

STUDI TEKUK TORSI LATERAL BALOK KASTELA BENTANG PANJANG DENGAN ANALISIS KERUNTUHAN

Sandhi Kwani^{1*}, Paulus Karta Wijaya²

¹Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan

²Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan

ABSTRAK

Pada kasus balok bentang panjang, kasus instabilitas yang banyak terjadi adalah tekuk torsi lateral. Pada fenomena ini, ketika balok menerima momen lentur pada sumbu kuat, maka pada suatu nilai momen lentur tertentu, balok akan mengalami peralihan lateral secara progresif. Nilai batasan momen lentur tersebut adalah momen kritis. Pada penelitian ini dibahas mengenai tekuk torsi lateral balok kastela jenis honeycomb bentang panjang yang memiliki ketidaksempurnaan geometri. Bentuk ketidaksempurnaan geometri mengikuti ragam tekuk pertama dan besarnya ketidaksempurnaan geometri diambil sebesar 1/1500 dari panjang bentang balok tak tertumpu berupa simpangan pada arah lateral pada pusat geser di tengah bentang balok. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah panjang bentang balok, dan material balok yaitu elastoplastis tanpa tegangan sisa, dan elastoplastis dengan tegangan sisa. Metode yang digunakan adalah analisis keruntuhan dengan metode elemen hingga yang dilakukan dengan perangkat lunak ADINA 8.9. Untuk balok yang ditinjau pada studi ini, besarnya momen kritis yang terjadi mengalami reduksi mencapai 24.31% untuk pemodelan dengan tegangan sisa, serta 17.52% untuk pemodelan tanpa tegangan sisa. Untuk postbuckling yang terjadi pada balok menunjukkan karakteristik yang sama untuk material elastoplastis tanpa tegangan sisa maupun elastoplastis dengan tegangan sisa.

Kata kunci: Tekuk Torsi Lateral, Balok Kastela Bentang Panjang, Ketidaksempurnaan Geometri, Analisis Keruntuhan

1 PENDAHULUAN

Penggunaan balok kastela dalam dunia konstruksi baja saat ini semakin sering dijumpai. Balok kastela memiliki keunggulan yaitu profil yang lebih ringan jika dibandingkan dengan profil IWF, serta memiliki momen inersia sumbu kuat yang lebih besar yang disebabkan penambahan tinggi dari profil baja kastela ini. Balok kastela terdiri dari beberapa jenis yaitu honeycomb dan cellform. Dalam dunia konstruksi baja, balok kastela banyak digunakan pada bentang yang panjang.



Gambar 1. Balok Kastela Jenis Honeycomb (www.gunungsteel.com)

Pada kondisi aktualnya, tidak ada struktur yang sempurna. Dalam proses fabrikasi baja, sangat

lah dimungkinkan terjadinya ketidaksempurnaan geometri. Ketidaksempurnaan geometri pada struktur akan menyebabkan instabilitas pada struktur saat dibebani. Jika ketidaksempurnaan geometri terjadi di sumbu tegak lurus bidang, maka kasus instabilitas yang terjadi ini dinamakan sebagai tekuk torsi lateral (*lateral torsional buckling*).

Penelitian mengenai balok kastela telah dilakukan oleh banyak peneliti dan telah mengalami perkembangan. Showkati melakukan penelitian tekuk torsi lateral pada balok kastela dengan judul penelitian *Lateral Torsional Buckling of Castellated Beams*[6]. Pada penelitian ini, H. Showkati meneliti balok kastela dengan menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan teori bifurkasi. Dari hasil penelitian ini, H. Showkati mengajukan suatu nilai koefisien C_b (*bending coefficient*), dan faktor modifikasi C_c (*castellated coefficient*) untuk balok kastela, dimana besarnya C_b adalah $0,503 \left(\frac{L_b}{h}\right)^{0.18}$, dan besarnya C_c adalah 1,056 untuk profil tipe CPE.

