

EVALUASI PENINGKATAN KAPASITAS TEKUK KOLOM BAJA PROFIL KASTELA DENGAN VARIASI TINGGI POTONGAN

Wisnu Murdianto

Banu Dwi Handono, Reky S. Windah

Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado

Email: wisnumurdianto1504@gmail.com

ABSTRAK

Hasil pengujian profil kastela (*castellated beam*) baik secara eksperimen maupun studi numerik untuk kuat lentur balok menjelaskan bahwa profil kastela lebih baik menahan lentur dan lendutan yang lebih kecil dibandingkan dengan profil utuh. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa perilaku profil kastela terhadap kuat tekan dengan variasi tinggi lubang bukaan untuk mendapatkan beban tekuk kritis (P_{cr}) dan tahanan nominal (P_n) terbesar pada model bukaan tertentu. Profil kastela dimodelkan dengan perletakkan sendi-sendi pada kedua ujung profil dengan beban terpusat pada bagian atas profil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari kelima variasi tinggi lubang bukaan dengan masing-masing dua model yaitu lubang ganjil dan genap diperoleh hasil untuk profil kastela lubang genap dengan tinggi bukaan dan sudut berturut-turut 160 mm dan 39° memberikan hasil kuat tekan nominal sebesar 245.73 Ton yang mengalami peningkatan sebesar 11.2% dibandingkan dengan profil utuh yang memberikan hasil kuat tekan nominal sebesar 220.92 Ton, sedangkan untuk profil kastela lubang ganjil memberikan hasil kuat tekan terbesar 213.60 Ton yang cenderung menurun dibandingkan dengan profil utuh.

Kata Kunci : *profil, Castellated beam, P_{cr} , P_n , lentur, lendutan*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Arianto (2015) tentang Studi Perilaku Join Balok Castella – Kolom Baja Akibat Beban Siklik didapat beberapa kesimpulan, yaitu: Kapasitas beban maksimum dari profil kastela meningkat sebesar 100.98 % dari balok normal serta memiliki lendutan yang lebih kecil dan keruntuhan pada tekuk badan.

Philip T. Lamsihar Napitupulu dkk. tentang Tekuk Baja Profil IWF dan Honeycomb (Castella) Teori Dan Eksperimental, Profil baja Honeycomb lebih kuat menahan beban aksial sentris dibandingkan dengan profil baja IWF. Salah satu cara optimasi tersebut yaitu dengan balok kastela.

Metode kastela merupakan gagasan pertama kali dikemukakan oleh H. E. Horton dari Chicago dan Iron Work sekitar tahun 1910. Dengan cara tersebut maka baja dengan ukuran profil yang sama akan menghasilkan momen inersia yang lebih besar. Namun di sisi lain dengan semakin tingginya balok maka nilai kelangsingan pada bagian badan semakin meningkat sehingga akan menurunkan tegangan kritisnya, atau akan menghasilkan tegangan kritis yang lebih kecil dari pada tegangan lelehnya (f_{cr}

$< f_y$). Jika $f_{cr} < f_y$ maka profilnya akan cepat rusak. Berbagai penelitian secara experimental dan analitis telah dilakukan mengenai tekuk pada baja kastela untuk profil IWF dan memberikan hasil bahwa profil kastela memberikan peningkatan pada kekuatan menahan tekan aksial dibandingkan dengan profil utuh.

Metode untuk menganalisis perilaku kolom dapat dilakukan dengan memodelkan batang menggunakan media software ANSYS Workbench sebagai *Three Dimension Finite Element*. Dibandingkan dengan percobaan di laboratorium, metode ini merupakan alternatif yang lebih ekonomis, menghemat waktu dan memudahkan dalam membuat variasi untuk dianalisis perilakunya.

Rumusan Masalah

Modifikasi balok baja solid menjadi balok kastela menyebabkan menurunnya tegangan ijin pada balok kastela sehingga dapat mengakibatkan tekuk terjadi sebelum tegangan ijin dicapai, tentu akan sangat berbahaya karena tekuk terjadi secara tiba-tiba tanpa adanya tanda-tanda misalnya deformasi secara perlahan-lahan yang semakin lama semakin membesar. Analisa tekuk pada batang tekan dapat dilakukan dengan menggunakan software ANSYS.

Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Percobaan akan dilakukan pada profil baja H dengan ukuran 250.250.9.14 mm. Dengan panjang batang 3 m.
2. Struktur perletakkan adalah dengan dengan tumpuan sendi-sendi
3. Bahan baja bersifat elastis linear sesuai dengan hukum Hooke.
4. Kelangsingan (λ) diantara 20 - 110
5. Beban akibat berat sendiri diabaikan.
6. Analisis yang dilakukan adalah analisis tekuk linear
7. Beban yang diterapkan adalah beban vertikal terpusat di salah satu sisi kolom.
8. Dengan FEM yang tervalidasi selanjutnya dianalisis beban kritis dari variasi tinggi lubang potongan.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mendapatkan gambaran tentang perilaku profil baja pada uji tekan untuk profil baja Honeycomb (kastela).
2. Menentukan berapa nilai beban kritis (P_{cr}) dan kuat tekan nominal (P_n) yang dapat ditahan oleh profil baja Honeycomb (kastela).
3. Mengetahui seberapa besar pengaruh tinggi bukaan dengan P_{cr} dan P_n pada berbagai variasi.

Manfaat Penelitian

Memberikan informasi bahwa pemodelan struktur dengan program elemen hingga dapat menjadi alternatif penelitian yang mengurangi waktu dan biaya selain penelitian eksperimental di laboratorium.

LANDASAN TEORI

Teori Tekuk

Perubahan dari batang lurus menjadi sumbu batang melengkung dinamakan Tekuk. Dari mekanika bahan telah diketahui bahwa hanya kolom yang sangat pendek yang dapat dibebani hingga tegangan lelehnya, keadaan yang umum adalah tekuk (*buckling*), atau lenturan mendadak akibat ketidakstabilan, terjadi sebelum kekuatan bahan batang sepenuhnya tercapai.

Teori tekuk kolom pertama dikemukakan oleh Leonardt Euler pada tahun 1759. Batang dengan beban konsentris yang semula lurus dan

semua seratnya tetap elastis hingga tekuk terjadi akan mengalami lengkungan yang kecil.

Perlu diperhatikan bahwa beban tekuk yang di dapat dari rumus Euler tidak tergantung pada kekuatan baja yang digunakan, rumus Euler hanya bergantung sepenuhnya pada perbandingan kerampingan dan kekakuan bahan (EI) dan hal ini hanya secara teori saja. Untuk dapat menggunakan rumus Euler dengan benar, maka kondisi perletakkan harus diperhitungkan.

Hasil yang didapat dengan rumus Euler sangat cocok jika dibandingkan dengan kondisi tes laboratorium dimana beban bekerja konsentris dan kolom panjang dengan tumpuan sendi. Hal ini tidak terjadi di lapangan karena pada kenyataannya kolom tidak mempunyai tumpuan sendi akibat adanya baut atau las pada tumpuan.

Parameter Penting Batang Tekan

Parameter F_y dan F_u akan menentukan kuat batang tarik tetapi pada batang tekan hanya F_y yang penting karena F_u tidak pernah tercapai. Selain material, batang tekan juga dipengaruhi oleh parameter lain, yaitu bentuk fisik atau geometri profil.

Parameter geometri terdiri (1) Luas Penampang (A); (2) Pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur (I_{min}); (3) Panjang batang dan kondisi pertambatan atau tumpuan, diwakili oleh panjang efektif (KL). Ketiganya dapat diringkas menjadi satu parameter tunggal, yaitu kelangsingan batang (KL/r_{min}), dimana $r_{min} = \sqrt{I_{min}/A}$ adalah radius girasi pada arah tekuk. Rasio kelangsingan menjadi parameter penting dan menjadi indikator batas kinerja sekaligus perilakunya. Contoh, kolom pendek (tidak langsing) kekuatannya ditentukan material, sedangkan kolom langsing, kekuatannya ditentukan oleh beban kritis yang menyebabkan tekuk (*buckling*), tidak tergantung mutu material. Jadi, kolom dengan bahan bermutu tinggi harus diperhatikan rasio kelangsingannya agar efisien. (Dewobroto, 2016)

Panjang Efektif

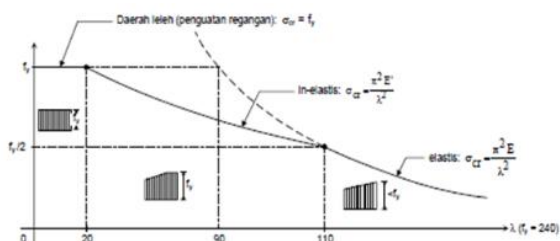
Kolom yang berujung sendi, panjang ujung sendi ekuivalen yang disebut panjang efektif sama dengan panjang yang sesungguhnya, yakni $K = 1,0$. Pada keadaan yang sesungguhnya, pengeangan momen di ujung selalu ada dan titik belok pada kurva berbentuk tekuk terjadi di titik yang bukan merupakan ujung batang.

