

OPTIMASI PARAMETER BUKAAN DAN PENGAKU DIAGONAL PADA BALOK KASTELA YANG TERTUMPU LATERAL

Erwin Sanjaya dan Bambang Suryoatmono
Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan
Email: erwin.sanjaya1996@gmail.com

Abstrak: Gaya geser pada umumnya berkontribusi besar dalam menyebabkan kegagalan balok kastela sehingga dibutuhkan pengaku diagonal pada bukaan. Optimisasi dilakukan dengan bervariasi dimensi bukaan dan pengaku diagonal. Metode elemen hingga digunakan untuk analisis nonlinear. Tujuan studi ini adalah membandingkan hasil analisis numerik balok kastela tanpa pengaku diagonal dengan prosedur desain yang terdapat pada *Steel Design Guide 31, AISC 2016*. Selain itu, perilaku nonlinear yang meliputi beban kritis dan distribusi tegangan Von Mises balok kastela dengan dan tanpa pengaku diagonal dipelajari untuk mendapatkan dimensi bukaan dan pengaku diagonal yang optimum. Nilai optimum pada studi ini meliputi kekakuan awal (K_i), kekuatan (w_{max}), dan daktilitas (μ) struktur. Hasil studi menunjukkan prosedur desain AISC dapat memprediksi lokasi tegangan maksimum dengan akurat dan menghasilkan kekuatan ultimit balok yang lebih konservatif dibandingkan dengan hasil numerik. Pada balok kastela tanpa pengaku diagonal, model yang optimum adalah model CB60-1 ($w_{nstmax} = 56,16$ kN/m) dan CB45-1 ($\mu_{nst} = 3,06$) dengan rata-rata kekakuan awal 5,78 kN/m. Sedangkan model yang optimum pada balok kastela dengan pengaku diagonal adalah CB45-33 ($K_{sti} = 6,99$ kN/m/m), CB60-11 ($w_{stmax} = 67,53$ kN/m), dan CB60-24 ($\mu_{st} = 2,79$). Jadi, penggunaan pengaku diagonal efektif dalam meningkatkan kekakuan awal dan kekuatan struktur, tetapi mengurangi daktilitas struktur.

Kata kunci: balok kastela, pengaku diagonal, optimum, metode elemen hingga, distribusi tegangan Von Mises

OPTIMIZATION OF OPENING AND DIAGONAL STIFFENER PARAMETERS ON LATERALLY BRACED CASTELLATED STEEL BEAM

Abstract: Shear force in general greatly contributes to cause failure of castellated beams so diagonal stiffeners on the openings are required. Optimization was done by vary dimension of openings and diagonal stiffeners. Finite element method is utilized to perform nonlinear analysis. The objective of this research is to compare the numerical results of castellated beams without diagonal stiffeners with AISC design procedures that provided in *Steel Design Guide 31, AISC 2016*. Furthermore, nonlinear behaviour that involves critical load and Von Mises stress distribution of castellated beams with and without diagonal stiffeners were studied to obtain optimum dimension of openings and diagonal stiffeners. Optimum value in this research involves the greatest initial stiffness (K_i), strength (w_{max}), and ductility (μ) of structure. The results showed that AISC design procedures could predict the location of maximum stress accurately and yield more conservative ultimate strength of beam compared to numerical result. The optimum models on castellated steel beams without diagonal stiffeners are CB60-1 ($w_{nstmax} = 56,16$ kN/m) and CB45-1 ($\mu_{nst} = 3,06$) with average initial stiffener 5,78 kN/m. While, the optimum models on castellated steel beams with diagonal stiffeners are CB45-33 ($K_{sti} = 6,99$ kN/m/m), CB60-11 ($w_{stmax} = 67,53$ kN/m), and CB60-24 ($\mu_{st} = 2,79$). Thus, utilization of diagonal stiffeners is effective to increase initial stiffness and strength of structure, but reduce the structure's ductility.

Keywords: castellated beams, diagonal stiffeners, optimum, finite element method, Von Mises stress distribution

PENDAHULUAN

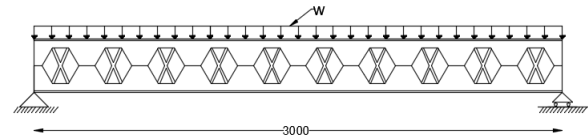
Balok kastela banyak dimanfaatkan pada struktur baja. Adanya bukaan pada balok tersebut dapat mengurangi berat struktur tanpa mengurangi kekuatan secara signifikan dan meningkatkan fleksibilitas dalam pemasangan sistem mekanikal dan elektrik. Namun, eksistensi bukaan pada web mengurangi kekuatan geser dan tekuk serta memunculkan ragam kegagalan tambahan yang tidak terdapat pada balok solid, yaitu mekanisme Vierendeel, tekuk web utuh akibat geser dan kegagalan pengelasan pada web.

Hasil eksperimental menunjukkan ragam kegagalan balok baja kastela disebabkan oleh kelangsingan balok, dimensi bukaan, jenis pembebanan, dan tumpuan lateral (Kerdal dan Nethercot, 1984). Pada kondisi lentur murni, geser, dan tekuk torsi lateral, ragam tersebut dapat diasumsikan sama dengan balok solid apabila properti struktur balok kastela diperoleh dari penampang reduksi (Soltani et al., 2012).