H.R. Kazemi Nia Korrani dan M.Z. Kabir, serta S. Molanaei, 2010 meneliti tekuk torsi lateral balok kastela dengan menggunakan pemodelan elemen hingga dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS versi 10.0 untuk analisis tekuk torsi lateral balok

*Corresponding author. e-mail:sandhikwani92@gmail.com

kastela dan mempelajari pengaruh dari kelangsingan pada faktor moment-gradient pada balok kastela dengan tumpuan sederhana. Jenis analisis yang digunakan adalah analisis tekuk elastis [4].

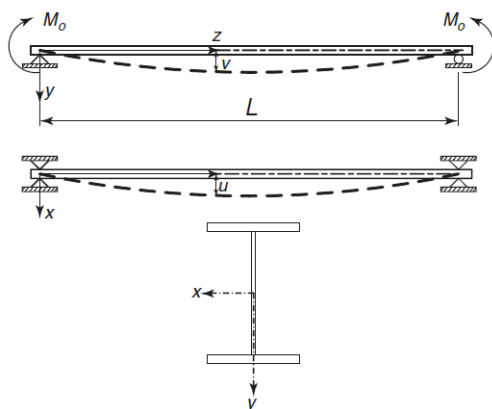
M.R. Wakchaure dan A.V. Sagade melakukan penelitian mengenai efek lubang pada balok kastela [7], [8]. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui efek dari lubang pada web pada balok kastela terhadap defleksi, dan ragam kegagalan yang terjadi. Dari hasil analisis dengan metode elemen hingga, dapat disimpulkan bahwa balok kastela mencapai kondisi paling efisien dalam memenuhi kondisi layan pada saat bukaan pada web sebesar 60% tinggi balok.

Mohsen Gemari, Hamid Saberi, Vahid Saberi, dan Ashkan Firouzi telah melakukan penelitian mengenai balok kastela yang membahas mengenai efek panjang balok tanpa pengaku dan balok dengan pengaku terhadap moment rotasi yang terjadi [3].

Pada studi ini, akan dibahas mengenai perilaku balok kastela jenis *honeycomb* dengan bentang panjang. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah panjang bentang balok, dan material balok yaitu elastoplastis tanpa tegangan sisa, dan elastoplastis dengan tegangan sisa. Metode yang digunakan adalah analisis keruntuhan dengan metode elemen hingga yang dilakukan dengan perangkat lunak ADINA 8.9. Pada penelitian ini, akan ditinjau perilaku balok kastela dari segi hubungan beban dan deformasi lateral, serta besar momen kritis yang terjadi.

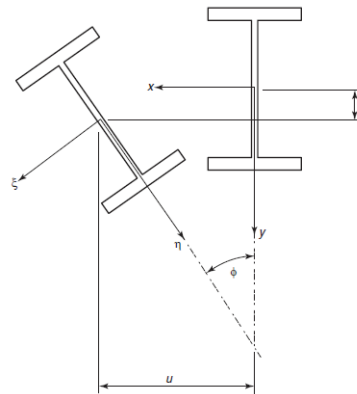
2 TEKUK TORSI LATERAL

Tekuk torsi lateral adalah salah satu batasan dalam mendesain balok baja, dan merupakan jenis kegagalan pada balok yang diakibatkan oleh kurangnya tumpuan lateral pada struktur. Pada fenomena ini, ketika balok menerima momen lentur pada sumbu kuat, maka pada suatu nilai momen lentur tertentu, balok akan mengalami peralihan tegak lurus bidang. Besarnya nilai dari momen lentur disebut dengan momen kritis.