Tabel 1. Faktor panjang efektif untuk kolom yang dibebani secara terpusat dengan berbagai kondisi

Tekuk kolom dinyatakan dengan garis putus	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Nilai K teoritis	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Nilai yang disarankan jika tidak mendekati kondisi ideal	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Kode ujung kolom dan tumpuan						
	<ul style="list-style-type: none"> Rotasi dan translasi dikekang Rotasi bebas, translasi dikekang Rotasi dikekang, translasi bebas Rotasi dan translasi bebas 					

Sumber: Salmon, 1997

Pendekatan Euler yang dibahas sebelumnya hanya terjadi pada batang tekan dalam kondisi elastis dengan kelangsingan yang besar ($\lambda > 110$, batang panjang), artinya batang tekan sudah menekuk sebelum tegangan mencapai leleh. Untuk kelangsingan sedang ($\lambda < 110$, batang menengah) akan terjadi tekuk inelastis, yaitu pada sebagian penampang sudah leleh dan untuk batang pendek ($\lambda < 20$) seluruh penampang leleh, seperti dilukiskan Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Kurva Hubungan antara tegangan (f) dan Kelangsingan (λ)
Sumber: Setiawan, 2008.

Kolom seringkali diklasifikasikan sebagai kolom panjang, kolom sedang, dan kolom pendek. Untuk kolom panjang, rumus Euler sangat tepat memprediksi kekuatan kolom panjang dimana tegangan tekuk aksial tetap di bawah batas proporsional dan keruntuhan akan disebabkan akibat tekuk tekuk terlebih dahulu sebelum penampang meleleh pada profil. Pada kolom sedang, serat pada kolom sedang akan mencapai tegangan leleh sebagian sedangkan bagian lain masih elastis. Batang akan runtuh oleh kelelahan dan juga tekuk. Dan untuk kolom pendek profil akan mencapai tegangan leleh pada keseluruhan penampang dan tidak akan tercapai sehingga keruntuhan pada profil diakibatkan oleh kelelahan pada seluruh serat penampang.

Kelangsingan

Untuk luas penampang yang sama, semakin tinggi suatu kolom akan semakin besar kemungkinan terjadi tekuk dan beban yang dapat dipikul akan semakin kecil. Kecenderungan suatu batang untuk tekuk diukur dengan rasio kelangsingan yang didefinisikan sebagai rasio panjang batang terhadap jari-jari girasi terkecil (KL/r). Tekuk juga dipengaruhi oleh tipe sambungan, eksentrisitas beban, ketidak sempurnaan material kolom, ketidak sempurnaan penampang, adanya lubang untuk baut, kelengkungan awal kolom, tegangan residual, dan lain-lain. (SNI 03-1729-2002 butir 7.6-2)

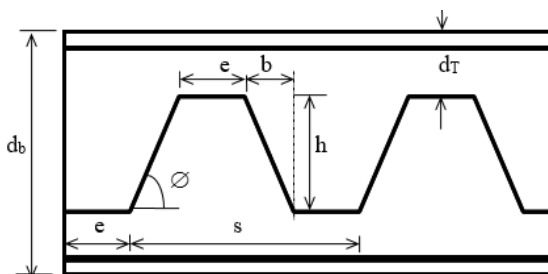
$$\lambda_c = 1/\pi Lk/r \sqrt{(fy/E)}. (Pers. 2.11)$$

dimana :

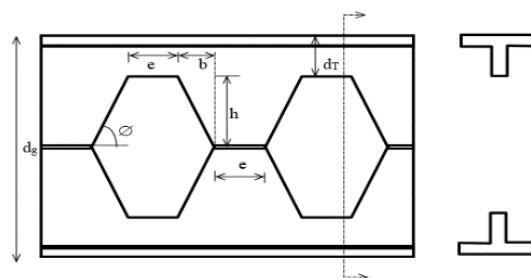
- Lk = Panjang kritis Kolom = kc L (m)
- kc = faktor panjang tekuk
- L = Panjang teoritis kolom (m)
- fy = Tegangan leleh Baja (MPa)
- E = Modulus Elastisitas Baja (MPa)

Profil Kastela

Gagasan Pembuatan Profil Kastela Pertama dikemukakan oleh H. E. Horton dari Chicago dan Iron Work sekitar tahun 1910. Pada mulanya balok ini dikenal dengan istilah Open Web expanded and girder (Perluasan balok dan girder dengan badan berlubang).

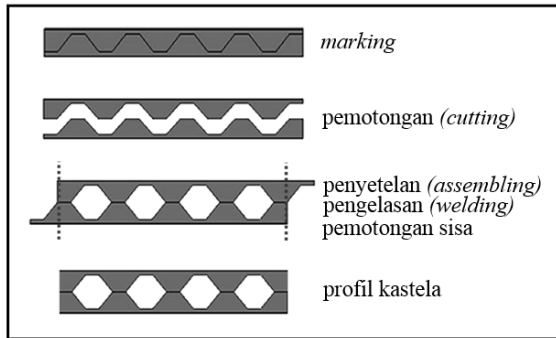


Gambar 2. Profil balok I dibelah sepanjang badan



Gambar 3. Profil balok kastela segi enam

Kastela adalah balok yang mempunyai elemen pelat badan berlubang, yang dibentuk dengan cara membelah bagian tengah pelat badan dengan mesin pemotongan plasma sesuai pola dan menggabungkan kembali dengan cara dilas, gambar 4. berikut adalah proses tahapannya:

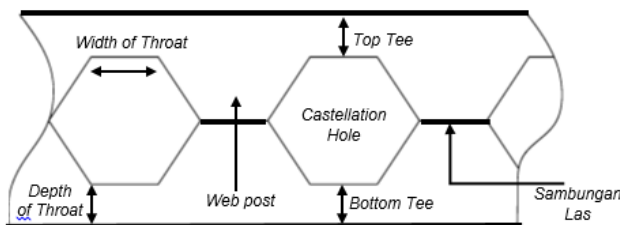


Gambar 4. Proses pembuatan profil baja kastela

Komponen Profil Kastela

Komponen-komponen pada balok kastela memiliki penamaannya masing-masing. Komponen-komponen tersebut antara lain sebagai berikut:

- a.) *Web-post* adalah bagian penampang melintang dari balok kastela dimana penampang diasumsikan penampang penuh,
- b.) *Castellation Hole* adalah area dari balok kastela dimana *web* sudah dinaikkan (bagian lubang bukaan),
- c.) *Width of Throat* adalah lebar dari pemotongan arah horizontal pada *web* balok,
- d.) *Depth of Throat* adalah kedalaman lubang bukaan diukur dari tepi flange ke bagian penampang T.
- e.) *Expansion percentage* adalah persentase kenaikan dari ketinggian IWF sebelum dipotong dan sesudah menjadi balok kastela.



Gambar 5. Komponen Balok Kastela

Konsep Metode Elemen Hingga

Sudut pandang *engineering* mengenai metode elemen hingga adalah metode yang

menyatukan elemen - elemen struktur yang dapat dianalisis secara terpisah ke dalam sebuah persamaan kesetimbangan global struktur.