Beberapa penelitian mengenai optimasi dengan variasi geometri bukaan telah dilakukan. Metode elemen hingga menghasilkan beban leleh maksimum yang terjadi pada jarak antar tepi bukaan 60 mm dan sudut bukaan 60° (Frans et al., 2017). Penelitian lain menunjukkan bahwa balok kastela pada sudut bukaan 60° dengan jarak antar tepi bukaan pada rentang 0,186-0,266 dari tinggi bukaan menghasilkan kekuatan optimum (Budi et al., 2017). Selain itu, balok kastela pada jarak antar tepi bukaan 90 mm dan sudut bukaan 60° menghasilkan kekuatan lentur optimum (Sandy et al., 2014).

AISC pada *Steel Design Guide 31* (2016) menyatakan kekuatan geser menjadi kritis pada web dengan bukaan. Untuk mengatasi hal tersebut, pengaku diagonal digunakan pada bukaan (Anupriya dan Jagadeesan, 2014). Penggunaan pengaku diagonal pada balok kastela dengan jumlah dan dimensi yang optimum pada posisi yang tepat dapat meningkatkan kekuatan geser hingga mencapai kekuatan balok solid (Nair dan Pillai, 2018). Selain itu, penggunaan pengaku diagonal juga mengurangi defleksi balok kastela (Girija et al., 2018).

Pada studi ini, balok kastela dimodelkan tertumpu lateral sepanjang balok yang terletak di atas tumpuan sederhana dengan pembebanan terbagi rata (w) seperti terlihat pada Gambar 1. Balok kastela tanpa dan dengan pengaku diagonal dianalisis dengan metode elemen hingga. Tujuan studi ini adalah membandingkan hasil analisis numerik balok kastela tanpa pengaku diagonal dengan prosedur desain yang terdapat pada *Steel Design Guide 31, AISC 2016*. Selain itu, perilaku nonlinear yang meliputi beban kritis dan distribusi tegangan Von Mises balok kastela dengan dan tanpa pengaku diagonal dipelajari untuk mendapatkan dimensi bukaan dan pengaku diagonal yang optimum. Nilai optimum pada studi ini meliputi kekakuan awal, kekuatan, dan daktilitas struktur.



Gambar 1. Model balok baja kastela di atas tumpuan sederhana dengan pembebanan terbagi rata

METODE

Metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak *ANSYS Workbench* digunakan untuk analisis numerik pada studi ini. Tipe elemen yang digunakan adalah *SHELL281* dengan 8 nodal setiap elemen. Setiap nodal memiliki 6 derajat kebebasan, yaitu 3 peralihan dalam arah sumbu X, Y, dan Z dan 3 rotasi terhadap sumbu X, Y, dan Z. Ukuran elemen maksimum ditetapkan 10 mm dan *mesh refinement* dilakukan pada sudut bukaan dengan ukuran elemen maksimum 5 mm.

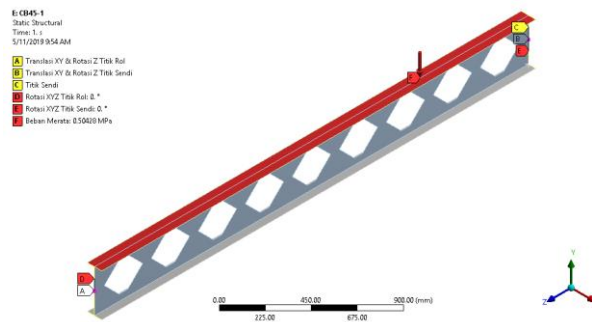
Syarat batas dan pembebanan balok kastela ditunjukkan pada Gambar 2. Rotasi ditahan dalam arah Z dan translasi ditahan dalam arah X dan Y pada kedua sisi ujung balok yang ditunjukkan pada simbol A dan B. Selain itu, translasi pada titik pusat salah satu ujung penampang ditahan dalam arah Z yang ditunjukkan pada simbol C. Untuk mencegah terjadi *RBM (Rigid Body Motion)*, rotasi pada titik pusat penampang kedua ujung ditahan dalam ketiga arah, yang ditunjukkan oleh simbol D dan E. Beban diterapkan terbagi rata pada bagian flens

atas balok kastela. Beban tersebut ditunjukkan dengan simbol F

Material baja dimodelkan bersifat *elastic-perfectly-plastic* dengan tegangan leleh, $F_y = 250$ MPa. Hubungan tegangan-regangan tersebut berlaku untuk tarik dan tekan. Modulus elastisitas yang digunakan 200 GPa dan rasio Poisson 0,3. Kriteria kegagalan yang digunakan adalah Von Mises.

Balok kastela yang dimodelkan berasal dari profil baja *IWF* 200x100x5,5x8 yang dimodifikasi menjadi balok kastela 300x100x5,5x8. Selain itu, balok kastela memiliki panjang bentang 3 m dan tinggi bukaan (h_0) 205 mm yang sama untuk setiap model. Seluruh bagian balok tersebut diasumsikan *perfectly bonded* sehingga las tidak dimodelkan.

