

ANALISIS PENGARUH LUBANG PADA BALOK KASTELA TERHADAP DEFLEKSI DAN *LATERAL-TORSIONAL BUCKLING* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Royki¹ dan Leo S. Tediato²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1 Jakarta
Email: royki88@yahoo.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1 Jakarta
Email: leotedi@gmail.com

ABSTRAK

Balok kastela merupakan sebuah profil baja yang dibentuk dengan cara memotong profil baja berbentuk I lalu melakukan pengelasan untuk mendapatkan sebuah profil yang memiliki sifat mekanis yang lebih baik. Pada beberapa kasus, bukaan atau lubang tersebut ditutup baik untuk mencapai tujuan estetika maupun kekuatan. Serangkaian ujicoba dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan program Abaqus untuk menemukan hubungan antara penutupan lubang bukaan terhadap kapasitas beban yang dapat dipikul dan defleksi yang terjadi. Hasil percobaan menunjukkan adanya perubahan terhadap defleksi yang terjadi dan peningkatan terhadap kapasitas beban yang dapat dipikul pada kondisi tekuk torsi-lateral seiring dengan dilakukannya penutupan lubang pada balok kastela.

Kata kunci: Balok kastela, bukaan, lubang, metode elemen hingga, defleksi, tekuk torsi-lateral, kapasitas beban.

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Balok kastela (*castellated beam*) merupakan sebuah balok dari profil baja yang dibuat dengan cara melakukan pemotongan terhadap sebuah profil baja I-WF (*I-shaped Wide Flange*) kemudian melakukan pengelasan untuk menggabungkan kedua bagian tersebut. Profil kastela yang dihasilkan memiliki sifat mekanis yang lebih baik bila dibandingkan dengan profil baja semula.

Dalam proses desain, seringkali efek dari tekuk torsi lateral (*lateral-torsional buckling*) diabaikan karena pada umumnya balok kastela digunakan bersamaan dengan *metal deck* dan/atau balok lainnya dengan konfigurasi sedemikian rupa sehingga memberikan tahanan lateral yang cukup untuk mencegah pengaruh torsi lateral dan meminimalkan defleksi lateral. Namun, apabila *metal deck* tidak digunakan, maka pengaruh torsi lateral tidak dapat diasumsikan ditahan langsung oleh pelat beton, begitu juga apabila balok lainnya tidak memberikan tahanan yang cukup.

Lubang pada balok kastela juga dapat ditutup kembali untuk tujuan estetika ataupun kekuatan karena kemampuan penampang tersebut untuk memikul beban akan meningkat apabila lubang pada penampang tersebut ditutup. Lubang dapat ditutup kembali dengan cara melakukan pengelasan pada pelat baja yang telah dipotong dengan ukuran yang sama dengan lubang tersebut.

Atas dasar pertimbangan tersebut, maka disusunlah penelitian ini yang akan membahas mengenai pengaruh bukaan lubang terhadap defleksi lateral dan *lateral-torsional buckling* pada balok kastela. Analisis yang akan dilakukan untuk mengetahui besarnya pengaruh bukaan lubang terhadap balok kastela tersebut akan dilakukan dengan bantuan program Abaqus. Abaqus merupakan program analisis yang menggunakan prinsip Analisis Elemen Hingga (*Finite Element Analysis, FEA*) untuk menyelesaikan berbagai permasalahan dalam bidang analisis struktur.

Penelitian ini membatasi penggunaan profil pada ukuran balok kastela dengan ukuran 150x450 dengan lubang *honeycomb* sesuai dengan spesifikasi PT. Gunung Garuda. Material yang digunakan adalah SS400 yang mengacu pada standar JIS G 3101. Tegangan sisa (*residual stress*) tidak dipertimbangkan pada penelitian ini. Weld joint dianggap bersifat *rigid* sekali sehingga kegagalan pada sambungan las balok kastela tidak dipertimbangkan. Panjang bentang juga dibatasi pada kondisi yang akan menyebabkan *elastic lateral-torsional buckling*, yaitu lebih tinggi dari L_r , yaitu batasan panjang bentang yang tidak ditahan secara lateral pada kondisi batas *inelastic lateral-torsional buckling*.

