

ANALISIS KAPASITAS LENTUR BALOK BAJA DENGAN VARIASI PANJANG BENTANG

NIDIASARI¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Kota Padang, Sumatera Barat (nidia@eng.unand.ac.id)

*Corresponding Author: nidia@eng.unand.ac.id

Naskah diterima: 25 Februari 2026. Disetujui : 2 April 2026. Diterbitkan : 30 Juni 2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh panjang bentang terhadap kapasitas lentur balok baja profil WF. Variasi panjang bentang dianalisis berdasarkan batas panjang tak terkekang menurut AISC 360, yaitu bentang pendek, menengah, dan panjang. Metode yang digunakan adalah analisis numerik dengan menghitung kapasitas lentur nominal (M_n) pada berbagai variasi panjang bentang menggunakan profil WF 150×75. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas lentur maksimum terjadi pada bentang pendek, kemudian mengalami penurunan pada bentang menengah, dan menurun secara signifikan pada bentang panjang akibat tekuk lateral. Rasio kapasitas beban ultimit terhadap kapasitas beban analitis pada bentang pendek adalah 0.83 dan 1.12, bentang menengah 1.27 dan 1.14 serta bentang panjang 1.44 dan 1.7. Secara umum dapat disimpulkan bahwa kapasitas teoritis dan numerik menunjukkan tren yang sama, yaitu mengalami penurunan kapasitas lentur seiring bertambahnya panjang bentang.

Kata kunci : balok baja, panjang bentang, kapasitas lentur, lateral torsional buckling, AISC 360

1. PENDAHULUAN

Balok baja merupakan elemen struktur yang banyak digunakan dalam bidang konstruksi karena memiliki kekuatan tinggi dan efisiensi material (Li dkk., 2023). Dalam perencanaan balok baja, kapasitas lentur umumnya dihitung berdasarkan kekuatan plastis penampang. Namun demikian, kapasitas tersebut tidak selalu tercapai, terutama pada balok dengan bentang panjang akibat fenomena ketidakstabilan berupa *lateral torsional buckling* (LTB). *Lateral-torsional buckling* (LTB) adalah fenomena instabilitas yang ditandai oleh terjadinya puntir bersamaan dengan tekuk lateral, dengan pola deformasi yang tidak seragam di sekitar sumbu lemahnya (Ozbasaran dkk., 2015; Yoo & Lee, 2011).

Menurut AISC 360 (AISC, 2022), kapasitas lentur balok baja sangat dipengaruhi oleh panjang tak terkekang (*unbraced length*, L_b), yang diklasifikasikan menjadi tiga kondisi, yaitu bentang pendek (*fully plastic*), bentang menengah (*inelastic buckling*), dan bentang panjang (*elastic buckling*). Perubahan perilaku ini menyebabkan kapasitas lentur tidak lagi konstan, melainkan menurun seiring bertambahnya panjang bentang (Kolakowski & Jankowski, 2018).

Perilaku *lateral torsional buckling* dipengaruhi oleh berbagai parameter, antara lain panjang bentang tidak terkekang (*unbraced length*), bentuk penampang, kekakuan torsi, kondisi perletakan, distribusi momen, serta sifat material baja (Mascolo dkk., 2018; Ochshorn, 2010). Pada balok dengan panjang tidak terkekang yang pendek, kapasitas lentur umumnya masih dapat mencapai momen plastis penuh karena elemen belum mengalami ketidakstabilan lateral. Namun, seiring bertambahnya panjang bentang, pengaruh LTB menjadi semakin dominan sehingga kapasitas lentur efektif balok mengalami penurunan. Kondisi ini menunjukkan bahwa stabilitas global balok memiliki hubungan yang sangat erat dengan kemampuan elemen dalam menahan momen lentur (Mohammadi dkk., 2016). Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian tentang kontribusi pengaku lateral dan torsional terhadap ketahanan balok terhadap *lateral-torsional buckling* (LTB) mulai dilakukan (Medland, 1980).