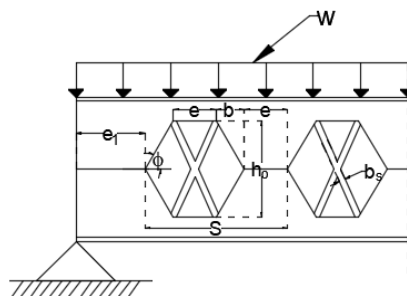
Optimisasi dilakukan dengan bervariasikan dimensi bukaan ($\phi = 45^\circ$ dan 60° dan $e = 60$ mm, 90 mm, dan 120 mm) dan dimensi pengaku diagonal ($b_s = 10$ mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, dan 30 mm dan $t_s = 5,5$ dan 8 mm). Tabel 1 menunjukkan menunjukkan besaran dimensi sudut bukaan (ϕ), jarak antar tepi bukaan (e), jarak dari tepi bukaan ke ujung tumpuan (e_1), dan jumlah bukaan dari 6 model balok kastela tanpa pengaku diagonal. Gambar 3 mengilustrasikan notasi yang digunakan pada studi ini. Setelah pengaku diagonal digunakan, terdapat 66 model pada studi ini. Tabel 2 menunjukkan penamaan model berdasarkan dimensi bukaan dan pengaku diagonal.



Gambar 2. Syarat batas dan pembebanan balok kastela

Tabel 1. Dimensi bukaan model balok kastela (*Castelated Beam*) tanpa pengaku diagonal

Model	b (mm)	e (mm)	S (mm)	e_1 (mm)	Jumlah bukaan (buah)
CB45-1	102,5	60	325	67,5	9
CB45-12	102,5	90	385	197,5	7
CB45-23	102,5	120	445	225	6
CB60-1	60	60	240	90	12
CB60-12	60	90	300	45	10
CB60-23	60	120	360	120	8



Gambar 3. Notasi dimensi bukaan dan pengaku diagonal

HASIL DAN PEMBAHASAN
Balok Kastela Tanpa Pengaku Diagonal

Tabel 3 menunjukkan bahwa beban maksimum yang didapatkan melalui perhitungan berdasarkan prosedur desain *AISC* memberikan hasil lebih konservatif. Hal ini terjadi karena prosedur tersebut

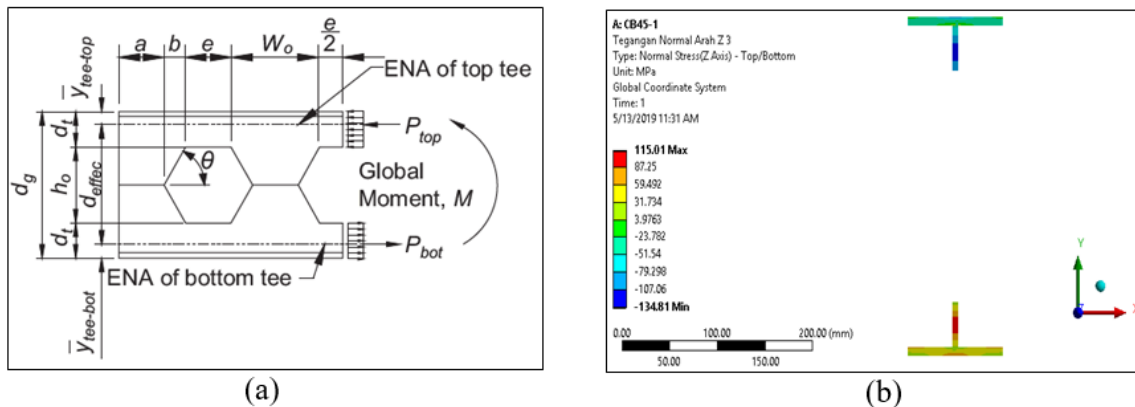
mengasumsikan balok mengalami kegagalan berdasarkan analisis penampang plastis. Sedangkan pada analisis numerik, kegagalan pada balok ditinjau secara global ketika determinan kekakuan balok mendekati nol akibat beban inkremental.