Gambar 2. Kasus Tekuk Torsi Lateral [2]

Pada Gambar 2 terlihat proses terjadinya tekuk torsi lateral pada balok IWF akibat momen lentur yang diterima. Pada Gambar 2, terlihat bahwa balok mengalami momen lentur di ujung-ujung balok sebesar M_o yang bekerja di sumbu x . Momen M_o ini mengakibatkan peralihan di arah sumbu y sebesar v . Balok ini akan terus mengalami peralihan yang terus meningkat seiring dengan peningkatan nilai M_o . Peralihan ini terjadi pada bidang y, z , juga disertai dengan adanya puntir, hingga nilai momen kritis M_{ocr} tercapai. Nilai momen ini menggambarkan kondisi dimana momen maksimum tercapai, yaitu pada kondisi keseimbangan terjadi antara konfigurasi tekuk dan tak tertekuk. Balok akan mengalami peralihan lateral u dengan besarnya sudut puntir ϕ seperti yang terlihat pada Gambar 3. Karena ragam tekuk mencakup peralihan lateral dan sudut puntir, maka kondisi ketidakstabilan ini dinamakan sebagai tekuk torsi lateral.



Gambar 3. Penampang Balok Setelah Mengalami Tekuk [2]

Tekuk torsi lateral terbagi menjadi tekuk torsi lateral inelastis dan tekuk torsi lateral elastis. Tekuk torsi lateral inelastis terjadi jika saat momen kritis pada balok tercapai, besarnya tegangan yang terjadi pada balok berada di atas nilai tegangan leleh balok. Sedangkan jika tegangan yang terjadi pada balok berada di bawah tegangan leleh saat momen kritis tercapai, maka fenomena ini dapat dikatakan sebagai tekuk torsi lateral elastis. Spesifikasi AISC telah memberikan batasan untuk mengklasifikasikan jenis tekuk berdasarkan jarak antar tumpuan lateralnya, yaitu tekuk torsi lateral inelastik terjadi jika $L_p < L_b < L_r$, dan tekuk torsi lateral elastik, terjadi jika $L_b > L_r$. Jika panjang balok tidak tertumpu (L_b) lebih kecil dari L_p , maka balok tersebut tidak akan mengalami tekuk torsi lateral. Besarnya nilai L_p dan L_r dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [1]:

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (1)$$

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7F_y}$$

$$\sqrt{\frac{J_c}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_0}\right)^2 + 6,76\left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (2)$$

Dimana L_p adalah jarak antar dua tumpuan lateral agar tidak terjadi tekuk torsi lateral, E adalah modulus elastisitas material, F_y adalah tegangan leleh material, r_{ts} adalah radius girasi efektif, r_y adalah radius girasi penampang terhadap sumbu lemah y , J adalah konstanta torsi, h_0 adalah jarak antar pusat berat flens. Sedangkan untuk menghitung besarnya momen kritis balok yang mengalami tekuk torsi lateral elastis, AISC 2010 [1] telah merumuskan persamaan sebagai berikut :

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{E I_y G J + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y C_w} \quad (3)$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_1 + 4 M_2 + 3 M_3} \quad (4)$$

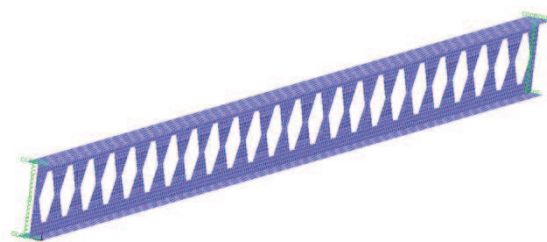
Dimana M_{cr} adalah momen kritis balok, C_b adalah faktor modifikasi untuk momen tidak seragam, I_y adalah momen inersia terhadap sumbu y , G adalah modulus geser penampang, M_1 adalah momen lentur pada seperempat bentang balok, M_2 adalah momen lentur pada setengah bentang balok, M_3 adalah momen lentur pada tiga per empat bentang balok, dan M_{max} adalah momen lentur maksimum pada balok.