2. DASAR TEORI

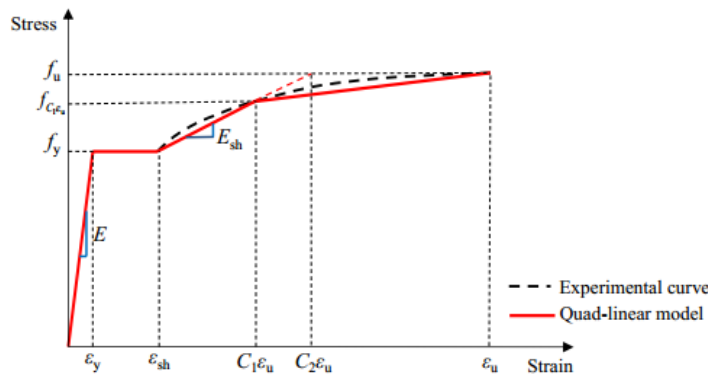
Regangan dan Tegangan *Hot-Rolled Steel*

Penelitian ini menggunakan material *SS400* sebagai material penyusun balok kastela. *SS400* merupakan material baja yang mengacu pada standar JIS G 3101. *SS400* merupakan baja karbon dengan komposisi karbon, silikon, dan mangan yang tidak ditentukan, fosfor di bawah 0.05%, dan sulfur di bawah 0.05%. Huruf “SS” memiliki arti *Structural Steel*, dan 400 menyatakan *tensile strength* sebesar 400 N/mm². *SS400* memiliki titik leleh sebesar 245 N/mm² untuk ketebalan 16 mm ke bawah dan 235 N/mm² untuk ketebalan di atas 16 mm. Elongasi minimum dari material *SS400* untuk ketebalan 5 mm ke bawah adalah sebesar 21%, untuk ketebalan antara 5 hingga 16 mm adalah sebesar 17%, dan untuk ketebalan di atas 16 mm adalah sebesar 21%.

Perhitungan untuk nilai regangan dan tegangan untuk *hot-rolled steel* (baja gilas panas) dilakukan berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Xiang Yun dan Leroy Gardner pada tahun 2017 dengan judul “*Stress-Strain Curves for Hot-Rolled Steel*” yang diterbitkan pada *Journal of Constructional Steel Research Volume 133* dengan DOI 10.1016/j.jcsr.2017.01.024. Terdapat dua model diagram regangan-tegangan yang dapat digunakan berdasarkan jurnal tersebut, yaitu *quad-linear model* dan *bilinear+strain hardening model (nonlinear model)*. Pada penelitian ini digunakan *quad-linear model* yang lebih sederhana.

Quad-Linear Model

Quad-Linear model merupakan model yang mendefinisikan perilaku regangan terhadap tegangan baja sebagai persamaan empat garis linear yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Quad-Linear Model* untuk Diagram Regangan Tegangan

Perhitungan yang dilakukan untuk memperoleh hasil sesuai dengan Gambar 1 menggunakan persamaan berikut:

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh}(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) & \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1 \varepsilon_u \\ f_{C_1 \varepsilon_u} + \frac{f_u - f_{C_1 \varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u}(\varepsilon - C_1 \varepsilon_u) & C_1 \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_u = 0.6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right), \varepsilon_u \geq 0.06 \text{ untuk baja gilas panas (hot-rolled)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sh} = 0.1 \frac{f_y}{f_u} - 0.055, 0.015 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0.03 \quad (3)$$

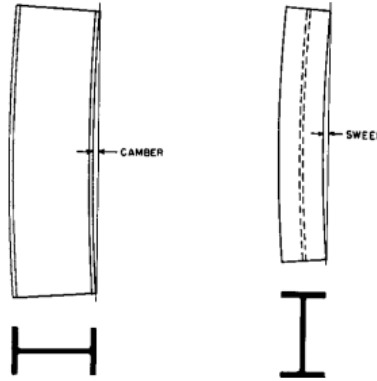
$$C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\frac{f_u}{f_y} - 1} \quad (4)$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})} \quad (5)$$

dengan C_1 = konstanta yang digunakan untuk melakukan perhitungan tegangan material baja, E = modulus elastisitas, E_{sh} = modulus elastisitas ketika material mengalami fenomena strain hardening, ε = regangan total pada material, ε_{sh} = regangan total ketika material mengalami fenomena *strain hardening*, ε_u = regangan *ultimate* yang dapat dicapai oleh material, $f(\varepsilon)$ = tegangan pada penampang pada titik regangan tertentu, f_y = tegangan leleh material dan f_u = tegangan *ultimate* material.

Batas Camber dan Sweep pada Balok Baja

Peraturan ASTM A-6M-07 menyatakan batasan yang diizinkan untuk besarnya *camber* dan *sweep* sebesar $L/1000$ dengan L merupakan panjang bentang dari balok baja yang ditinjau. Gambar 2 akan menjelaskan mengenai *camber* dan *sweep*.