Dalam perencanaan struktur baja, pengaruh LTB telah diakomodasi melalui parameter batas panjang seperti L_p dan L_r , yang digunakan untuk menentukan kategori perilaku lentur balok, yaitu daerah plastis, inelastis, dan elastis. Apabila panjang tidak terkekang balok lebih kecil dari L_p , maka kapasitas lentur nominal balok dapat mencapai momen plastis penuh ($M_n = M_p$). Sebaliknya, ketika panjang bentang melebihi batas tersebut, kapasitas lentur akan dipengaruhi oleh fenomena tekuk lateral-torsi sehingga nilai kapasitas nominal menjadi lebih rendah dibanding kapasitas plastis penampang (Galishnikova & Gebre, 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis pengaruh variasi panjang bentang terhadap kapasitas lentur balok baja penampang WF serta mengidentifikasi perubahan perilaku struktur pada masing-masing zona panjang bentang.

2. METODE PENELITIAN

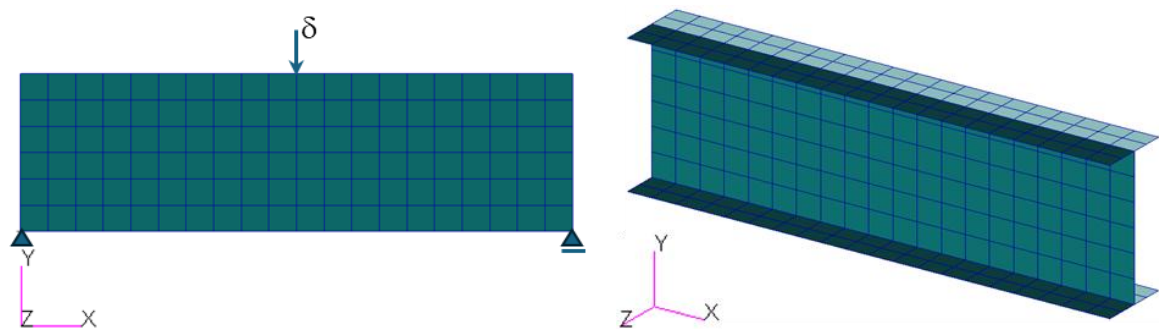
Studi ini menggunakan pendekatan numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis pengaruh panjang bentang terhadap kapasitas lentur balok baja. Metode ini dapat mensimulasikan perilaku struktur termasuk aspek nonlinieritas material dan pengaruh kondisi pembebanan. Model yang digunakan mencakup beberapa variasi panjang bentang. Informasi lengkap mengenai geometri dan parameter model dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Dimensi benda uji

No.	Model	L_b mm	L_p mm	L_r mm	Kategori Bentang
1	SB1	500	843.4	4531	Pendek
2	SB2	750			Pendek
3	IB1	1000			Menengah
4	IB3	3000			Menengah
5	LB1	5000			Panjang
6	LB2	6000			Panjang

Kondisi batas yang dimodelkan pada balok berupa tumpuan sederhana sendi-rol yang diberi beban terpusat di tengah bentang (**Gambar 1**). Sistem koordinat global ditetapkan dengan sumbu-x sebagai arah memanjang balok, sedangkan sumbu-y dan z masing-masing merepresentasikan arah vertikal dan lateral. Pada tumpuan sendi, seluruh perpindahan translasi dibatasi, yaitu $T1(x) = 0$, $T2(y) = 0$, dan $T3(z) = 0$, sementara derajat kebebasan rotasi dibiarkan bebas sehingga tumpuan tidak menahan momen. Pada tumpuan rol, translasi vertikal dan lateral dibatasi melalui kondisi $T2(y) = 0$ dan $T3(z) = 0$, sedangkan perpindahan memanjang $T1(x)$ dibiarkan bebas. Beban terpusat diberikan pada tengah bentang balok dimodelkan sebagai *Rigid Body Element* (RBE) agar distribusi beban pada node di area pembebanan dapat terdistribusi secara merata. Selanjutnya analisis dilakukan menggunakan metode pembebanan statik monotonik dengan kontrol perpindahan, di mana perpindahan vertikal diterapkan secara bertahap hingga struktur mencapai kondisi ultimit. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh respons struktur dari awal pembebanan hingga tahap pasca-leleh (*post-yield behavior*) untuk mengamati perilaku instabilitas balok akibat pengaruh panjang bentang.

Model material yang digunakan adalah model elastis-plastis bilinear dengan nilai modulus elastisitas $E = 2 \times 10^5$ MPa serta nilai $F_y = 240$ MPa. Model bilinear digunakan agar respon balok dapat menggambarkan perilaku elastis dan plastis material.