3 PEMODELAN ELEMEN HINGGA

Pemodelan elemen hingga dilakukan dengan menggunakan alat bantu ADINA 8.9, dimana analisis dilakukan dengan menggunakan analisis keruntuhan (*collapse analysis*) dengan metode elemen hingga. Karena analisis dilakukan hingga balok mengalami keruntuhan, maka teori deformasi yang digunakan adalah teori deformasi besar (*large deformation*). Analisis keruntuhan pada ADINA 8.9 ini diawali dengan analisis tekuk linier dengan menggunakan analisis nilai eigen (*eigen analysis*). Hasil ragam tekuk pertama (*first buckling mode*) dari analisis tekuk linier ini, yaitu bentuk dari tekuk yang terjadi digunakan sebagai bentuk dari ketidaksempurnaan geometri balok yang kemudian digunakan untuk melakukan analisis keruntuhan. Pada analisis keruntuhan ini dimasukkan besarnya nilai ketidaksempurnaan geometri. Dalam studi ini, besarnya nilai ketidaksempurnaan

yang diambil adalah $L_b/1500$ pada tengah bentang di pusat geser dari profil balok, dengan arah tegak lurus bidang. Besarnya ketidaksempurnaan sebesar $L_b/1500$ ini diambil berdasarkan ketidaksempurnaan awal (*initial out of straightness*) yang diijinkan yang memenuhi persamaan SSRC ([5], hal. 273). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah elastoplastis tanpa tegangan sisa, dan elastoplastis dengan tegangan sisa. Profil balok yang digunakan dalam studi ini adalah HC 450x150x6,5x9 dengan beberapa jenis bentang seperti terlampir pada Tabel 1. Karena jenis tekuk torsi yang ditinjau adalah tekuk torsi lateral elastis, maka panjang bentang yang diambil lebih besar dari nilai L_r . Untuk profil IWF 450x150x6,5x9, besarnya nilai L_r adalah 4334 mm, sehingga bentang balok terkecil yang dianalisis diambil sebesar 5346,65 mm. Untuk analisis yang dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan ADINA 8.9, pengambilan bentang dilakukan berdasarkan lubang pada balok kastela.

Jenis struktur yang ditinjau pada studi ini adalah balok diatas dua perletakan sederhana, dimana pada kedua ujungnya, rotasi puntir ditahan namun *warping* dapat terjadi. Dalam pemodelannya di perangkat lunak ADINA 8.9, hal ini dilakukan dengan memberikan perletakan yaitu translasi arah sumbu y dan z ditahan, namun arah sumbu x tidak ditahan pada seluruh nodal di kedua ujung balok, kecuali pada titik di pusat penampang salah satu ujung balok diberikan perletakan berupa translasi arah sumbu x , y , dan z ditahan. Pemodelan yang dilakukan pada balok adalah pembebanan merata pada lokasi pusat geser balok, yang dilakukan dengan memberikan beban terpusat per panjang tributari balok.



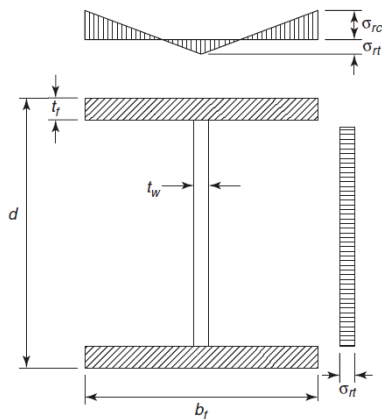
Gambar 4. Pemodelan Balok Kastela pada ADINA.