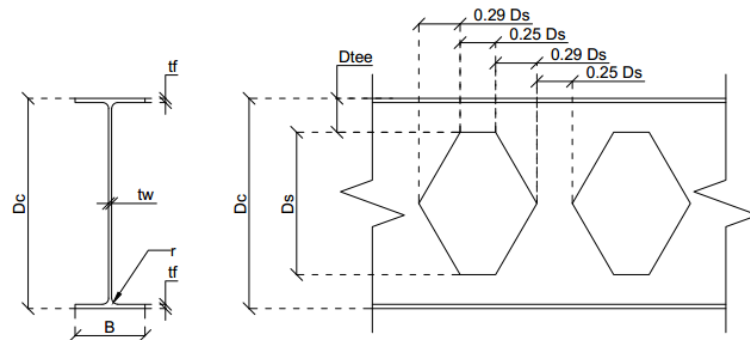


Gambar 2. *Camber* dan *Sweep* pada Balok Baja Mengacu pada ASTM A-6M-07

Analisis Elemen Hingga

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan program Abaqus dengan *Standard/Explicit Model*. Jenis elemen yang digunakan merupakan elemen solid 3D dengan tipe C3D8 dengan *second-order accuracy*. C3D8 merupakan *first-order element* dengan bentuk *hexahedron* yang memiliki 8 *node*.

Model analisis yang digunakan pada analisis ini merupakan sebuah balok kastela dengan lubang bukaan berbentuk *honeycomb* dengan ukuran yang dideskripsikan pada Tabel 1 dan Gambar 2.



Gambar 2. Spesifikasi Ukuran Balok Kastela dan Lubang Bukaan Menurut PT. Gunung Garuda

Tabel 1. Ukuran Balok Kastela *Honeycomb* 450x150

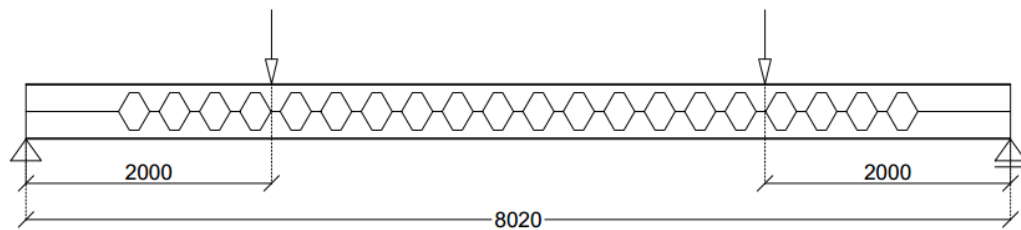
B (mm)	150
Dc (mm)	450
Ds (mm)	305
Dtee (mm)	72.5
r (mm)	13
Tf (mm)	9
Tw (mm)	6.5

3. PEMBAHASAN STUDI KASUS

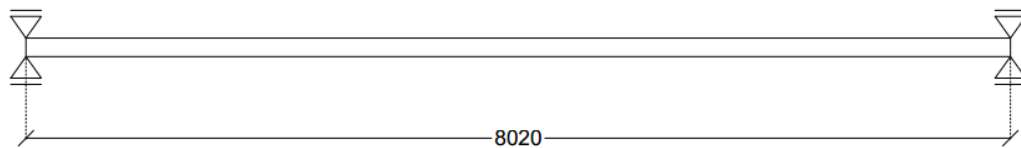
Pendahuluan

Penelitian ini akan menguji serangkaian kasus analisis pada balok kastela *honeycomb* 450x150 yang dibuat oleh PT. Gunung Garuda. Ukuran dan material yang digunakan dalam analisis akan disesuaikan dengan yang tertera di brosur spesifikasi. Proses *Eigenvalue Buckling Analysis* dan *Nonlinear Analysis* akan memberikan *output* berupa *buckling load* dan beban yang dapat dicapai oleh penampang dalam berbagai kasus serta *displacement* lateral dan vertikal dari kasus-kasus tersebut. Pengaruh *residual stress* diabaikan pada analisis ini. Pengaruh ketidaksempurnaan awal dan *material nonlinearity* diperhitungkan dalam analisis melalui parameter yang didefinisikan pada simulasi.

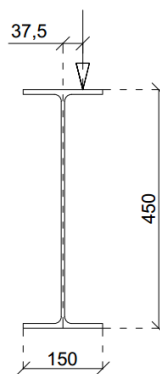
Balok kastela pada analisis ini akan dikerjakan dengan asumsi jenis perletakan *pinned* pada salah satu ujung dan *roller* pada ujung lainnya. *Lateral restraint* akan diberikan pada kedua ujung balok kastela untuk mencegah terjadinya *displacement* lateral dan efek *twisting* pada ujung balok. Skema tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 hingga Gambar 5. Kasus analisis yang akan ditinjau dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7. Titik pengukuran *displacement* ditentukan pada ujung *flange* tekan yang cenderung mengalami sedikit tarik pada *flange* atas di tengah bentang balok kastela.