Element properties untuk masalah keteknikan seperti *displacement in solid mechanics*, kita akan menentukan gaya-perpindahan yaitu merupakan karakteristik kekakuan dari setiap elemen secara individual. Secara matematis hubungan ini dapat dinyatakan sebagai bentuk:

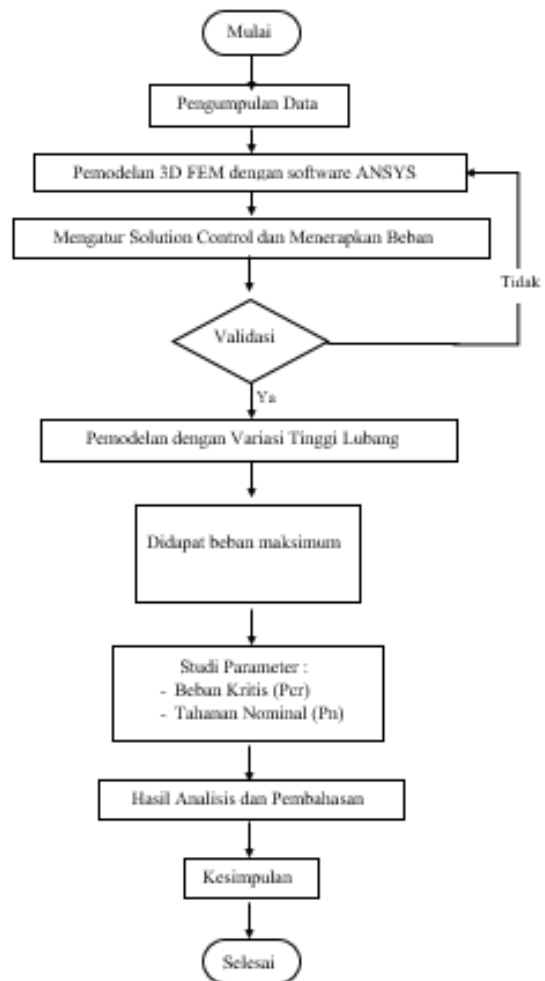
$$[k]_e \{\delta\}_e = \{F\}_e$$

untuk $e = 1, 2, \dots, N_{el} \dots \dots$ (Pers. 1)

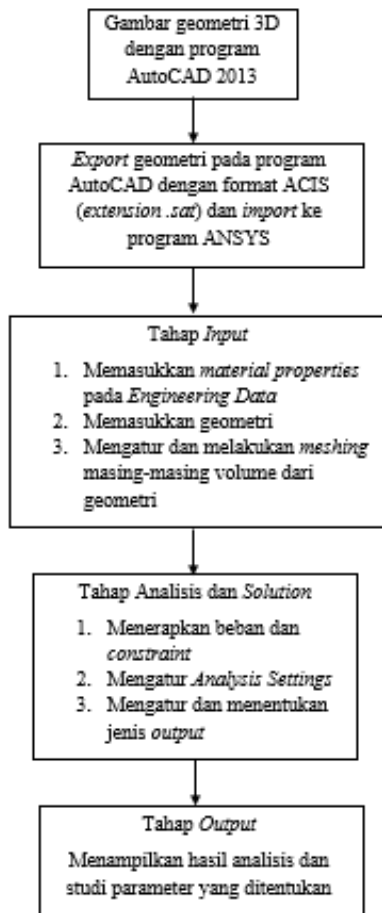
Di mana $[k]_e$ adalah matriks kekakuan elemen e, $\{\delta\}_e$ adalah vektor perpindahan titik-titik nodal elemen e, dan $\{F\}_e$ adalah vektor gaya pada titik-titik nodal elemen e, N_{el} adalah jumlah seluruh elemen. (Bhavikatti, 2005)

METODOLOGI PENELITIAN

Bagan Alir Penelitian



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian



Gambar 7. Bagan Alir Pemodelan 3D FEM

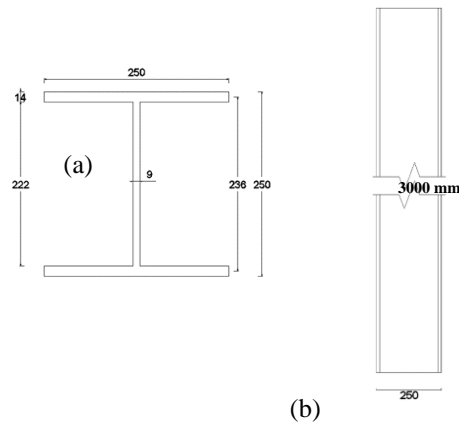
Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan analisis metode elemen hingga yang difokuskan untuk mengetahui kapasitas tekuk kolom baja dengan variasi tinggi potongan dalam memikul beban. Beban yang diterapkan adalah beban berupa tekanan di ujung-ujung profil kastela.

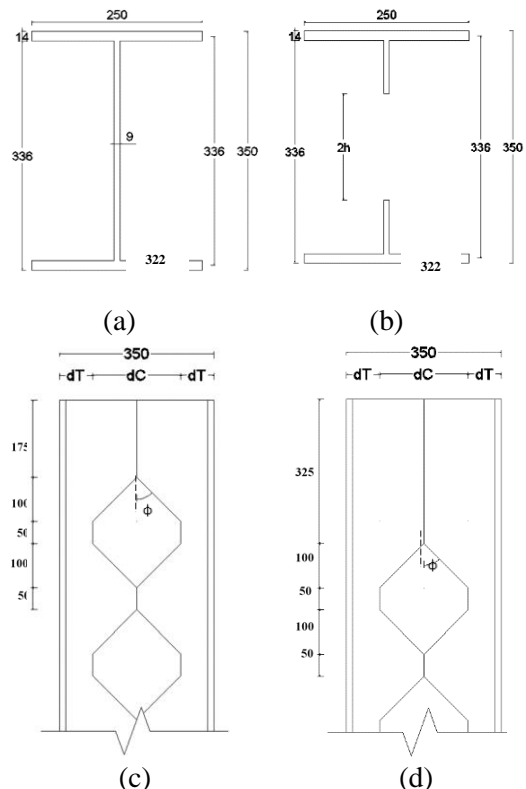
Metode Penelitian dilakukan dalam tiga tahap, yaitu input, analisis, dan output. Tahap input antara lain adalah pemodelan struktur tiga dimensi kolom termasuk didalamnya penentuan element type yang sesuai dan pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil (meshing). Setelah pemodelan selesai, tipe analisis yang akan dijalankan diatur dalam tahap solution termasuk menerapkan beban, syarat-syarat batas, serta pemilihan metode penyelesaian persamaan yang akan digunakan. Dan tahap output, hasil analisis dapat ditampilkan seperti nilai *eigen* dan deformasi.

Pemodelan yang digunakan pada penelitian ini yaitu pada profil H dan profil Kastela dengan variasi besar sudut lubang bukaan dan jumlah lubang. Elemen kolom dengan constrain pada ujung bawah kolom tidak diijinkan berdeformasi

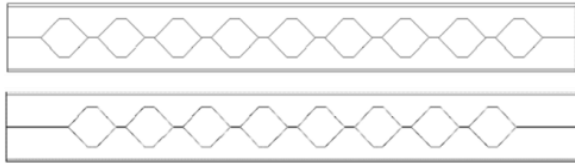
arah x,y,z ($\Delta x, \Delta y, \Delta z = 0$) dengan tidak diijinkan perputaran sudut arah y ($\theta_y = 0$) namun diijinkan perputaran sudut arah x dan z ($\theta_x, \theta_z \neq 0$), pada ujung atas kolom diijinkan untuk berdeformasi arah y ($\Delta y \neq 0$) dengan tidak diijinkan berdeformasi arah x dan z ($\Delta x, \Delta z = 0$) dan tidak diijinkan perputaran sudut arah y ($\theta_y = 0$) namun diijinkan pada sumbu x dan z ($\theta_x, \theta_z \neq 0$) untuk memodelkan perletakan sendi-sendii dengan panjang efektif (KL) = 1.



Gambar 8. Profil utuh H 250 x 250 x 14 x 9 mm
(a) Tampak Atas, (b) Tampak Depan



Gambar 9. Profil kastela 350 x 250 x 14 x 9 mm
(a) Tampak Atas bagian utuh, (b) Tampak Atas bagian berlubang, (c) Detail ukuran untuk jumlah lubang ganjil, dan (d) Detail ukuran untuk jumlah lubang genap.