Tabel 2. Penamaan model berdasarkan dimensi bukaan dan pengaku diagonal

Model	Kategori		Dimensi Pengaku Diagonal		Model	Kategori		Dimensi Pengaku Diagonal	
	ϕ (°)	<i>e</i> (mm)	<i>b_s</i> (mm)	<i>t_s</i> (mm)		ϕ (°)	<i>e</i> (mm)	<i>b_s</i> (mm)	<i>t_s</i> (mm)
CB45-1			-	-	CB60-1			-	-
CB45-2			10	5,5	CB60-2			10	5,5
CB45-3			10	8	CB60-3			10	8
CB45-4			15	5,5	CB60-4			15	5,5
CB45-5			15	8	CB60-5			15	8
CB45-6		60	20	5,5	CB60-6		60	20	5,5
CB45-7			20	8	CB60-7			20	8
CB45-8			25	5,5	CB60-8			25	5,5
CB45-9			25	8	CB60-9			25	8
CB45-10			30	5,5	CB60-10			30	5,5
CB45-11			30	8	CB60-11			30	8
CB45-12			-	-	CB60-12			-	-
CB45-13			10	5,5	CB60-13			10	5,5
CB45-14			10	8	CB60-14			10	8
CB45-15			15	5,5	CB60-15			15	5,5
CB45-16			15	8	CB60-16			15	8
CB45-17	45	90	20	5,5	CB60-17	60	90	20	5,5
CB45-18			20	8	CB60-18			20	8
CB45-19			25	5,5	CB60-19			25	5,5
CB45-20			25	8	CB60-20			25	8
CB45-21			30	5,5	CB60-21			30	5,5
CB45-22			30	8	CB60-22			30	8
CB45-23			-	-	CB60-23			-	-
CB45-24			10	5,5	CB60-24			10	5,5
CB45-25			10	8	CB60-25			10	8
CB45-26			15	5,5	CB60-26			15	5,5
CB45-27			15	8	CB60-27			15	8
CB45-28		120	20	5,5	CB60-28		120	20	5,5
CB45-29			20	8	CB60-29			20	8
CB45-30			25	5,5	CB60-30			25	5,5
CB45-31			25	8	CB60-31			25	8
CB45-32			30	5,5	CB60-32			30	5,5
CB45-33			30	8	CB60-33			30	8

Tabel 3. Hasil analisis numerik dan perhitungan berdasarkan *Steel Design Guide 31* balok kastela tanpa pengaku diagonal

Model	Analisis Numerik					<i>Steel Design Guide 31</i>		
	K_{nst} (kN/m/m)	w_{nstmax} (kN/m)	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	μ_{nst}	w_{AISC} (kN/m)	Δ_{AISC} (mm)	Keterangan
CB45-1	5,96	50,43	6,12	18,71	3,06	37,74	5,44	Geser Horizontal
CB45-12	6,02	53,38	5,55	12,83	2,31	29,26	4,22	Mekanisme Vierendeel
CB45-23	5,76	46,08	4,18	11,21	2,68	23,08	3,33	Mekanisme Vierendeel
CB60-1	5,90	56,16	6,96	15,08	2,17	39,41	5,68	Mekanisme Vierendeel
CB60-12	5,55	46,59	5,28	11,92	2,26	26,52	3,82	Mekanisme Vierendeel
CB60-23	5,51	42,19	4,02	11,67	2,90	21,11	3,04	Mekanisme Vierendeel



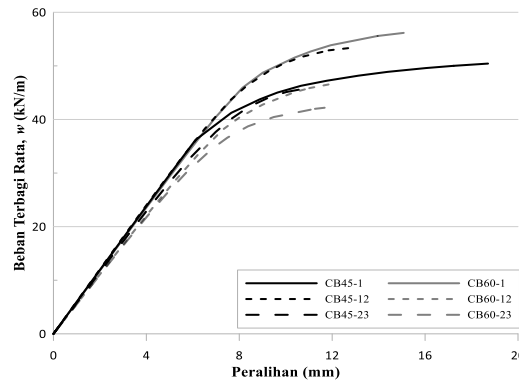
Gambar 4. Verifikasi asumsi *Steel Design Guide 31* melalui analisis numerik:
(a) terminologi perhitungan gaya aksial (Sumber: *Steel Design Guide 31*, AISC 2016),
(b) kontur tegangan normal arah Z model CB45-1 pada kondisi ultimit

Asumsi yang digunakan pada analisis penampang plastis adalah gaya aksial Vierendeel bekerja seragam di penampang T seperti terlihat pada Gambar 4(a). Pada kondisi ultimit, asumsi tersebut terverifikasi tidak pernah terjadi pada semua model numerik. Sebagai contoh, kontur tegangan normal arah Z model CB45-1 yang tidak seragam pada kondisi ultimit seperti yang terlihat pada Gambar 4(b).

Tabel 3 menunjukkan balok kastela tanpa pengaku diagonal yang optimum berdasarkan hasil numerik. Dari segi kekakuan awal, 6 model memiliki kekakuan awal yang tidak berbeda signifikan seperti yang terlihat pada Gambar 5. Rata-rata kekakuan awal sebesar 5,78 kN/m/m dengan angka standar deviasi sebesar 0,21 dan koefisien variasi sebesar 3,70%. Dari segi kekuatan, model CB60-1 memiliki kapasitas memikul beban terbesar, yaitu $w_{nstmax} = 56,16$ kN/m. Perlu dicatat, model CB60-1 juga memiliki kapasitas memikul beban terbesar berdasarkan perhitungan prosedur

desain AISC. Dari segi daktilitas, model CB45-1 memiliki daktilitas struktur terbesar, yaitu $\mu_{nst} = 3,06$.