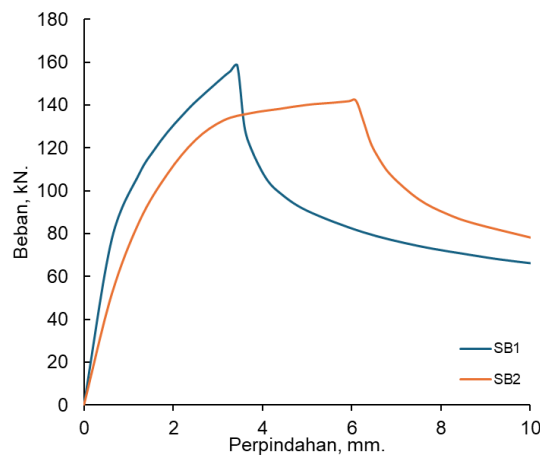
Gambar 1. Model elemen hingga

Kapasitas lentur balok ditentukan berdasarkan properti penampang dan pengaruh panjang bentang tidak terkekang lateral (L_b). Berdasarkan hasil perhitungan properti penampang, diperoleh momen leleh sebesar $M_y = 21.2$ kN.m dan momen plastis sebesar $M_p = 23.8$ kN.m. Nilai ini merupakan batas kapasitas lentur nominal balok (M_n) untuk setiap variasi panjang bentang. Pada balok bentang pendek, kondisi balok memenuhi syarat untuk mencapai kapasitas plastis penuh sehingga kapasitas lentur nominal ditetapkan sebesar $M_n = M_p$. Untuk balok bentang menengah, hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai M_n melebihi M_p , namun sesuai ketentuan desain, kapasitas lentur nominal dibatasi maksimum sebesar M_p . Kondisi ini terjadi pada variasi panjang bentang tidak terkekang $L_b = 1$ m. dan $L_b = 3$ m. Sementara itu, pada balok bentang panjang terjadi penurunan kapasitas lentur akibat pengaruh tekuk lateral-torsional, sehingga kapasitas lentur nominal berkurang menjadi 17,7 kN.m untuk $L_b = 5$ m. dan 14,7 kN.m untuk $L_b = 6$ m. Nilai ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi panjang bentang terhadap perubahan kapasitas lentur balok baja.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyajian kurva beban–perpindahan ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pengaruh perubahan panjang bentang terhadap respon struktur balok, sehingga memudahkan dalam mengidentifikasi kecenderungan penurunan atau peningkatan kapasitas serta perubahan perilaku lentur yang terjadi. Nilai beban ultimit (P_{ult}) yang diperoleh berdasarkan FEM kemudian dibandingkan dengan kapasitas beban nominal (P_n). Kapasitas beban nominal dihitung berdasarkan hubungan momen maksimum pada balok sederhana dengan beban terpusat di tengah bentang.

3.1. Balok bentang pendek ($L_b < L_p$)



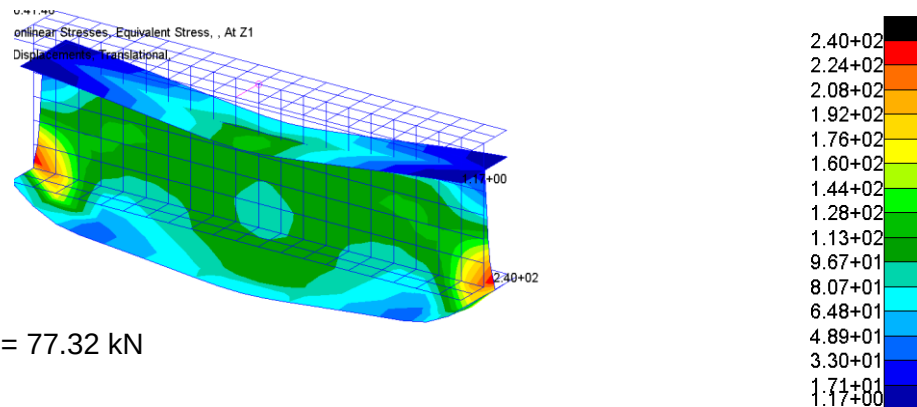
Gambar 2. Kurva beban vs. perpindahan pada balok bentang pendek ($L_b < L_p$)

Kurva yang ditampilkan pada **Gambar 2** merupakan balok dengan bentang pendek ($L_b \leq L_r$). Perilaku balok didominasi oleh kapasitas lentur penampang dan belum dipengaruhi oleh masalah instabilitas lateral.