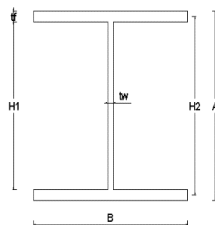


Gambar 10. Contoh profil kastela lubang genap dan ganjil yang akan digunakan pada percobaan

Variasi tinggi lubang profil kastela (d_c), besar sudut bukaan (ϕ), dan tinggi bagian atas profil (d_t) pada percobaan ini dijelaskan dalam Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Variasi Ukuran Profil kastela yang akan di uji

No.	Tipe Profil	Tinggi Lubang (d_c) (mm)	Tinggi Bagian Atas (d_t) (mm)	Sudut Bukaan (ϕ) ($^\circ$)
1	Ganjil	120	115	31
	Genap			
2	Ganjil	160	95	39
	Genap			
3	Ganjil	200	75	45
	Genap			
4	Ganjil	240	55	50
	Genap			
5	Ganjil	280	35	54
	Genap			



Gambar 11. Dimensi Kolom

Tabel 3. Dimensi kolom

Profil	A (mm)	B (mm)	tw (mm)	tf (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	Luas Penampang (cm ²)	Ix (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)
1.	250	250	9	14	222	236	89.98	9815.4	3647.1
2.	350	250	9	14	322	350	98.98	*	*

(*) = Bervariasi dikarenakan perbedaan besar lubang bukaan pada profil kastela

Mutu Baja = BJ 37 ($f_y = 240$ MPa)
 Modulus Elastisitas, E = 200000 MPa
 Modulus Geser, G = 77200 MPa
 Angka Poisson, $\nu = 0.30$
 Koefisien muai panjang = $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Data Beban

Beban yang diterapkan terdiri dari beban tekan konstan searah gravitasi. Beban tekan searah gravitasi diletakkan di atas kolom sebesar

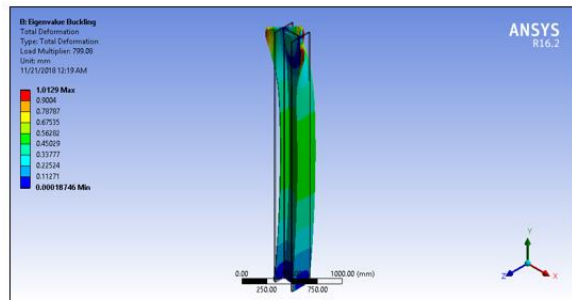
1 MPa untuk di cari kapasitas beban kritisnya untuk analisa Eigen Buckling, sedangkan untuk analisa static menggunakan beban searah gravitasi dengan cara coba-coba sehingga mendapatkan besaran yang sesuai.

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Perhitungan Analisis dengan metode Eigenvalue Buckling:

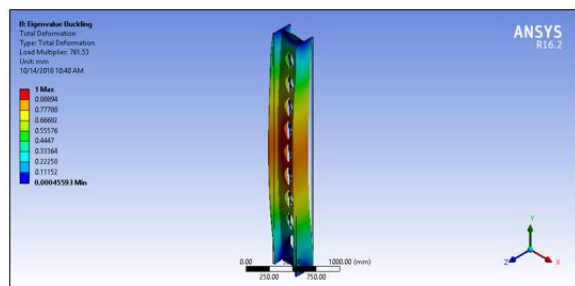
Contoh perhitungan beban tekuk (P_{cr}) pada profil H utuh 250 x 250 dengan Program ANSYS:



Gambar 12. Kontur Warna Total Deformation pada Profil Utuh

Load Multiplayer = 799.08 N/mm²
 Luas Penampang = 8998 mm²
 Beban kritis (P_{cr}) = 799.08 N/mm².8998mm²
 = 7190121.84 N
 = 719.012 Ton

Contoh perhitungan beban tekuk (P_{cr}) pada profil kastela dengan tinggi lubang bukaan 120 mm dengan Program ANSYS:

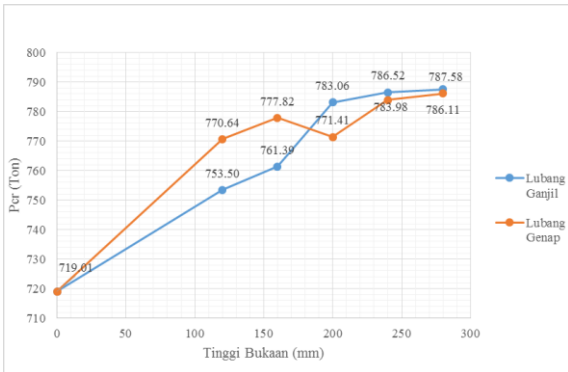


Gambar 13. Kontur Warna Total Deformation pada Profil Kastela

Load Multiplayer = 761.53 N/mm²
 Luas Penampang = 9898 mm²
 Beban kritis (P_{cr}) = 761.53N/mm².9898 mm²
 = 7537623.94 N
 = 753.762 Ton

Tabel 4. Hasil Analisis (ANSYS) Pcr & Tinggi Bukaannya

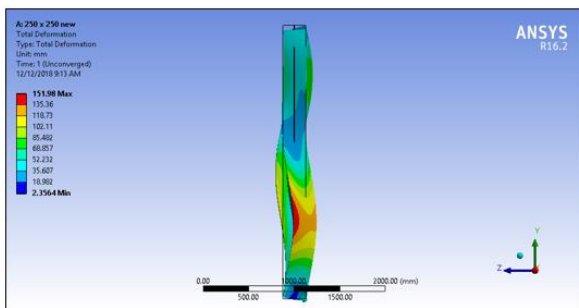
Ukuran Profil	Tinggi Bukaannya (mm)	Gambar Profil	A (mm ²)	Iy (Cm ⁴)	ANSYS (N/mm ²)		Pcr (ton)		
					Lubang Ganjil	Lubang Genap	Lubang Ganjil	Lubang Genap	
H Utuh 250 x 250	0		8998	3278.3	799.08		719.01		
Kastela 350 x 250	120		9898	3435.53	3513.7	761.26	778.58	753.50	770.64
	160			3471.54	3546.5	769.24	785.84	761.39	777.82
	200			3570.33	3517.2	791.13	779.36	783.06	771.41
	240			3586.12	3574.5	794.63	792.06	786.52	783.98
	280			3590.95	3584.2	795.7	794.21	787.58	786.11



Gambar 14. Grafik Perbandingan Pcr (Ton) & Variasi Tinggi Bukaannya (mm)

Grafik diatas dapat terlihat semakin besar tinggi bukaannya lubang pada profil kastela maka semakin tinggi pula nilai Pcr yang dihasilkan dan sesuai dengan rumus dasar Euler, namun rumus dasar Euler hanya dapat di terapkan pada profil dengan nilai kelangsingan efektif (λ) > 110 yang tidak sesuai dengan profil yang di uji dengan nilai $\lambda = 47,11$ sehingga dibutuhkan Analisa Static dengan bantuan Program *Ansys*.

Perhitungan Analisis dengan Static Analysis:
 Hasil beban tekuk (Pmax) pada profil H utuh 250 x 250 dengan Program ANSYS:

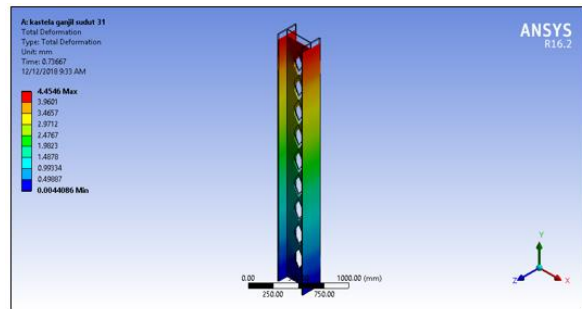


Gambar 15. Kontur Warna Total Deformation pada profil Utuh 250 x 250

Tabel 5. Tabel Hasil Analisis FEM untuk Profil Utuh 250 x 250

Substep	Time (s)	Beban Vertikal (N)	Beban Horizontal (N)	Deformasi (mm)	Tegangan (MPa)
1	0.020	62000	50.0	0.1040	7.0203
2	0.040	124000	50.0	0.2074	13.911
3	0.070	217000	50.0	0.3624	24.247
4	0.103	320330	50.0	0.5347	35.731
5	0.137	423670	50.0	0.7069	47.214
6	0.170	527000	50.0	0.8791	58.697
7	0.203	630330	50.0	1.0513	70.178
8	0.237	733670	50.0	1.2234	81.659
9	0.270	837000	50.0	1.3955	93.14
10	0.303	940330	50.0	1.5677	104.62
11	0.337	1043700	50.0	1.7397	116.1
12	0.370	1147000	50.0	1.9118	127.58
13	0.403	1250300	50.0	2.0839	139.05
14	0.437	1353700	50.0	2.2559	150.53
15	0.470	1457000	50.0	2.4279	162.01
16	0.503	1560300	50.0	2.5999	173.48
17	0.537	1663700	50.0	2.7718	184.96
18	0.570	1767000	50.0	2.9438	196.43
19	0.603	1870300	50.0	3.1157	207.9
20	0.637	1973700	50.0	3.2876	219.37
21	0.670	2077000	50.0	3.4595	230.85
22	0.703	2180300	50.0	4.5230	242.12
23	0.737	2283700	50.0	9.4666	253.22
24	0.770	2387000	49.5	14.4060	264.64
25	0.803	2488200	111.1	19.4290	276.05
26	0.837	2593200	61.0	24.2400	287.96
27	0.87	2697000	48.9	29.054	298.12
28	0.9033	2800300	50.0	33.894	309.12
29	0.9367	2903600	51.5	38.774	320.99
30	1	0	0.0	151.98	0