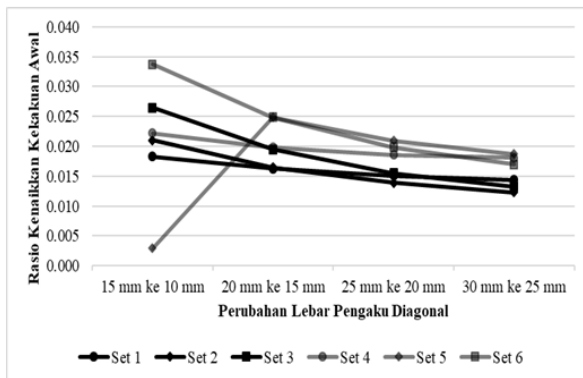
AISC dalam *Steel Design Guide 31* memberikan pendekatan untuk menggunakan 90% momen inersia penampang neto (I_{neto}) pada perhitungan lendutan balok kastela tanpa pengaku diagonal. Analisis numerik dengan simulasi linear dilakukan untuk menverifikasi pendekatan tersebut. Tabel 4 menunjukkan perbandingan lendutan balok kastela berdasarkan prosedur desain AISC dan analisis numerik. Dari tabel tersebut dapat ditarik kesimpulan, penggunaan 90% momen inersia penampang neto pada prosedur tersebut tidak konservatif. Pada studi ini, momen inersia penampang neto dalam menghitung lendutan balok kastela harus direduksi dengan rentang 22%-29%.



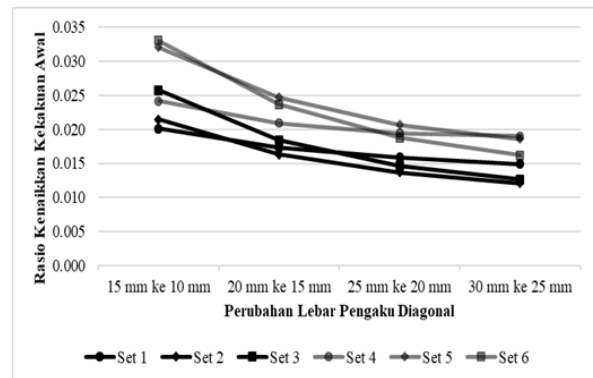
Gambar 5. Grafik beban-peralihan balok kastela tanpa pengaku diagonal

Tabel 4. Perbandingan lendutan balok kastela berdasarkan AISC dengan analisis numerik

w_{AISC} (kN/m)	Δ_{AISC} (mm)	Δ_{AISC} (mm) Tanpa 90% I_{neto}	$\Delta_{numerik}$ (mm)	Reduksi I_{neto} Berdasarkan Analisis Numerik
37,74	5,44	4,89	6,34	22,76%
29,26	4,22	3,79	4,86	21,97%
23,08	3,33	2,99	4,01	25,29%
39,41	5,68	5,11	6,68	23,46%
26,52	3,82	3,44	4,77	27,96%
21,11	3,04	2,74	3,83	28,60%



(a)



(b)

Gambar 6. Peningkatan kekakuan awal struktur dengan tebal pengaku diagonal tetap: (a) 5,5 mm; (b) 8 mm

Balok Kastela Dengan Pengaku Diagonal

Tabel 5 dan Tabel 6 menunjukkan balok kastela dengan pengaku diagonal yang optimum adalah CB45-33 dengan kekakuan awal $K_{sti} = 6,99$ kN/m/m, CB60-11 dengan beban terbagi rata maksimum $w_{stmax} = 67,53$ kN/m, dan CB60-24 dengan daktilitas $\mu_{st} = 2,79$.

Berdasarkan Tabel 5 dan Tabel 6 dipelajari kecenderungan akibat perubahan lebar pengaku diagonal terhadap peningkatan kekakuan awal struktur yang disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 6. Dari gambar tersebut, dapat dipelajari apabila dimensi pengaku diagonal semakin

lebar, maka peningkatan kekakuan awal struktur semakin asimtotis. Dengan kata lain, kekakuan awal struktur tidak berubah signifikan akibat penambahan lebar pengaku diagonal lebih dari 30 mm.

Kecenderungan lain yang dapat dipelajari dari Tabel 5 dan Tabel 6 adalah apabila jarak antar tepi bukaan (e) semakin jauh, maka kekakuan awal semakin besar. Namun, hasil analisis pada balok kastela tanpa pengaku diagonal (Tabel 3) menunjukkan hasil yang berlawanan, yaitu apabila jarak antar tepi bukaan (e) semakin jauh, maka kekakuan awal cenderung semakin mengecil. Selain itu, dari segi

kekuatan, beban maksimum yang dapat dipikul oleh balok kastela tanpa dan dengan pengaku diagonal cenderung mengecil seiring dengan bertambahnya jarak antar tepi bukaan (e).

Penggunaan pengaku diagonal pada balok kastela efektif dalam meningkatkan

kekakuan awal dan kekuatan balok. Namun, penggunaannya cenderung mengurangi daktilitas struktur. Apabila dimensi pengaku diagonal semakin besar, maka kekakuan awal dan kekuatan balok semakin membesar sedangkan daktilitas balok semakin mengecil