Tabel 1. Balok yang Dianalisis

No.	Profil	Bentang (mm)	Besarnya Ketidaksempurnaan Geometri (mm)
1	HC 450x150x6.5x9	5346.65	3.56
2	HC 450x150x6.5x9	6664.25	4.44
3	HC 450x150x6.5x9	7981.85	5.32
4	HC 450x150x6.5x9	9299.45	6.19
5	HC 450x150x6.5x9	10617.05	7.08
6	HC 450x150x6.5x9	11934.65	7.96

Pada pemodelan balok kastela, distribusi tegangan sisa pada flens diasumsikan bervariasi secara linear, dari ujung flens yang bernilai tekan σ_{rc} hingga tegangan sisa yang bersifat tarik σ_{rt} pada daerah pertemuan antara flens dan web. Sedangkan pada web, tegangan sisa diasumsikan merata dan bersifat tarik (σ_{rt}). Distribusi tegangan sisa ini tergambar pada Gambar 5. Nilai tegangan sisa tekan diasumsikan sebesar 30% dari nilai F_y , atau 30% dari nilai tegangan leleh, dan tegangan sisa yang bersifat tarik dirumuskan sebagai berikut [2]:

$$\sigma_{rt} = \frac{\sigma_{rc}}{1 + \frac{d \cdot t_w}{b_f \cdot t_f} \left(1 - \frac{2t_f}{d}\right)} \tag{5}$$



Gambar 5. Distribusi Tegangan Sisa pada Profil IWF [2].

Tegangan sisa dimodelkan dengan cara menggunakan material yang berbeda pada tiap bagian penampang balok. Asumsi yang digunakan dalam penentuan besarnya tegangan leleh yang terjadi adalah sebagai berikut :

1. Beban yang digunakan dalam studi ini adalah beban merata, sehingga momen yang terjadi adalah momen positif, dimana seluruh serat di atas centroid akan mengalami tekan, dan seluruh serat di bawah centroid akan mengalami tarik.
2. Tegangan sisa yang sejenis (dapat berupa tarik atau tekan) akan mengurangi besarnya nilai tegangan leleh pada penampang.
3. Tegangan sisa yang berlawanan (dapat berupa tekan maupun tarik) akan menambah besarnya nilai tegangan leleh pada penampang.

Dengan distribusi dan asumsi di atas, maka distribusi tegangan leleh pada pemodelan struktur dapat terlihat pada Gambar 6 dengan besarnya nilai tegangan leleh pada Tabel 2:

1	2	3	3	2	1
		3			
		4			
6	5	4	4	5	6

Gambar 6. Distribusi Tegangan Leleh pada Pemodelan Elemen Hingga.

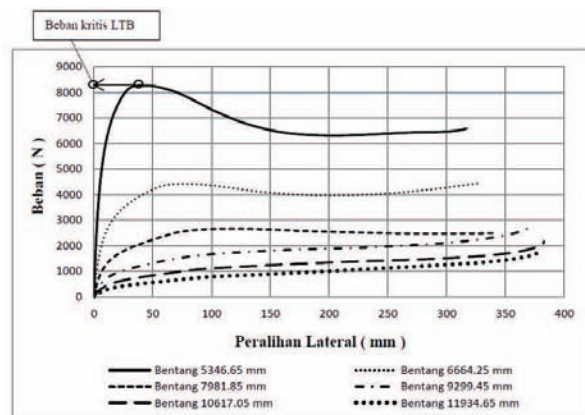
Tabel 2. Tabel Nilai Tegangan Leleh yang Digunakan dalam Pemodelan

No.	Tegangan Leleh (MPa)
1	175
2	224,68
3	274,35
4	225,65
5	275,32
6	325

4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Dari pemodelan balok kastela yang telah dilakukan, maka dilakukan analisis keruntuhan (*collapse analysis*) dan diperoleh besarnya beban kritis yang dapat dipikul oleh balok tersebut. Dengan adanya besar nilai beban kritis, maka dapat diketahui besarnya momen kritis dari balok kastela tersebut, karena kegagalan awal yang terjadi adalah tekuk torsi lateral. Beban kritis adalah beban maksimum pada kurva beban - defleksi.