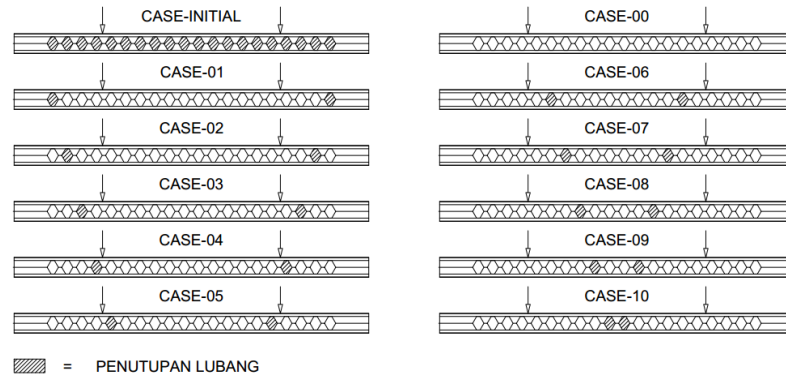
Gambar 3. Tampak Samping Skema Pembebanan Balok Kastela



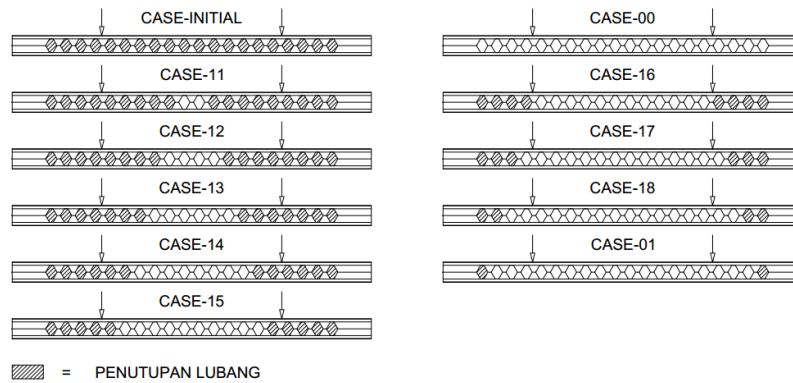
Gambar 4. Tampak Atas Skema Pembebanan Balok Kastela



Gambar 5. Pembebanan Balok Kastela



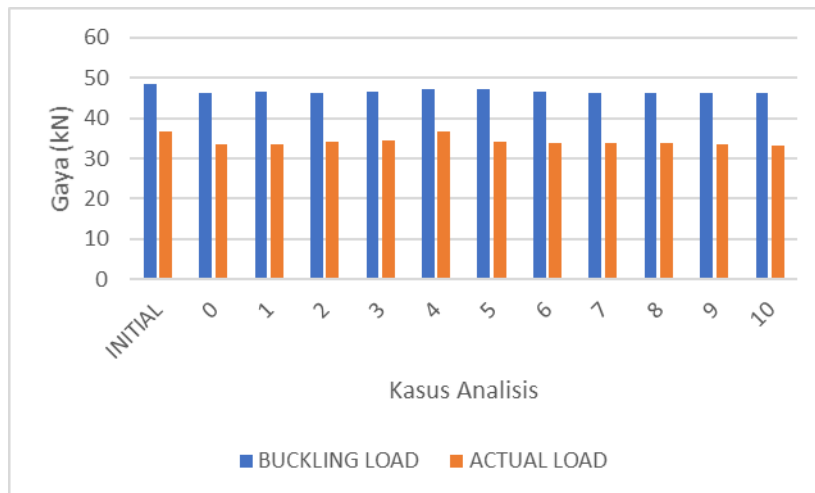
Gambar 6. Kasus Analisis (1 dari 2)



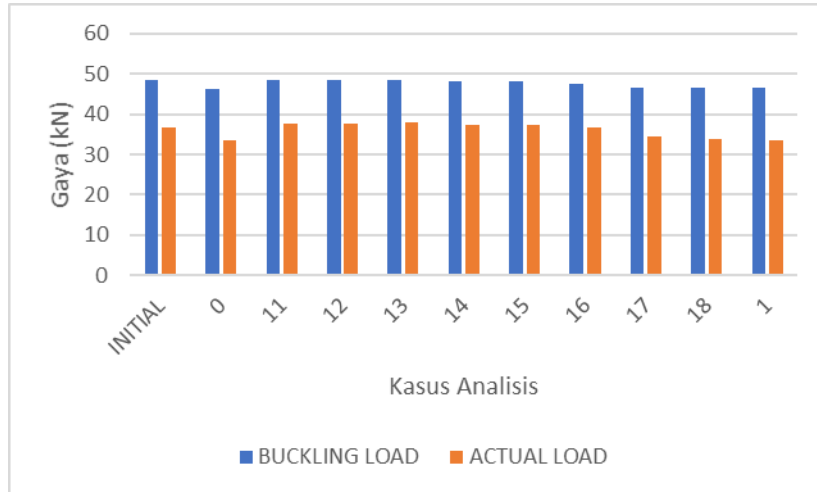
Gambar 7. Kasus Analisis (1 dari 2)

Hasil Analisis

Analisis yang telah dilakukan memberikan *output* berupa *buckling load* berdasarkan *Eigenvalue Buckling Analysis* dan *actual load* serta *displacement* baik pada arah lateral maupun vertikal berdasarkan *Nonlinear Analysis*. Hasil analisis tersebut dapat dilihat pada Gambar 8 hingga Gambar 13 dan Tabel 2.