Tabel 2. Nilai beban dan perpindahan pada balok bentang pendek ($L_b < L_p$)

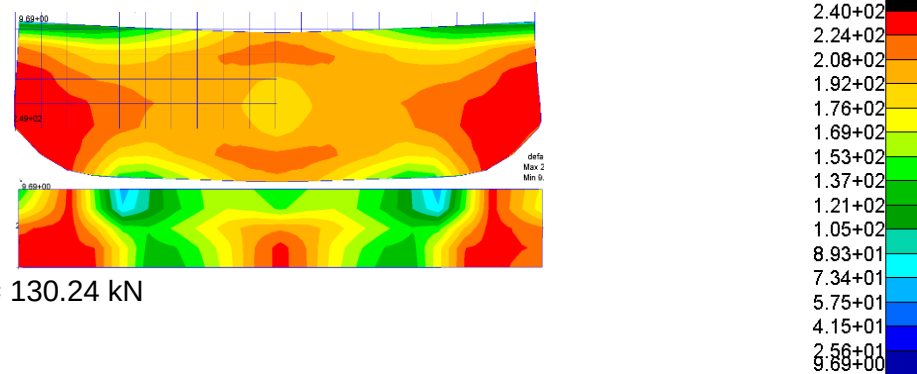
No.	Model	L_b mm	P_n kN	P_y kN	d_y mm	K_e kN.mm	P_{ult} kN	d_{ult} mm
1	SB 1	500	190.31	77.32	0.625	123.71	158.26	3.44
2	SB 2	750	126.87	51.80	0.625	82.88	142.09	6.09

Dari **Tabel 2**, Nilai beban dan perpindahan pada balok bentang pendek ($L_b < L_p$) dapat diketahui peningkatan beban sangat signifikan terlihat pada balok SB 1 dan SB 2 dari awal pembebanan hingga pada kondisi beban ultimit (P_{ult}). Setelah beban ultimit tercapai terlihat penurunan kapasitas seiring dengan bertambahnya perpindahan. Penurunan kapasitas tampak sangat tajam pada balok SB 1 dan sedikit landai pada balok SB 2. Nilai kekakuan elastis (K_e) pada balok SB 1 lebih besar dibandingkan balok SB 2 meskipun perbedaan panjang antara kedua balok tidak jauh berbeda. Hal ini terjadi karena balok SB 1 sangat kaku sehingga konsentrasi tegangan setelah leleh menyebabkan penurunan stabilitas lokal lebih cepat.