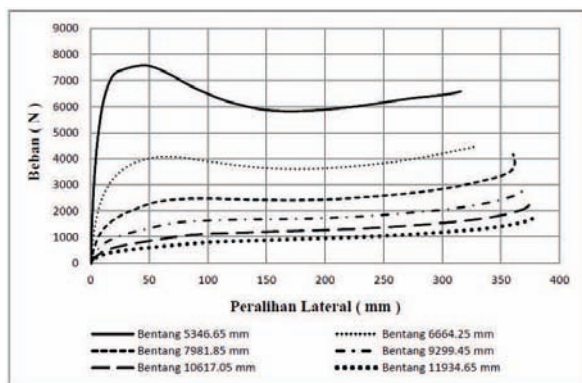
Dari analisis keruntuhan menggunakan ADINA 8.9, maka diperoleh grafik hubungan antara beban dan peralihan lateral sebagai berikut:



Gambar 7. Grafik Hubungan Beban dan Peralihan Lateral pada Balok Kastela untuk Material Elastoplastis Tanpa Tegangan Sisa.

Tabel 3. Perbandingan Momen Kritis AISC dan Analisis Keruntuhan.

No.	Bentang (mm)	AISC	Momen Kritis (kNm)			
			Elastoplastis (Tanpa Tegangan Sisa)		Elastoplastis (Dengan Tegangan Sisa)	
			Collapse Analysis	% beda	Collapse Analysis	% beda
1	5346,65	108,6606	89,6262	17,5172	82,2495	24,3059
2	6664,25	76,1631	74,3743	2,3486	68,7789	9,6951
3	7981,85	57,9477	64,3095	-10,9785	59,9819	-3,5104
4	9299,45	46,5580	-	-	-	-
5	10617,05	38,8589	-	-	-	-
6	11934,65	33,3431	-	-	-	-



Gambar 8. Grafik Hubungan Beban dan Peralihan Lateral pada Balok Kastela untuk Material Elastoplastis Dengan Tegangan Sisa.

Dari grafik di atas, terlihat karakteristik *post-buckling* yang berbeda. Pada bentang 5346,65 mm; 6664,25 mm; 7981,85 mm terlihat bahwa balok langsung mengalami keruntuhan. Peralihan lateral yang terjadi terus bertambah walaupun beban pada balok terus mengalami penurunan. Hal ini disebabkan beban yang menyebabkan tekuk torsi lateral tinggi, sehingga penampang balok sudah mengalami kelelahan. Pada kondisi ini, tegangan yang terjadi sudah melebihi $0,7 F_y$ pada sisi terluar dari flens atas. Sedangkan pada balok dengan bentang yang lebih panjang yaitu pada bentang 9299,45 mm; 10617,05 mm; 11934,65 mm; pada saat *postbuckling*, balok masih dapat menerima beban meskipun sudah mengalami tekuk torsi lateral. Pada kondisi ini, seiring dengan penambahan beban yang diterima balok, besarnya deformasi lateral yang terjadi juga semakin besar. Hal ini dikarenakan besarnya beban kritis yang menyebabkan tekuk torsi lateral masih rendah, sehingga penampang balok belum mengalami kelelahan, dan balok masih dapat terus menerima beban yang diberikan.

Perbedaan material yang digunakan yang digunakan dalam analisis yaitu elastoplastis dengan tegangan sisa dan elastoplastis tanpa tegangan sisa memberikan karakteristik *postbuckling* yang tidak berbeda. Perbedaan terletak pada besarnya beban maksimum yang bisa ditahan dan besarnya deformasi

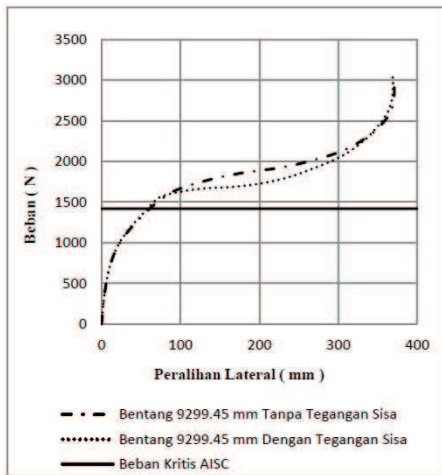
lateral pada saat balok terbebani oleh beban maksimum tersebut. Material elastoplastis dengan tegangan sisa memberikan hasil beban maksimum yang lebih rendah dikarenakan kelelahan yang terjadi terlebih dahulu pada penampang balok, yaitu di daerah dengan tegangan $0,7 F_y$.