Hasil beban tekuk (Pmax) pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 120 mm Lubang Ganjil dengan Program ANSYS:



Gambar 16. Kontur Warna Total Deformation pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 120 mm Ganjil

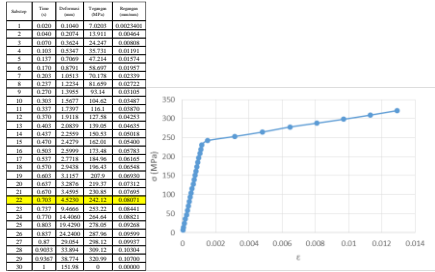
Tabel 6. Hasil Analisis FEM untuk Profil Tinggi Bukaannya 120 mm Ganjil

Substep	Time	Beban Vertikal (N)	Beban Horizontal (N)	Deformasi (mm)	Tegangan (MPa)
1	0.020	58000	-50.00	0.10	17.59
2	0.040	116000	-50.00	0.20	35.18
3	0.070	203000	-50.00	0.34	61.58
4	0.103	299670	-50.00	0.50	90.91
5	0.137	396330	-50.00	0.67	120.25
6	0.170	493000	-50.00	0.83	149.60
7	0.203	589670	-50.00	0.99	178.96
8	0.237	686330	-50.00	1.15	208.33
9	0.270	783000	-50.00	1.32	235.21
10	0.303	879670	-50.00	1.48	246.26
11	0.337	976330	-50.00	1.64	268.29
12	0.370	1073000	-50.00	1.81	254.43
13	0.403	1169700	-50.00	1.97	251.12
14	0.437	1266300	-50.00	2.14	252.03
15	0.470	1363000	-50.01	2.30	250.84
16	0.503	1459700	-50.00	2.47	256.50
17	0.537	1556300	-50.00	2.64	255.92
18	0.570	1653000	-50.00	2.82	258.29
19	0.603	1749700	-50.01	3.00	262.63
20	0.637	1846300	-50.00	3.19	267.70
21	0.670	1943000	-50.03	3.38	273.82
22	0.703	2039700	-50.00	3.59	279.90
23	0.737	2136300	-49.89	4.45	291.75
24	0.770	2231900	-16.15	13.00	348.63
25	0.790	2285200	498.18	24.03	393.38
26	1	0	0.00	877.82	0.00

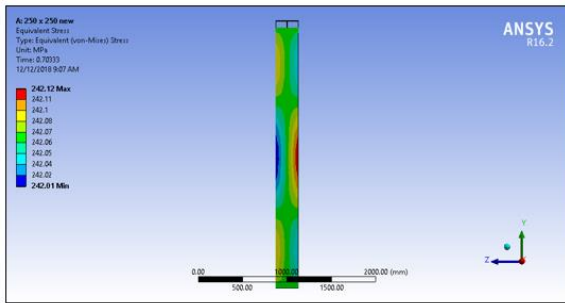
Pembahasan Hasil Analisis

a. Hubungan Tegangan (σ) dan Regangan (ϵ) Pada Profil

Tabel 7. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil utuh 250 x 250

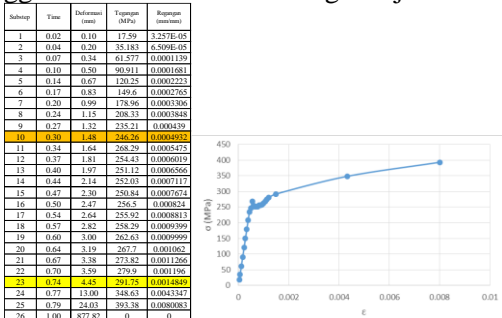


Gambar 17. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil utuh 250 x 250 mm

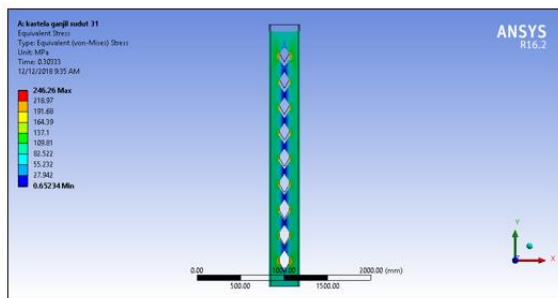


Gambar 18. Kontur Warna Tegangan pada profil Utuh saat mulai Leleh

Tabel 8. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukan 120 mm Lubang Ganjil

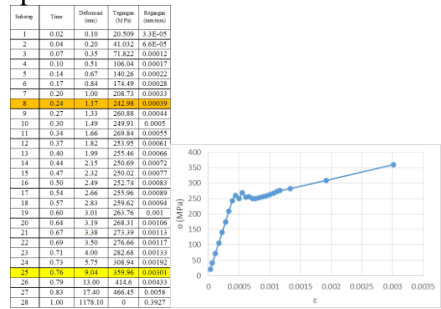


Gambar 19. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukan 120 mm Lubang Ganjil

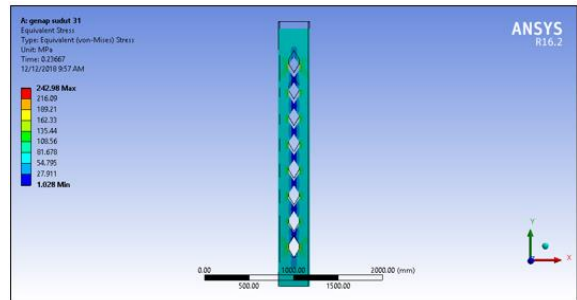


Gambar 20. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukan 120 mm Lubang Ganjil saat Awal Leleh

Tabel 9. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukan 120 mm Lubang Genap

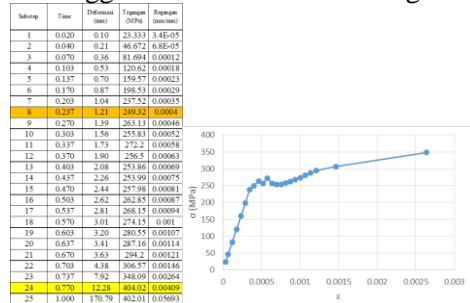


Gambar 21. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukan 120 mm Lubang Genap

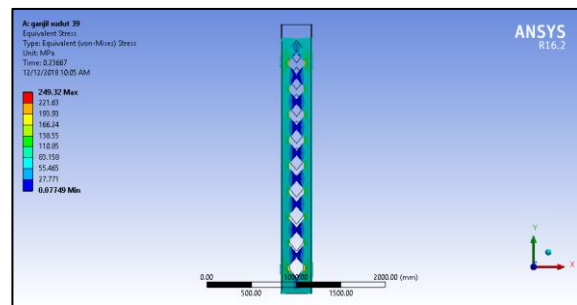


Gambar 22. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukan 120 mm Lubang Genap saat Awal Leleh

Tabel 10. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukan 160 mm Lubang Ganjil

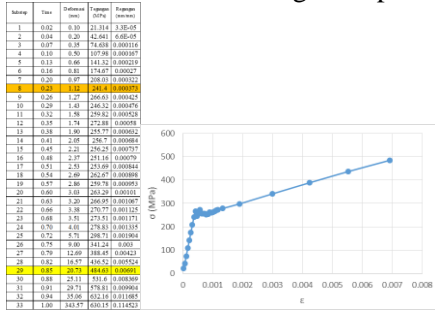


Gambar 23. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukan 160 mm Lubang Ganjil