Tabel 5. Hasil analisis numerik balok kastela dengan pengaku diagonal

Set	Model	K_{sti} (kN/m/m)	w_{stmax} (kN/m)	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	μ_{kt}	Rasio		
							Kekakuan Awal	Kekuatan	Daktilitas
	CB45-1	5,96	50,43	6,12	18,71	3,06	-	-	-
	CB45-2	6,26	54,84	6,30	14,14	2,24	1,05	1,09	0,73
	CB45-3	6,34	57,46	6,53	15,50	2,37	1,06	1,14	0,78
	CB45-4	6,37	57,03	6,44	13,10	2,03	1,07	1,13	0,67
	CB45-5	6,46	60,53	6,75	14,59	2,16	1,08	1,20	0,71
1	CB45-6	6,47	58,75	6,53	11,95	1,83	1,09	1,16	0,60
	CB45-7	6,56	62,07	6,80	12,35	1,81	1,10	1,23	0,59
	CB45-8	6,56	60,53	6,63	11,42	1,72	1,10	1,20	0,56
	CB45-9	6,66	63,33	6,84	11,43	1,67	1,12	1,26	0,55
	CB45-10	6,64	62,66	6,78	11,34	1,67	1,12	1,24	0,55
	CB45-11	6,75	66,72	7,12	15,09	2,12	1,13	1,32	0,69
	CB45-12	6,02	53,38	5,55	12,83	2,31	-	-	-
	CB45-13	6,49	60,86	5,81	10,46	1,80	1,08	1,14	0,78
	CB45-14	6,59	64,78	7,15	11,43	1,60	1,10	1,21	0,69
	CB45-15	6,62	65,00	7,10	11,38	1,60	1,10	1,22	0,69
	CB45-16	6,72	63,53	6,81	10,02	1,47	1,12	1,19	0,64
2	CB45-17	6,72	63,86	6,84	9,97	1,46	1,12	1,20	0,63
	CB45-18	6,82	64,91	6,84	9,95	1,45	1,13	1,22	0,63
	CB45-19	6,80	65,28	7,89	10,35	1,31	1,13	1,22	0,57
	CB45-20	6,90	65,28	7,76	9,95	1,28	1,15	1,22	0,55
	CB45-21	6,88	65,78	8,85	12,35	1,40	1,14	1,23	0,60
	CB45-22	6,98	65,78	8,71	10,65	1,22	1,16	1,23	0,53
	CB45-23	5,76	46,08	4,18	11,21	2,68	-	-	-
	CB45-24	6,45	59,07	4,76	11,95	2,51	1,12	1,28	0,94
	CB45-25	6,58	62,41	4,92	11,98	2,44	1,14	1,35	0,91
	CB45-26	6,61	66,33	7,44	15,84	2,13	1,15	1,44	0,79
	CB45-27	6,73	66,28	6,10	12,25	2,01	1,17	1,44	0,75
3	CB45-28	6,72	66,51	7,19	12,93	1,80	1,17	1,44	0,67
	CB45-29	6,84	66,28	6,98	10,90	1,56	1,19	1,44	0,58
	CB45-30	6,81	66,51	7,03	11,32	1,61	1,18	1,44	0,60
	CB45-31	6,92	66,66	7,91	10,87	1,37	1,20	1,45	0,51
	CB45-32	6,88	66,78	7,97	11,16	1,40	1,19	1,45	0,52
	CB45-33	6,99	66,86	7,84	10,56	1,35	1,21	1,45	0,50

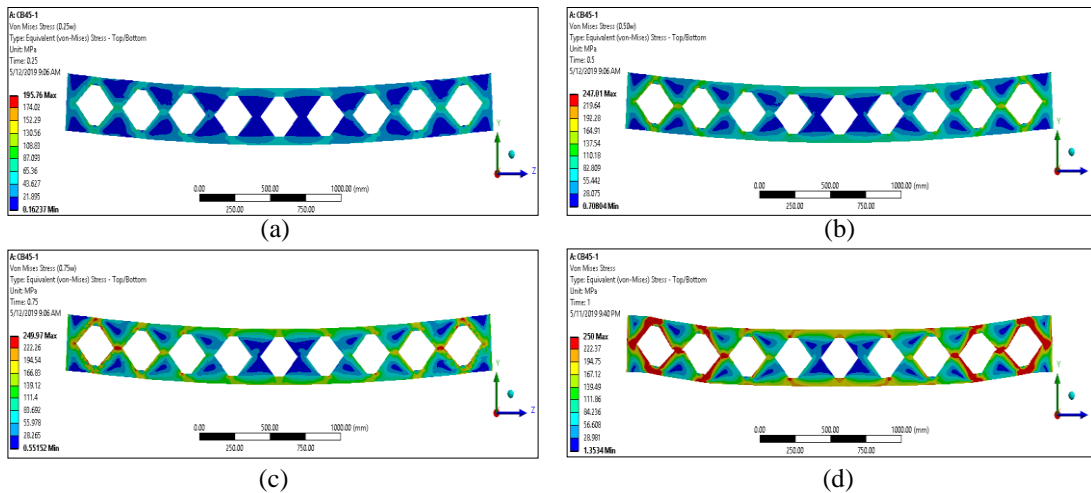
Distribusi Tegangan Von Mises

Prosedur desain AISC dapat memprediksi lokasi tegangan maksimum dengan akurat. Sebagai contoh, CB45-1 diprediksi mengalami kegagalan pada web utuh yang disebabkan oleh gaya geser horizontal (Tabel 3) berdasarkan prosedur