Untuk menentukan besarnya momen kritis yang terjadi berdasarkan analisis keruntuhan maka diperlukan besarnya beban maksimum yang dapat dipikul oleh balok. Beban maksimum ini merupakan beban kritis yang menyebabkan terjadinya tekuk torsi lateral pada balok. Contoh penentuan beban kritis tersebut dapat terlihat pada Gambar 7. Untuk bentang 5346,55mm diperoleh besarnya beban kritis berdasarkan ADINA 8.9 adalah 8262 Newton. Dari beban kritis ini, kemudian dikonversi menjadi momen kritis yang dilakukan dengan perhitungan analisis struktur sederhana. Berikut adalah tabel 4 nilai momen kritis balok kastela dari hasil perhitungan AISC, dan analisis keruntuhan menggunakan ADINA 8.9.

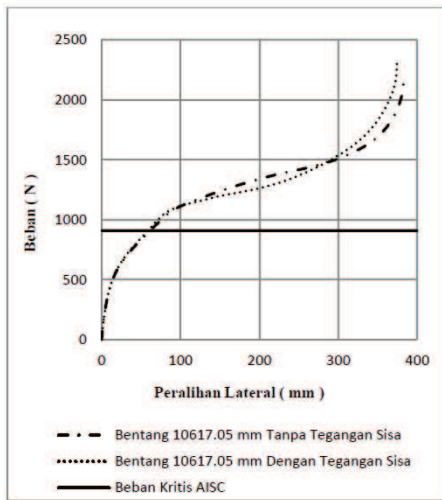
Pemodelan struktur dengan material elastoplastis menggunakan tegangan sisa akan menghasilkan nilai momen kritis yang lebih kecil. Hal ini disebabkan kelelahan yang lebih awal terjadi pada ujung-ujung flens. Pada bagian tersebut, besarnya tegangan pada profil tereduksi oleh adanya tegangan sisa yang terjadi akibat proses fabrikasi. Sehingga analisis yang dilakukan akan menghasilkan nilai momen kritis yang lebih konservatif dibanding dengan analisis dengan material elastoplastis tanpa tegangan sisa. Untuk bentang 9299,45 mm; 10617,05 mm; 11934,65 mm; karena kurva tidak menunjukkan besarnya beban kritis tekuk torsi lateral, maka dilakukan pengecekan kondisi struktur saat dibebani oleh beban yang menyebabkan tekuk torsi lateral berdasarkan persamaan AISC. Dari hasil analisis struktur, diperoleh besarnya beban kritis sebagai berikut :

Tabel 4. Tabel Nilai Beban Kritis Berdasarkan Persamaan AISC.

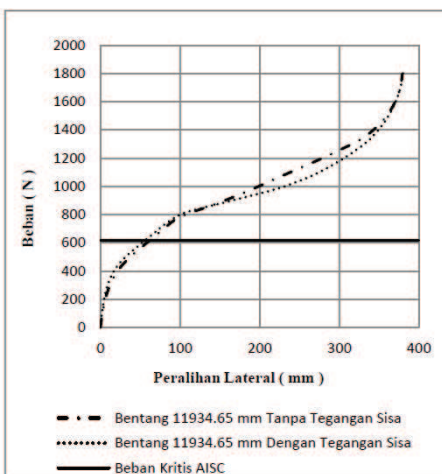
No.	Bentang (mm)	Beban Kritis (N)
1	9299,45	1418,71
2	10617,05	908,44
3	11934,65	616,87



Gambar 9. Grafik Perbandingan AISC dan Analisis Keruntuhan untuk Bentang 9299,45 mm.