Gambar 8. Buckling Load dan Actual Load dari Model Analisis (1 dari 2)

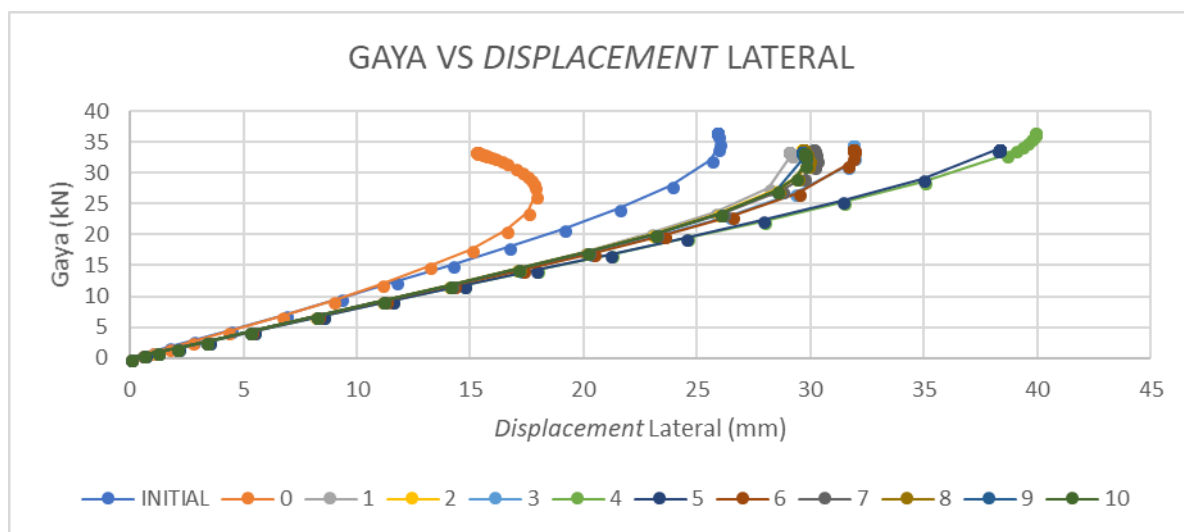


Gambar 9. Buckling Load dan Actual Load dari Model Analisis (2 dari 2)

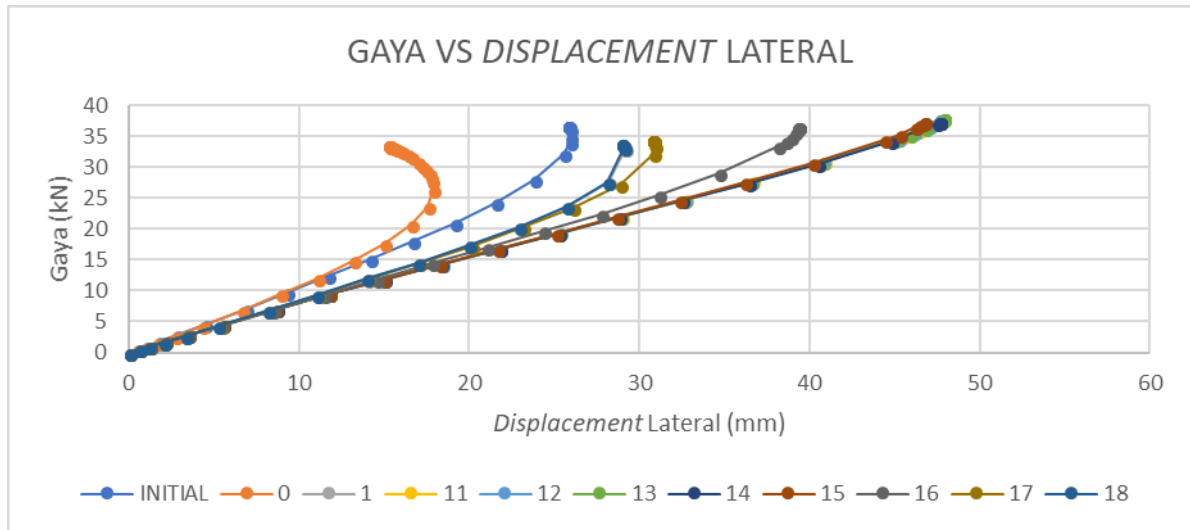
Tabel 2. Buckling Load dan Actual Load Setiap Kasus Analisis

CASE	BUCKLING LOAD	ACTUAL LOAD
INITIAL	48.59	36.75658576
0	46.305	33.58135841
1	46.438	33.61168509
2	46.41	34.03171044
3	46.493	34.56215231
4	47.153	36.63797531
5	47.141	34.08487578
6	46.574	33.97102903
7	46.409	33.92562873
8	46.352	33.99761603
9	46.327	33.53301139
10	46.316	33.3257978