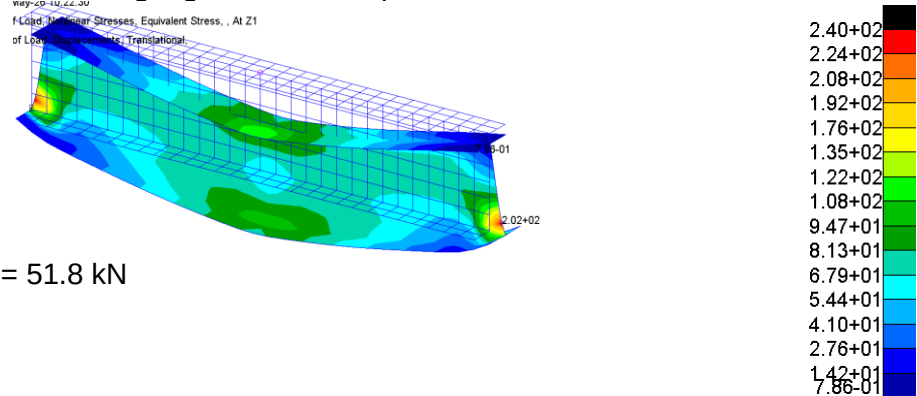
$\delta = 0.625$ mm; $P = 77.32$ kN

(a) Kontur tegangan balok SB1 pada kondisi leleh



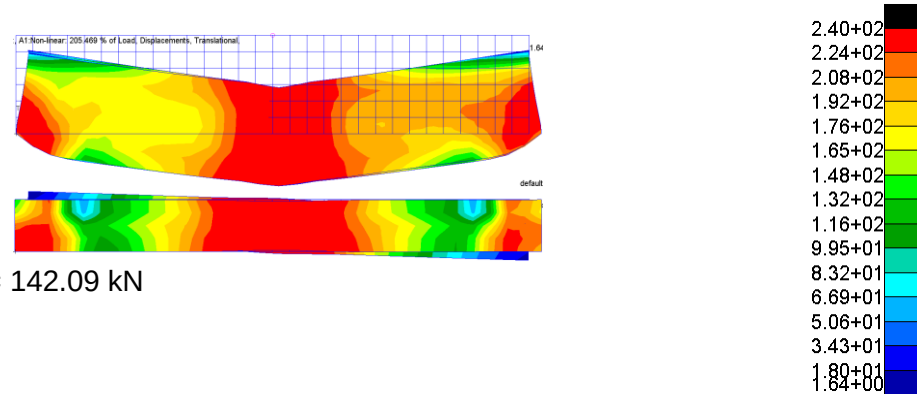
$\delta = 3.59$ mm; $P = 130.24$ kN

(b) Kontur tegangan balok SB1 pada kondisi awal tekuk lateral



$\delta = 0.625$ mm; $P = 51.8$ kN

(c) Kontur tegangan balok SB2 pada kondisi leleh



$\delta = 6.09$ mm; $P = 142.09$ kN

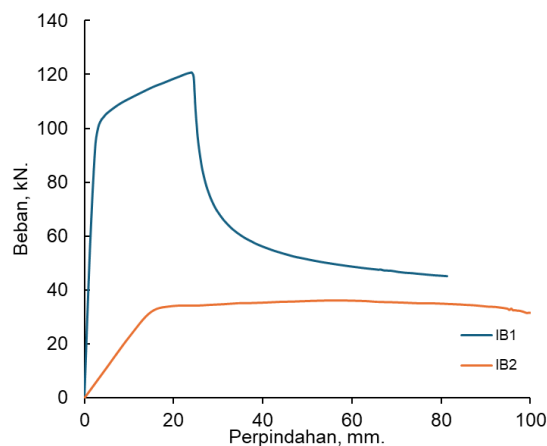
(d) Kontur tegangan balok SB2 pada kondisi awal tekuk lateral

Gambar 3. Kontur tegangan balok bentang pendek ($L_b < L_r$)

Kondisi $P_n > P_{ult}$ pada model SB 1 menunjukkan bahwa kapasitas teoritis nominal balok tidak tercapai pada perilaku aktual balok. Hal ini dapat dijelaskan dengan kontur tegangan pada model SB 1 pada **Gambar 3b** yang memperlihatkan adanya konsentrasi tegangan tinggi pada daerah *flange* tekan dan pertemuan *flange-web* di sekitar tengah bentang. Konsentrasi tegangan ini menyebabkan sebagian elemen penampang mengalami plastifikasi lebih cepat dibandingkan bagian lainnya, sehingga distribusi tegangan plastis penuh pada seluruh penampang tidak tercapai secara sempurna. Akibatnya, kapasitas aktual balok berhenti pada kondisi ultimit sebesar 158,26 kN sebelum mencapai kapasitas nominal teoritis.

3.2. Balok bentang menengah ($L_p \leq L_b \leq L_r$)

Respons dua balok baja bentang menengah, IB1 ($L_b = 1$ m) dan IB2 ($L_b = 3$ m) berupa kurva beban perpindahan dapat dilihat pada **Gambar 4**. Model IB 1 menunjukkan peningkatan beban yang tinggi, kemudian diikuti penurunan kapasitas yang cukup tajam setelah mencapai P_{ult} , yang mencerminkan perilaku *post-yield* yang lebih *brittle* dibandingkan model IB2. Sebaliknya, model IB 2 menunjukkan kapasitas yang lebih rendah namun dengan perpindahan ultimit yang jauh lebih besar ($d_{ult} = 56.25$ mm) **Tabel 3**.