Gambar 10. Grafik Perbandingan AISC dan Analisis Keruntuhan untuk Bentang 10617,05 mm.



Gambar 11. Grafik Perbandingan AISC dan Analisis Keruntuhan untuk Bentang 11934,65 mm.

Dari grafik di atas, terlihat untuk ketiga bentang tersebut, kurva antara hasil analisis keruntuhan dan

AISC asimtotis, hingga akhirnya kedua kurva berpotongan, dan nilai dari analisis keruntuhan lebih besar daripada AISC. Sehingga dapat dikatakan bahwa momen kritis antara analisis keruntuhan dan momen kritis berdasarkan persamaan AISC adalah sama, untuk bentang yang semakin panjang.

5 KESIMPULAN

Dari studi ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pemodelan struktur dengan material elastoplastis menggunakan tegangan sisa akan menghasilkan momen kritis yang lebih kecil dibandingkan elastoplastis tanpa tegangan sisa. Hal ini terlihat dari nilai momen kritis pada Tabel 3.
2. Material elastoplastis dengan tegangan sisa dan tanpa tegangan sisa yang digunakan pada pemodelan menunjukkan satu karakteristik *postbuckling* yang sama. Perbedaan hanya terjadi pada besarnya beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok.
3. Untuk bentang balok yang semakin panjang, maka karakteristik *postbuckling* menunjukkan balok masih dapat menerima beban walaupun sudah terjadi tekuk torsi lateral pada balok. Berbeda dengan balok dengan bentang yang lebih pendek yang mengalami keruntuhan pada kondisi *postbuckling*.
4. Dari hasil studi ini, diperoleh hasil bahwa untuk tekuk torsi lateral elastis balok kastela HC 450x150x6,5x9 yang dimodelkan dengan tegangan sisa memberikan hasil perbedaan maksimum nilai momen kritis sebesar 24,31%, dan semakin panjang bentang balok kastela, nilai momen kritis semakin mendekati nilai momen kritis yang dihitung berdasarkan persamaan AISC untuk balok IWF dengan dimensi yang sama.
5. Dari hasil studi ini, diperoleh hasil bahwa untuk tekuk torsi lateral elastis balok kastela HC 450x150x6,5x9 yang dimodelkan tanpa tegangan sisa memberikan hasil perbedaan maksimum nilai momen kritis sebesar 17,52%, dan semakin panjang bentang balok kastela, nilai momen kritis semakin mendekati nilai momen kritis yang dihitung berdasarkan persamaan AISC untuk balok IWF dengan dimensi yang sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan penulis kepada Universitas Katolik Parahyangan yang telah mengizinkan penulis menggunakan ADINA 8.9 yang dimiliki lisensinya.

REFERENSI

- [1] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Specification for Structural Steel Buildings. AISC 360-10*, 2010.
- [2] GALAMBOS, T. V., AND SUROVEK, A. *Structural Stability of Steel*. John Willey & Sons, 2008.
- [3] GERAMI, M., HAMID, S., AND SABERI, V. Effect of beam length and braced length on moment rotation behavior of castellated beams. *Open Journal of Safety Science and Technology*. (2013).
- [4] KORRANI, K., AND KABIR, M. *Lateral Torsional Buckling of Castellated Beams Under End Moments*. Amirkabir University of Technology, 2010.
- [5] SALMON, C. G. *Steel Structures-Design and Behavior*, fifth edition ed. Pearson Prentice Hall, 2009.
- [6] SHOWKATI. Lateral torsional buckling of castellated beam. *Iranian Journal of Science and Technology*. 32, B2 (2007), 153–156.
- [7] WAKCHAURE, M., AND SAGADE, A. Finite element analysis of castellated steel beams. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. (2012).
- [8] WAKCHAURE, M., AND SAGADE, A. *Parametric Study of Castellated Beam With Varying Depth of Web Opening*. Amrutvahini College of Engineering : India, 2012.