *geometry nonlinearity* pada analisis *nonlinear* di MIDAS FEA serta dapat juga melakukan penelitian dengan kasus yang sama secara eksperimental di laboratorium.

#### DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16)
- Demirdjian, S. (1999). *Stability of Castellated Beam Webs* [Thesis, McGill University]. [https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape8/PQDD\\_0026/MQ50601.pdf](https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape8/PQDD_0026/MQ50601.pdf)
- Jamadar, A. M., & Kumbhar, P. D. (2015). Parametric Study of Castellated Beam with Circular and Diamond Shaped Openings. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(2), 715–722
- Jawad, M. (2002). *Kapasitas Lentur Balok Castella dengan Perkuatan* [Tugas Akhir, Universitas Islam Indonesia]. <https://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/20138/95310146%20Muhammad%20Jawad%20-%202095310211%20A%27an%20Supariyanto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kerdal, D., & Nethercot, D. A. (1984). Failure Modes for Castellated Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 4(4), 295–315
- Megharief, J. D. (1997). *Behavior Of Composite Castellated Beams* [Thesis, McGill University]
- Pachpor, P. D., Gupta, L. M., Deshpande, N. V., & Bedi, K. (2011). Parameteric Study of Castellated Beam. *Advanced Materials Research*, 163, 842–845
- Patil, S. A., & Kumbhar, P. D. (2016). Comparative Study of Transverse Stiffeners and Stiffeners along the Opening Edge used for Castellated Beam. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 5(5), 8516–8522
- Sonck, D., & Belis, J. (2017). Lateral-Torsional Buckling Resistance of Castellated Beams. *Journal of Structural Engineering*, 143(3)
- Yun, X., & Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 36–46
- Yura, J. A., Ravindra, M. K., & Galambos, T. V. (1978). The Bending Resistance of Steel Beams. *Journal of the Structural Division*, 104, 1355–1370