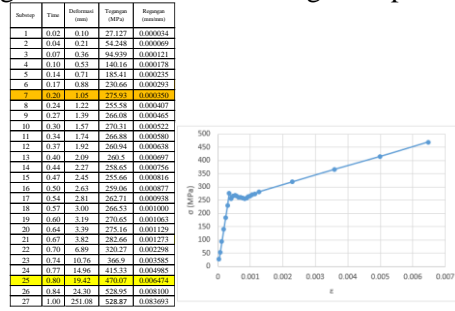
Gambar 24. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukan 160 mm Lubang Ganjil saat Awal Leleh

Tabel 11. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 160 mm Lubang Genap

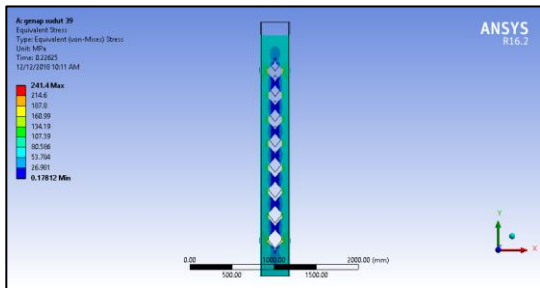


Gambar 25. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukaannya 160 mm Lubang Genap

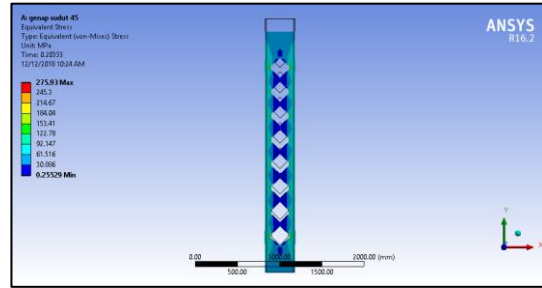
Tabel 13. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 200 mm Lubang Genap



Gambar 29. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukaannya 200 mm Lubang Genap

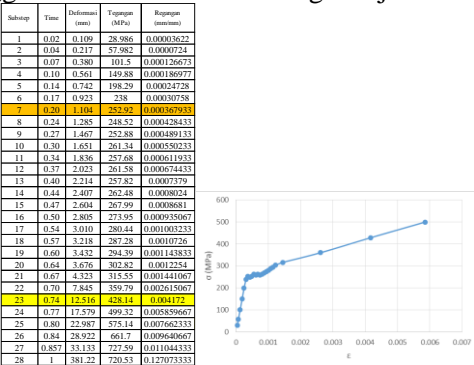


Gambar 26. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 160 mm Lubang Genap saat Awal Leleh



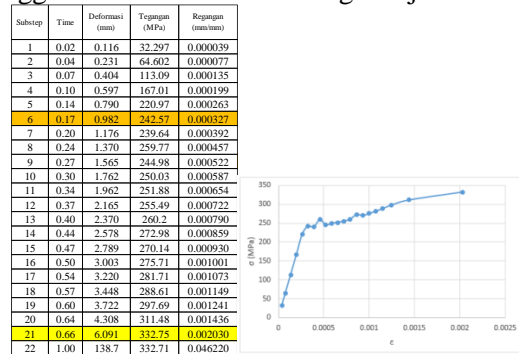
Gambar 30. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 200 mm Lubang Genap saat Awal Leleh

Tabel 12. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 200 mm Lubang Ganjil

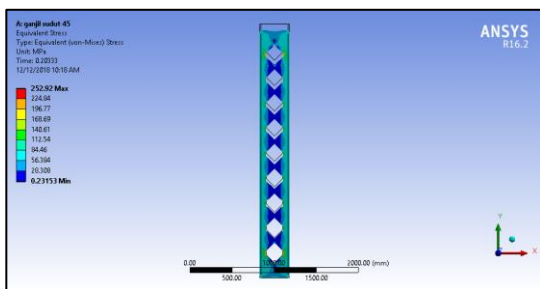


Gambar 27. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukaannya 200 mm Lubang Ganjil

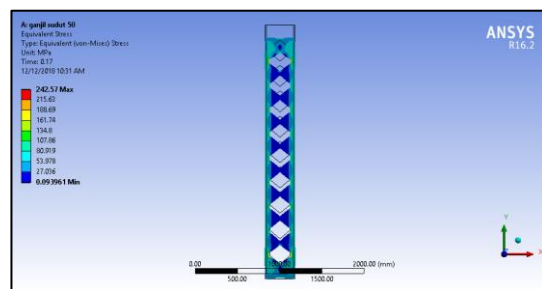
Tabel 14. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 240 mm Lubang Ganjil



Gambar 31. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukaannya 240 mm Lubang Ganjil



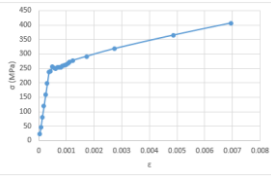
Gambar 28. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 200 mm Lubang Ganjil saat Awal Leleh



Gambar 32. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 240 mm Lubang Ganjil saat Awal Leleh

Tabel 15. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 240 mm Lubang Genap

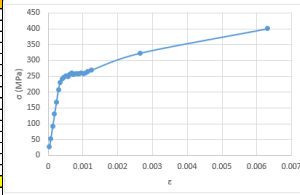
Substep	Time	Displacement (mm)	Topgangan (MPa)	Regangan (mm/mm)
1	0.02	0.11	23.248	3.69867E-05
2	0.04	0.22	46.495	7.39734E-05
3	0.07	0.33	81.374	0.000126
4	0.10	0.56	120.14	0.000186
5	0.14	0.74	158.92	0.000246
6	0.17	0.92	197.71	0.000306
7	0.20	1.10	236.52	0.000366
8	0.24	1.28	275.31	0.000427
9	0.27	1.46	294.44	0.000487
10	0.30	1.64	251.72	0.000547
11	0.34	1.82	249.19	0.000608
12	0.37	2.01	253.77	0.000669
13	0.40	2.19	253.77	0.000730
14	0.44	2.38	254.37	0.000791
15	0.47	2.57	252.57	0.000852
16	0.50	2.76	260.77	0.000913
17	0.54	2.95	263.92	0.000974
18	0.57	3.15	267.24	0.001035
19	0.60	3.35	271.85	0.001096
20	0.64	3.69	277.79	0.001157
21	0.68	4.16	291.61	0.001218
22	0.69	4.20	318.37	0.001279
23	0.71	14.57	365.11	0.004856
24	0.73	20.41	406.83	0.009936
25	1.00	52.73	466.75	0.177877



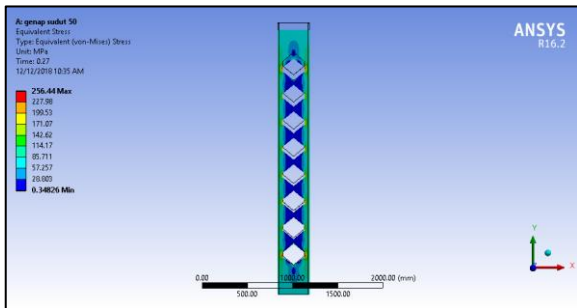
Gambar 33. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukaannya 240 mm Lubang Genap

Tabel 17. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 280 mm Lubang Genap

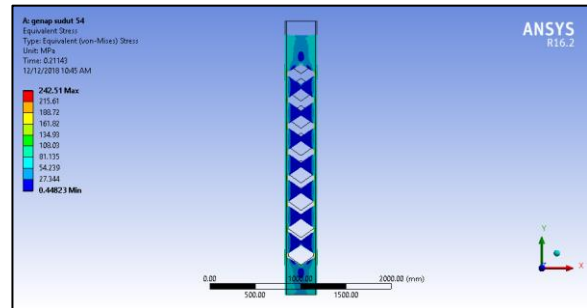
Substep	Time	Displacement (mm)	Topgangan (MPa)	Regangan (mm/mm)
1	0.02	0.11	26.888	3.7848E-05
2	0.04	0.22	53.776	7.5696E-05
3	0.07	0.33	92.2	0.0001207
4	0.10	0.55	130.63	0.0001837
5	0.13	0.71	169.06	0.0002473
6	0.15	0.87	207.5	0.0003117
7	0.18	1.04	231.76	0.0003757
8	0.21	1.26	244.51	0.0004397
9	0.24	1.56	247.89	0.0005038
10	0.27	1.52	250.49	0.0005678
11	0.30	1.69	249.98	0.0006318
12	0.33	1.85	256.31	0.0006958
13	0.35	2.02	259.48	0.0007598
14	0.38	2.18	256.45	0.0008238
15	0.41	2.35	258.25	0.0008878
16	0.44	2.51	258.81	0.0009518
17	0.47	2.68	257.21	0.0010158
18	0.50	2.85	260.13	0.0010798
19	0.53	3.02	257.63	0.0011438
20	0.55	3.19	260.77	0.0012078
21	0.58	3.39	264.72	0.0012718
22	0.61	3.76	270.15	0.0013358
23	0.64	7.91	323.07	0.002636
24	0.66	18.91	400.63	0.0083993
25	1.00	148.81	466.75	0.1641131