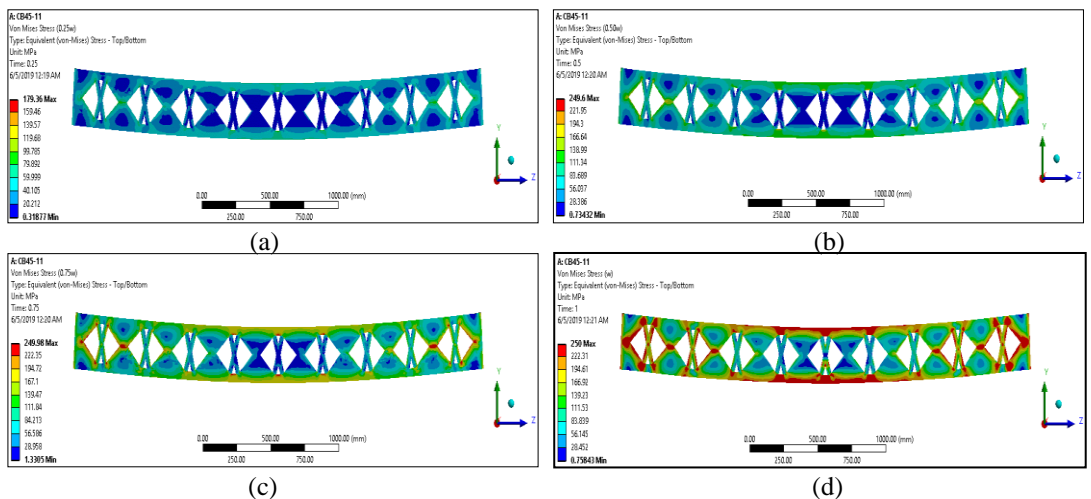
desain tersebut. Prediksi tersebut terverifikasi melalui hasil numerik yang menunjukkan konsentrasi tegangan tidak hanya terjadi pada sudut bukaan tetapi juga pada web utuh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7(d)

Tabel 6. Hasil analisis numerik balok kastela dengan pengaku diagonal (lanjutan)

Set	Model	K_{sti} (kN/m/m)	w_{stmax} (kN/m)	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	μ_{st}	Rasio		
							Kekakuan Awal	Kekuatan	Daktilitas
	CB60-1	5,90	56,16	6,96	15,08	2,17	-	-	-
	CB60-2	6,27	59,71	7,91	10,77	1,36	1,06	1,06	0,63
	CB60-3	6,36	62,57	8,19	11,27	1,38	1,08	1,11	0,63
	CB60-4	6,40	63,25	8,18	11,01	1,35	1,08	1,13	0,62
	CB60-5	6,50	65,28	8,32	11,38	1,37	1,10	1,16	0,63
4	CB60-6	6,52	65,78	9,51	12,39	1,30	1,10	1,17	0,60
	CB60-7	6,63	65,78	9,28	11,37	1,22	1,12	1,17	0,57
	CB60-8	6,63	66,28	9,32	14,54	1,56	1,12	1,18	0,72
	CB60-9	6,74	66,66	9,20	17,11	1,86	1,14	1,19	0,86
	CB60-10	6,74	66,86	9,22	14,23	1,54	1,14	1,19	0,71
	CB60-11	6,85	67,53	9,15	17,16	1,88	1,16	1,20	0,87
	CB60-12	5,55	46,59	5,28	11,92	2,26	-	-	-
	CB60-13	6,35	57,28	8,11	15,87	1,96	1,14	1,23	0,87
	CB60-14	6,33	60,20	6,98	12,52	1,79	1,14	1,29	0,79
	CB60-15	6,37	60,53	6,92	11,94	1,73	1,15	1,30	0,76
	CB60-16	6,51	65,41	8,51	13,44	1,58	1,17	1,40	0,70
5	CB60-17	6,51	63,07	7,00	11,08	1,58	1,17	1,35	0,70
	CB60-18	6,65	65,78	8,21	11,33	1,38	1,20	1,41	0,61
	CB60-19	6,62	65,78	8,24	11,25	1,37	1,19	1,41	0,60
	CB60-20	6,76	66,28	9,17	12,93	1,41	1,22	1,42	0,62
	CB60-21	6,73	66,28	9,75	11,58	1,19	1,21	1,42	0,53
	CB60-22	6,87	67,01	10,23	17,97	1,76	1,24	1,44	0,78
	CB60-23	5,51	42,19	4,02	11,67	2,90	-	-	-
	CB60-24	6,32	57,00	5,70	15,87	2,79	1,15	1,35	0,96
	CB60-25	6,48	61,16	5,92	15,20	2,57	1,18	1,45	0,88
	CB60-26	6,51	60,78	5,82	12,68	2,18	1,18	1,44	0,75
	CB60-27	6,66	65,78	7,23	13,47	1,86	1,21	1,56	0,64
6	CB60-28	6,65	65,78	7,24	13,33	1,84	1,21	1,56	0,63
	CB60-29	6,79	66,20	8,10	12,71	1,57	1,23	1,57	0,54
	CB60-30	6,76	65,78	8,15	11,20	1,37	1,23	1,56	0,47
	CB60-31	6,89	66,28	7,92	10,95	1,38	1,25	1,57	0,48
	CB60-32	6,85	66,51	9,17	12,79	1,39	1,24	1,58	0,48
	CB60-33	6,98	66,51	8,83	10,69	1,21	1,27	1,58	0,42