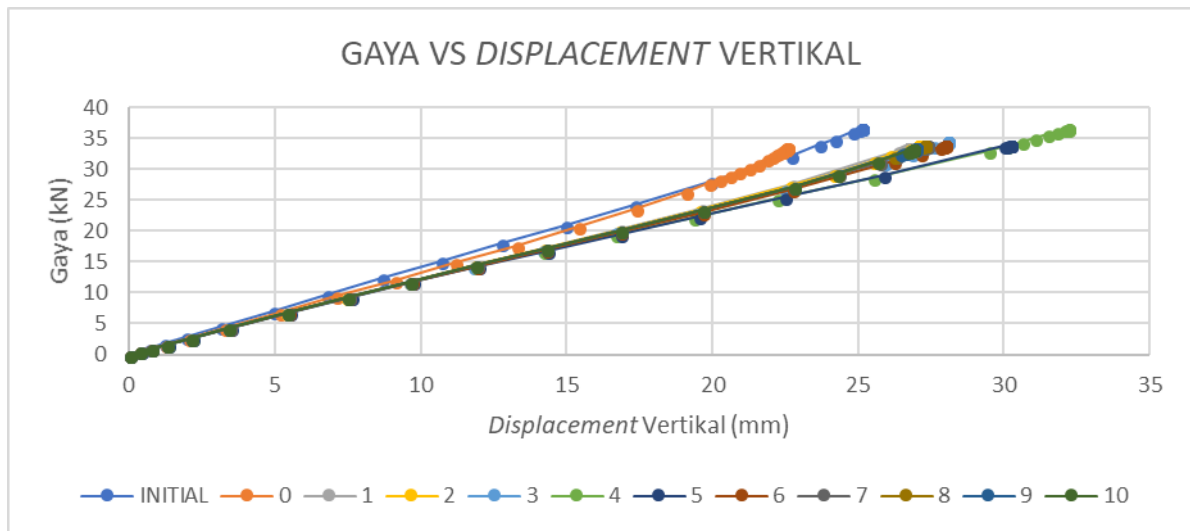
CASE	BUCKLING LOAD	ACTUAL LOAD
11	48.467	37.70767
12	48.456	37.7041
13	48.41	37.93485
14	48.339	37.39515
15	48.161	37.32954
16	47.528	36.5756
17	46.736	34.48874
18	46.537	33.89038



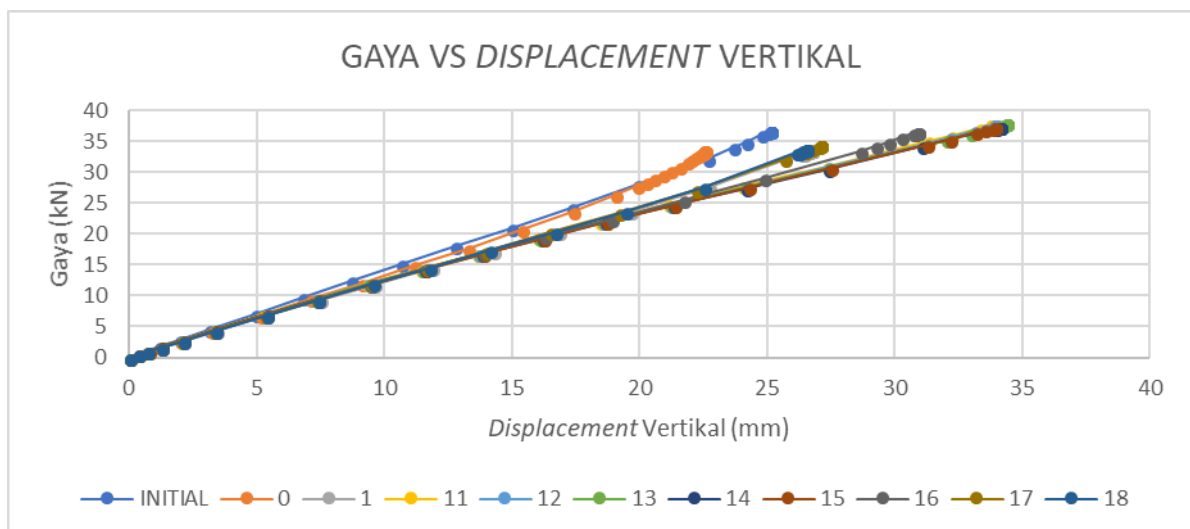
Gambar 10. Kurva Gaya terhadap Displacement Lateral (1 dari 2)



Gambar 11. Kurva Gaya terhadap *Displacement* Lateral (2 dari 2)



Gambar 12. Kurva Gaya terhadap *Displacement* Vertikal (1 dari 2)



Gambar 13. Kurva Gaya terhadap *Displacement* Vertikal (2 dari 2)

Buckling Load

Buckling load dan *actual load* mengalami perubahan nilai seiring dengan perubahan posisi penutupan lubang. Gambar 3 memberikan gambaran yang lebih jelas untuk memahami pengaruh perubahan lokasi lubang terhadap beban-beban tersebut. Peningkatan paling jelas terlihat pada kasus analisis 4 dimana lubang terdekat terhadap titik bekerjanya gaya ditutup. Apabila dibandingkan dengan kasus analisis 0 dimana tidak ada lubang yang ditutup, terjadi peningkatan *buckling load* sebesar 1.8313% dari 46.305 kN menjadi 47.153 kN. *Actual load* mengalami peningkatan sebesar 9.1021% dari 33.58135 kN menjadi 36.63795 kN.