Gambar 37. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukaannya 280 mm Lubang Genap



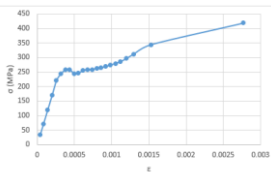
Gambar 34. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 240 mm Lubang Genap saat Awal Leleh



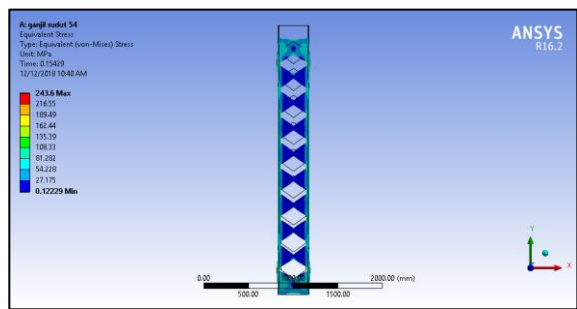
Gambar 38. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 280 mm Lubang Genap saat Awal Leleh

Tabel 16. Hasil Analisis $\sigma - \epsilon$ pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 280 mm Lubang Ganjil

Substep	Time	Displacement (mm)	Topgangan (MPa)	Regangan (mm/mm)
1	0.020	0.12	35.153	4.11E-05
2	0.040	0.25	70.324	8.22E-05
3	0.069	0.42	120.6	0.000141
4	0.097	0.60	170.9	0.00021
5	0.126	0.77	221.24	0.00028
6	0.154	0.95	243.4	0.000337
7	0.183	1.13	257.56	0.000376
8	0.211	1.31	259.01	0.000435
9	0.240	1.48	243.87	0.000494
10	0.269	1.66	245.78	0.000554
11	0.297	1.84	256.1	0.000614
12	0.326	2.02	257.71	0.000675
13	0.354	2.21	259.44	0.000736
14	0.383	2.39	261.93	0.000797
15	0.411	2.58	264.82	0.000859
16	0.440	2.77	268.54	0.000922
17	0.469	2.96	274.5	0.000985
18	0.497	3.15	279.85	0.00105
19	0.526	3.35	286.22	0.001118
20	0.554	3.59	296.62	0.001195
21	0.583	3.88	312.14	0.001295
22	0.611	4.58	344.45	0.001528
23	0.640	6.30	416.74	0.002099
24	1.000	37.26	419.45	0.012421

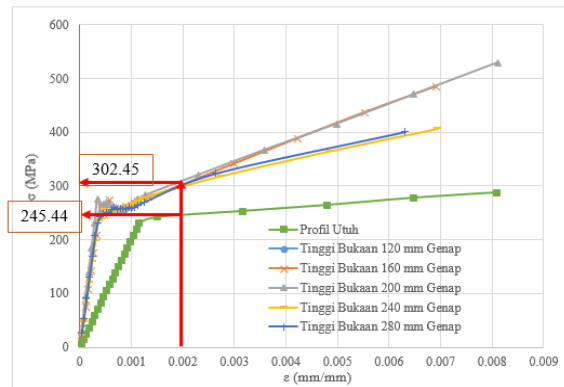


Gambar 35. Kurva $\sigma - \epsilon$ pada Profil Kastela Tinggi Bukaannya 280 mm Lubang Ganjil



Gambar 36. Kontur Warna Tegangan pada profil Kastela Tinggi Bukaannya 280 mm Lubang Ganjil saat Awal Leleh

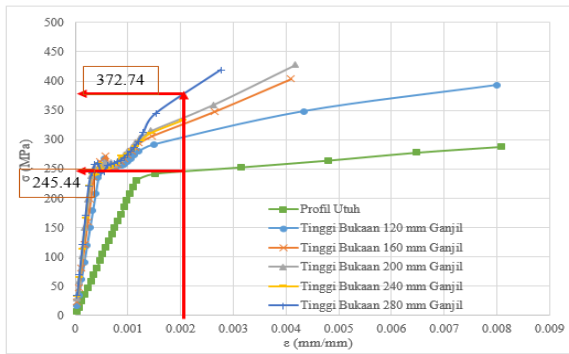
b. Hubungan Tegangan (σ) dan Regangan (ϵ) pada masing-masing profil



Gambar 39. Kurva Perbandingan $\sigma - \epsilon$ pada profil Utuh dan Katela Lubang Genap

Batas regangan pada 0.2 % dari Gambar 39. di atas diperoleh perbandingan Tegangan antara profil utuh dan profil kastela dengan tinggi bukaan 120 mm lubang genap diperoleh nilai tegangan sebesar 245.44 MPa untuk profil utuh dan 302.45 MPa untuk profil kastela dengan Pn sebesar 2208559.1 N untuk profil utuh dan 2993650.1 N untuk profil kastela lubang genap dengan selisih Pn sebesar 35.54 %. Dari tabel 5.

sebelumnya terlihat bahwa profil utuh mencapai leleh pertama bersamaan dengan deformasi yang besar maka profil utuh mengalami tekuk yang diakibatkan oleh penampang yang telah leleh pada bagian sayap di tengah bentang, sedangkan pada profil kastela lubang ganjil rata-rata memiliki perilaku yang serupa yaitu tegangan mulai tidak teratur pada kondisi inelastis/plastis sesuai dengan kurva pada Gambar 39. di atas dan profil kastela masih dapat memikul beban walaupun tegangan leleh dari profil kastela telah tercapai, keruntuhan pada profil kastela lubang ganjil diakibatkan karena tegangan leleh yang terlalu besar pada badan profil sehingga hal tersebut yang mengakibatkan tekuk terjadi pada profil kastela lubang ganjil seperti terlihat pada gambar 20.



Gambar 40. Kurva Perbandingan $\sigma - \epsilon$ pada profil Utuh dan Katela Lubang Ganjil

Batas regangan pada 0.2 % dari Gambar 40. di atas diperoleh perbandingan Tegangan antara profil utuh dan profil kastela dengan tinggi bukaan 120 mm lubang ganjil diperoleh nilai tegangan sebesar 245.44 MPa untuk profil utuh dan 372.74 MPa untuk profil kastela dengan Pn sebesar 2208559.1 N untuk profil utuh dan 3689380.52 N untuk profil kastela lubang genap dengan selisih Pn sebesar 67.04 %.

Profil kastela lubang genap rata-rata memiliki perilaku yang serupa terlihat pada Gambar 40. di atas yaitu, tegangan mulai tidak teratur pada kondisi inelastis/plastis sesuai dengan kurva di atas dan profil kastela masih dapat memikul beban serta mengalami peningkatan kuat tekan pada tinggi bukaan 160 mm lubang genap dibandingkan dengan profil utuh, walaupun tegangan leleh dari profil kastela telah tercapai, keruntuhan pada profil kastela diakibatkan karena tegangan leleh yang terlalu besar pada badan profil sehingga hal tersebut yang mengakibatkan tekuk terjadi pada profil kastela lubang ganjil seperti terlihat pada gambar 26 dan 27. Dari gambar 39. sebelumnya terlihat

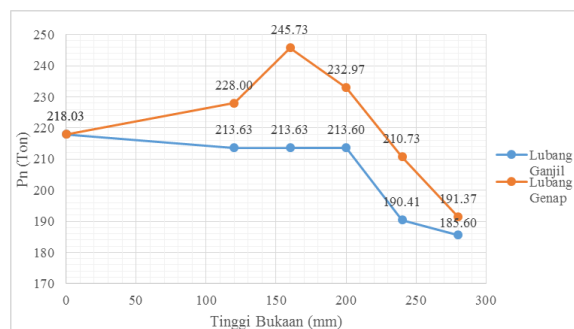
bahwa perilaku untuk semua profil kastela lubang genap cenderung mengalami perilaku yang serupa dibuktikan dengan kemiringan dan model kurva pada grafik, untuk semua variasi tinggi bukaan profil kastela dapat mencapai tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan profil H Utuh, serta profil kastela memiliki regangan yang lebih kecil dibandingkan dengan profil utuh.

c. Pengaruh tinggi bukaan terhadap kekuatan profil

Pemodelan untuk mengetahui kuat tekan nominal pada profil dilakukan analisa secara Static dengan memberikan gaya vertikal pada tengah penampang profil sehingga dapat terlihat penambahan deformasi yang signifikan sebagai ukuran atau batasan suatu profil sudah tidak lagi dapat menahan beban tekan yang di berikan.