Gambar 7. Distribusi tegangan Von Mises model CB45-1 pada kondisi pembebanan: (a) 25% w_{max} , (b) 50% w_{max} , (c) 75% w_{max} , (d) 100% w_{max} dengan $w_{max} = 50,43$ kN/m



Gambar 8. Distribusi tegangan Von Mises model CB45-11 pada kondisi pembebanan: (a) 25% w_{max} , (b) 50% w_{max} , (c) 75% w_{max} , (d) 100% w_{max} dengan $w_{max} = 66,72$ kN/m

Berdasarkan hasil analisis nonlinear, penyebaran tegangan Von Mises dipelajari pada beberapa tingkat pembebanan. Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan penyebaran tegangan Von Mises model CB45-1 dan CB45-11 pada kondisi pembebanan 25%, 50%, 75%, dan 100% beban maksimum (w_{max}). Kedua gambar tersebut menunjukkan penyebaran tegangan dimulai dari sudut bukaan pertama dari ujung tumpuan.

Penggunaan pengaku diagonal efektif dalam mendistribusikan konsentrasi tegangan. Pada balok kastela tanpa pengaku diagonal, kelelahan jelas terjadi hanya pada zona geser maksimum (Gambar 7) sedangkan pada balok kastela dengan pengaku diagonal, kelelahan tersebar secara seragam pada zona geser dan lentur maksimum (Gambar 8). Hasil pengamatan

menunjukkan apabila dimensi pengaku diagonal semakin besar, maka penyebaran tegangan semakin seragam pada kedua zona tersebut.

SIMPULAN

Perilaku nonlinear dan redistribusi tegangan pada balok kastela tanpa dan dengan pengaku diagonal telah dianalisis secara numerik dengan metode elemen hingga. Berdasarkan hasil studi ini dapat disimpulkan bahwa prosedur desain AISC dapat memprediksi lokasi tegangan maksimum dengan akurat dan menghasilkan kekuatan ultimit balok yang lebih konservatif dibandingkan dengan hasil numerik. Pada balok kastela tanpa pengaku diagonal, model yang optimum adalah model CB60-1 dengan beban terbagi rata maksimum $w_{nstrmax} = 56,16$ kN/m dan CB45-1

dengan daktilitas $\mu_{nst} = 3,06$ dengan rata-rata kekakuan awal sebesar 5,78 kN/m. Pada studi ini, momen inersia penampang neto pada perhitungan lendutan balok kastela harus direduksi dengan rentang 22%–29%. Selain itu, semua kegagalan balok tanpa pengaku diagonal umumnya disebabkan oleh gaya geser. Pada balok kastela dengan pengaku diagonal, model yang optimum adalah CB45-33 dengan kekakuan awal $K_{sti} = 6,99$ kN/m/m, CB60-11 dengan beban terbagi rata maksimum $w_{stmax} = 67,53$ kN/m, dan CB60-24 dengan daktilitas $\mu_{st} = 2,79$. Jadi, penggunaan pengaku diagonal pada balok kastela efektif dalam meningkatkan kekakuan awal dan kekuatan balok, tetapi mengurangi daktilitas struktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan atas fasilitas perangkat lunak ANSYS Workbench.

DAFTAR PUSTAKA

- AISC. 2016. *Steel Design Guide 31 - Castellated and Cellular Beam Design*. Chicago.
- Anupriya, B. dan Jagadeesan, K. 2014. *Shear Strength of Castellated Beam With and Without Stiffener Using FEA (ANSYS 14)*. *International Journal of Engineering and Technology*, 6(4), p. 1970-1981.
- Budi, L., Sukamta, dan Partono, W. 2017. *Optimization Analysis of Size and Distance of Hexagonal Hole in Castellated Steel Beams*. *Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) 2016*, 171, p. 1092-1099.
- Kerdal D. dan Nethercot D A. 1984. *Failure Modes For Castellated Beams*. *J Constr Steel Res* 1984, 4, p. 295-315.
- Frans, R., Parung, H., Sandy, D., dan Tonapa, S. 2017. *Numerical Modelling of Hexagonal Castellated Beam Under Monotonic Loading*. *Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) 2016*, 171, p. 781-788.
- Girija, K., Narayanan, Sriraman, K., dan Anupriya, B. 2018. *Strength Study of Stiffeners on Castellated Beam for Circular and Hexagonal Opening Using*

- ANSYS. *National Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 3(2), p. 01-06.
- Nair, G. S. dan Pillai, P.R.S. 2018. *Castellated Beam with Diagonal Stiffeners Along Hexagonal Cuts*. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(6), p. 2879-2883.
- Sandy, D., Limbong, H.R., Runtulalo, D., dan Rante, H. 2014. *Experimental Study on Castellated Beams with Hexagonal Variation Using Monotonic Loading*. *International Journal of Engineering and Science Applications*, 1, p. 67-75.
- Soltani, M.R., Bouchair, A., dan Mimoune, M. 2012. *Nonlinear FE Analysis of The Ultimate Behaviour of Steel Castellated Beams*. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, p. 101-114.