Hasil yang serupa juga terjadi pada kasus analisis 5 dengan perubahan yang lebih kecil terhadap kasus analisis 0. *Buckling load* mengalami peningkatan sebesar 1.8054% dari 46.305 kN menjadi 47.141 kN. *Actual load* mengalami peningkatan sebesar 1.4993% dari 33.58135 kN menjadi 34.08485 kN. Peningkatan gaya yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan kasus analisis 4 dianggap wajar karena lubang yang ditutup pada kasus analisis 4 lebih dekat terhadap titik bekerjanya beban apabila dibandingkan dengan kasus analisis 5.

Hasil analisis untuk kasus analisis 11 hingga 18 dapat dilihat pada Gambar 4. Kasus analisis 1, 18, dan 17 memberikan peningkatan kekuatan yang relatif lebih kecil apabila dibandingkan dengan kasus analisis 16, 15, 14, 13, 12, dan 11. Sebagai contoh, kasus analisis 17 mengalami peningkatan *buckling load* sebesar 0.9308% dari 46.305 kN menjadi 46.736 kN dan *actual load* mengalami peningkatan sebesar 2.7021% dari 33.58135 kN menjadi 34.48874 kN.

Tabel 3 memperlihatkan bahwa peningkatan *actual load* yang relatif besar antara kasus analisis 17 dan 16. Seiring dengan semakin banyak lubang yang ditutup, peningkatan terhadap *buckling load* dan *actual load* tersebut mengalami penurunan (*diminishing results*) dan mulai terlihat pada perbandingan kasus analisis 16 terhadap 15. Hal ini juga semakin didukung dengan perbandingan antara kasus analisis 15 terhadap kasus analisis 11, dimana selisih peningkatan *buckling load* hanya pada 0.6608% dan *actual load* pada 0.9756%.

Tabel 3. Perbandingan Peningkatan Beban pada Beberapa Kasus

Kasus Analisis	Peningkatan <i>Buckling Load</i> terhadap Kasus <i>Initial</i>	Peningkatan <i>Actual Load</i> terhadap Kasus <i>Initial</i>
17	0.9308%	2.7021%
16	2.6412%	8.9461%
15	4.0082%	11.3119%
11	4.669%	12.2875%

Displacement Lateral dan Vertikal

Berdasarkan Gambar 5 hingga Gambar 8, dapat dilihat bahwa penutupan lubang bukaan tidak memberikan peningkatan daya dukung yang signifikan. *Displacement* lateral dan vertikal maksimum akibat beban yang bekerja pada umumnya mengalami perubahan yang cukup seragam, yaitu pada rentang 11.276 mm hingga 14.033 mm untuk *displacement* lateral maksimum dan pada rentang 4.164 mm hingga 5.511 mm untuk *displacement* vertikal maksimum. Hal ini dapat dilihat pada hasil analisis kasus 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 17, dan 18.

Peningkatan terhadap daya dukung yang cukup signifikan terjadi setelah lubang bukaan di dekat titik gaya bekerja ditutup, seperti yang dapat dilihat pada hasil analisis kasus 4 dan 5. Kasus 11, 12, 13, 14, 15, dan 16 juga menunjukkan hal yang sama setelah lubang di dekat titik bekerjanya gaya ditutup. Namun hal ini juga diikuti dengan peningkatan *displacement* yang berada pada rentangan 20.419 mm hingga 30.001 mm untuk *displacement* lateral maksimum dan 7.665 mm hingga 11.802 mm untuk *displacement* vertikal maksimum. Tabel 3 dan 4 akan memperlihatkan besaran *displacement* yang terjadi dan perbandingannya terhadap kasus analisis 0.