Tabel 18. Hasil Pnominal berdasarkan Analitis dan analisis Ansys.

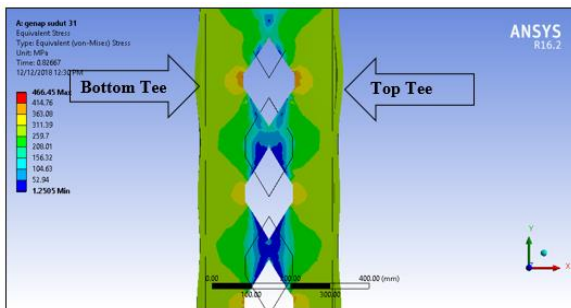
Ukuran Profil	Tinggi Bukaan (mm)	Besarnya Sudut Bukaan (°)	Gambar Profil	Luas Penampang (mm ²)	Pn Analitis (Ton)	Pn Hasil Ansys	
						Lubang Ganjil	Lubang Genap
H Utuh 250 x 250	0	0		8998	192.87	218.03	
Kastela 350 x 250	120	31		9898	209.79	213.63	228.00
	160	39				213.63	245.73
	200	45				213.60	232.97
	240	50				190.41	210.73
	280	54				185.60	191.37



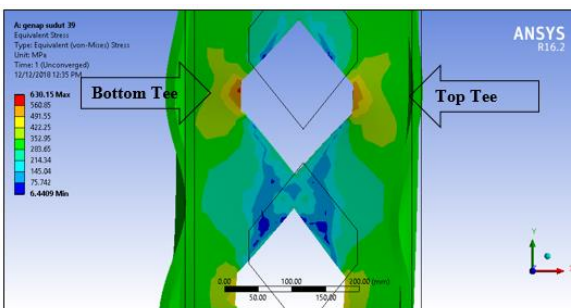
Gambar 41. Kurva Pengaruh Tinggi Bukaan Terhadap Pnominal Profil

Kurva pada Gambar 41. dapat menggambarkan berubahnya model profil dari utuh ukuran 250 x 250 mm menjadi kastela dengan ukuran 350 x 250 mm dapat meningkatkan kuat tekan dari profil H yang digunakan sebagai pengujian, namun peningkatan tersebut terjadi pada tinggi bukaan serta besar sudut tertentu seperti pada gambar 30. peningkatan kuat tekan profil tersebut terjadi pada profil lubang genap tinggi bukaan 120, 160,

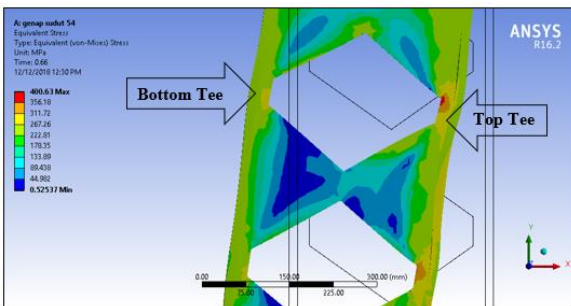
dan 200 mm. Dikarenakan Untuk nilai kuat tekan terbesar terdapat pada tinggi bukaan 160 mm lubang genap dengan besar sudut bukaan 39° dengan peningkatan sebesar 12.7 % dari 218.03 Ton menjadi 245.73 Ton, sedangkan untuk lubang ganjil cenderung mengalami penurunan kuat tekan profil. Hal yang mempengaruhi kuat tekan tersebut dikarenakan kemiringan potongan pada sudut 39° yang dapat menurunkan tegangan di bagian bottom tee dan top tee pada penampang kastela seperti terlihat pada gambar 42 dan 43. berikut, berbeda pada tinggi bukaan sudut 54° pada gambar 44. yang memiliki bagian bottom tee dan top tee semakin kecil sehingga tegangan semakin besar di sekitar lubang dan dapat melemahkan kekuatan profil kastela.



Gambar 42. Kontur Tegangan pada profil dengan sudut bukaan 31°



Gambar 43. Kontur Tegangan pada profil dengan sudut bukaan 39°



Gambar 44. Kontur Tegangan pada profil dengan sudut bukaan 54°

PENUTUP

Kesimpulan

Penelitian ini menghadirkan model elemen hingga tiga dimensi untuk analisa kuat batang tekan. Masing-masing profil diberikan beban tekan secara bertahap untuk mengetahui pengaruh perubahan kuat tekan nominal profil terhadap tinggi bukaan lubang dan perilaku profil kastela. Profil kastela yang digunakan merupakan bentuk dari profil H utuh dengan ukuran $250 \times 250 \times 14 \times 9$ mm menjadi profil kastela dengan ukuran $350 \times 250 \times 14 \times 9$ mm. Beberapa hal yang menjadi kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Profil kastela dengan tinggi bukaan 160 mm dan sudut bukaan 39° dengan lubang genap menjadi ukuran yang paling optimum sehingga dapat meningkatkan kuat tekan nominal pada profil sebesar 12.7 % dibandingkan dengan profil utuh dengan rasio perbandingan sebesar 1.27 untuk luas penampang profil kastela (A_c) terhadap luas penampang utuh (A_0).
2. Sudut bukaan 39° merupakan sudut bukaan yang paling optimum dikarenakan sudut tersebut dapat menghasilkan kuat tekan nominal terbesar serta kemiringan yang dihasilkan berdasarkan sudut tersebut dapat memperkecil distribusi tegangan yang terjadi pada bagian Tee profil kastela.
3. Profil kastela lubang ganjil memiliki kuat tekan nominal yang lebih rendah dibandingkan dengan profil utuh, dikarenakan terdapatnya lubang di bagian tengah bentang yang mengalami deformasi cukup besar, sehingga saat profil dibebani dapat menurunkan nilai kuat tekan pada profil.
4. Pada titik regangan 0.2 % untuk profil utuh dan kastela lubang genap memiliki selisih nilai P_n sebesar 35.54 %, sedangkan untuk profil utuh dan kastela lubang ganjil memiliki selisih nilai P_n sebesar 67.04 % yang menunjukkan semakin besar selisih tegangan leleh pada profil kastela maka semakin lemah profil tersebut dibandingkan dengan profil utuh.

Saran

1. Melakukan analisis kuat tekan profil kastela dengan beban momen di ujung-ujung atau salah satu profil.
2. Melakukan analisis kuat tekan profil kastela dengan variasi bentuk lubang bukaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arianto. 2015. Studi Perilaku Join Balok Castella – Kolom Baja Akibat Beban Siklik. Universitas Hasanudin. Makassar.
- Badan Standarisasi Nasional, “Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung, SNI 03-1729-2002”, Bandung, 2000.
- Badan Standarisasi Nasional, “Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, SNI 1729-2015”, Jakarta, 2015.
- Bhavikatti, S. S. 2005. Finite Element Analysis. New Age International Publisher.
- Dewobroto, Wiryanto. 2016. Struktur Baja Perilaku dan Desain – AISC 2010. Edisi Ke-2. Lumina Press, Jakarta.
- Gunawan, Rudy. 1988. Tabel Profil Konstruksi Baja. Kanisius. Yogyakarta.
- Salmon, C., & Johnson. (1997). Struktur Baja Disain dan Perilaku. Jakarta : Erlangga.
- Napitupulu, T. L. Philip. Tekuk Baja Profil IWF dan Honeycomb (Castella) (Teori dan Eksperimental). Universitas Sumatera Utara.
- Setiawan. A, 2008. Perencanaan Struktur Baja dengan metode LFRD, Erlangga: Jakarta
- Toreh, S. R., Wallah, S. E., Dapas, S. O., 2015. Optimasi Tinggi Pemotongan Lubang Heksagonal Pada Castellated Beam. Jurnal Sipil Statik Vol. 3. No. 7. Universitas Sam Ratulangi, Manado.

Halaman ini sengaja dikosongkan