Tabel 3. Perbandingan *Displacement* terhadap Kasus Analisis 0 (1 dari 2)

CASE	U1 MAX		U1 FINAL		U2 MAX		U2 FINAL	
INITIAL	25.951	-	25.804	-	25.113	-	25.113	-
0	17.860	-	15.209	-	22.538	-	22.538	-
1	29.136	63.14%	29.001	90.69%	26.702	18.48%	26.702	18.48%
2	29.809	66.90%	29.583	94.51%	27.054	20.04%	27.053	20.04%
3	31.893	78.57%	31.816	109.20%	28.049	24.45%	28.047	24.45%
4	39.856	123.16%	39.856	162.06%	32.176	42.76%	32.176	42.76%
5	38.279	114.33%	38.279	151.69%	30.203	34.01%	30.203	34.01%
6	31.851	78.34%	31.835	109.32%	27.959	24.05%	27.959	24.05%
7	30.229	69.26%	30.063	97.67%	27.357	21.39%	27.357	21.39%
8	29.879	67.30%	29.639	94.88%	27.261	20.96%	27.261	20.96%
9	29.709	66.34%	29.577	94.48%	26.953	19.59%	26.953	19.59%
10	29.736	66.50%	29.672	95.10%	26.849	19.13%	26.849	19.13%

Tabel 4. Perbandingan *Displacement* terhadap Kasus Analisis 0 (2 dari 2)

CASE	U1 MAX		U1 FINAL		U2 MAX		U2 FINAL	
INITIAL	25.951	-	25.804	-	25.113	-	25.113	-
0	17.860	-	15.209	-	22.538	-	22.538	-
11	47.617	166.61%	47.617	213.09%	33.741	49.71%	33.741	49.71%
12	47.652	166.81%	47.652	213.32%	33.933	50.56%	33.933	50.56%
13	47.861	167.98%	47.861	214.69%	34.340	52.37%	34.340	52.37%
14	47.611	166.58%	47.611	213.05%	34.103	51.32%	34.103	51.32%
15	46.719	161.58%	46.719	207.18%	33.909	50.46%	33.909	50.46%
16	39.299	120.04%	39.299	158.40%	30.896	37.09%	30.896	37.09%
17	30.873	72.86%	30.762	102.27%	27.101	20.25%	27.101	20.25%
18	29.090	62.88%	28.929	90.21%	26.526	17.70%	26.526	17.70%
1	29.136	63.14%	29.001	90.69%	26.702	18.48%	26.702	18.48%

Pada analisis *nonlinear* yang dilakukan, ditemukan bahwa balok kastela tidak mengalami kelelahan pada bagian tengah bentangnya ketika analisis berakhir. Hal ini sejalan dengan fenomena *elastic lateral-torsional buckling* dimana balok mengalami fenomena *buckling* sebelum materialnya mengalami kelelahan (*yielding*).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan terhadap lubang bukaan pada balok kastela terhadap defleksi dan *lateral-torsional buckling* yang terjadi, dapat disimpulkan bahwa:

1. Penutupan lubang menyebabkan peningkatan daya dukung yang relatif rendah, kecuali apabila lubang di dekat titik dimana gaya bekerja ditutup akan menyebabkan peningkatan *actual load* sebesar 9.1021% pada perbandingan kasus analisis 4 terhadap 0.
2. Kurva hasil analisis menunjukkan bahwa apabila semua lubang kecuali lubang di tengah ditutup akan menyebabkan peningkatan *displacement* yang relatif besar pada arah lateral dan vertikal, pada kasus 11 terhadap kasus 0 menyebabkan peningkatan sebesar 166.61% untuk *displacement* lateral maksimum dari 17.86 mm menjadi 47.617 mm dan peningkatan sebesar 49.71% untuk *displacement* vertikal maksimum dari 22.538 mm menjadi 33.741 mm.
3. *Displacement* pada arah lateral dan vertikal akan lebih kecil apabila semua lubang ditutup ataupun dibuka.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada analisis ini, ada beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk pelaksanaan penelitian berikutnya, yaitu:

1. mencoba simulasi dengan menggunakan *second-order solid element* seperti elemen C3D20,

2. kasus analisis ditambahkan agar pengaruh jumlah bukaan lubang dapat mencakup lebih banyak kemungkinan,
3. mencoba simulasi dengan cara pembebanan lainnya, dan
4. memperhitungkan faktor *residual stress* ke dalam analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaqus Analysis User's Guide (6.13)*. Dassault Systèmes, 2013.
- American Institute of Steel Construction. *AISC 360-10 - Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC, 2010.
- . *AISC Design Guide 31 - Castellated and Cellular Beam Design*. American Institute of Steel Construction, 2016.
- ASTM International. *ASTM A6 / A6M-07, Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling*. West Conshohocken, 2007.
- Demirdjian, Sevak. *Stability of Castellated Beam Webs*. Thesis. McGill University. Montreal, 1999.
- Shwail, Mohammad Mofeed. *Lateral Torsional Buckling of Steel I-Section Cellular*. Thesis. Eastern Mediterranean University. Gazimağusa, 2013.
- University of Colorado Boulder. "Advanced Finite Element Methods (ASEN 6367) Course Material." n.d. *University of Colorado Boulder*. Course Material. 27 Juni 2018.
- Yun, Xiang and Leroy Gardner. "Stress-Strain Curves for Hot-Rolled Steel." *Journal of Constructional Steel Research* 133 (2017): 36-46. Journal Article.