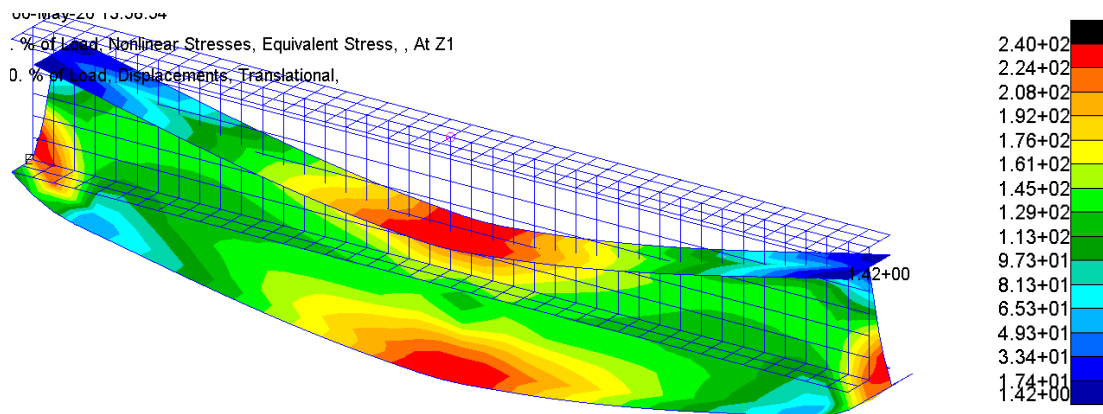
**Gambar 4.** Kurva beban vs. perpindahan pada balok bentang menengah ($L_p \leq L_b \leq L_r$)

Pada saat leleh pertama, model IB 1 menunjukkan distribusi tegangan yang lebih dominan pada daerah sekitar tengah bentang dan zona dekat tumpuan (**Gambar 5a**), dengan besaran tegangan yang lebih cepat mencapai kondisi plastis dibandingkan model IB 2 (**Gambar 5c**). Hal ini sejalan dengan nilai kekakuan awal model IB 1 yang jauh lebih besar ($K_e = 37.83$ kN/mm) dibanding model IB2 ($K_e = 2.14$ kN/mm), yang mengindikasikan respon awal yang lebih kaku akibat bentang yang lebih pendek (**Tabel 3**).

Tabel 3. Nilai beban dan perpindahan pada balok bentang menengah ($L_p \leq L_b \leq L_r$)

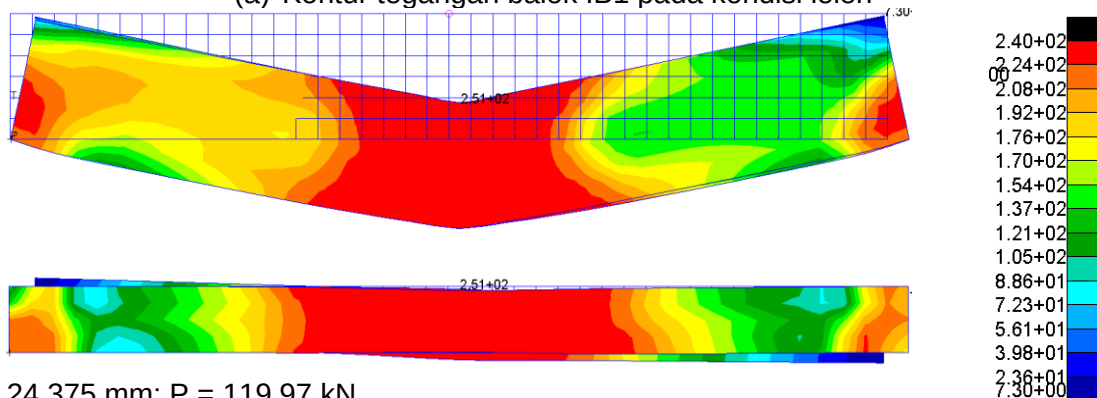
No.	Model	L_b mm	P_n kN	P_y kN	d_y mm	K_e kN/mm	P_{ult} kN	d_{ult} mm
1	IB1	1000	95.16	94.57	2.5	37.83	120.82	24.06
2	IB2	3000	31.72	32.04	15	2.14	36.26	56.25

Perbedaan bentuk kurva model IB 1 dan IB 2 meskipun berasal dari kategori bentang yang sama, kurva beban–perpindahan pada model IB 1 lebih menyerupai kurva beban–perpindahan pada bentang pendek. Secara mekanisme model IB 1 masih menunjukkan dominasi plastifikasi penampang di mana balok masih mampu mencapai atau mendekati kapasitas plastis penampang. Dengan kata lain, kontribusi LTB masih terbatas. Hal ini terjadi karena rasio $L_b/L_p \cong 1$ yaitu 1.19. Sebaliknya, model IB 2 menunjukkan perilaku yang berbeda karena pengaruh lateral-torsional buckling lebih dominan sejak sebelum kapasitas plastis tercapai penuh karena rasio $L_b/L_p = 3.56$.



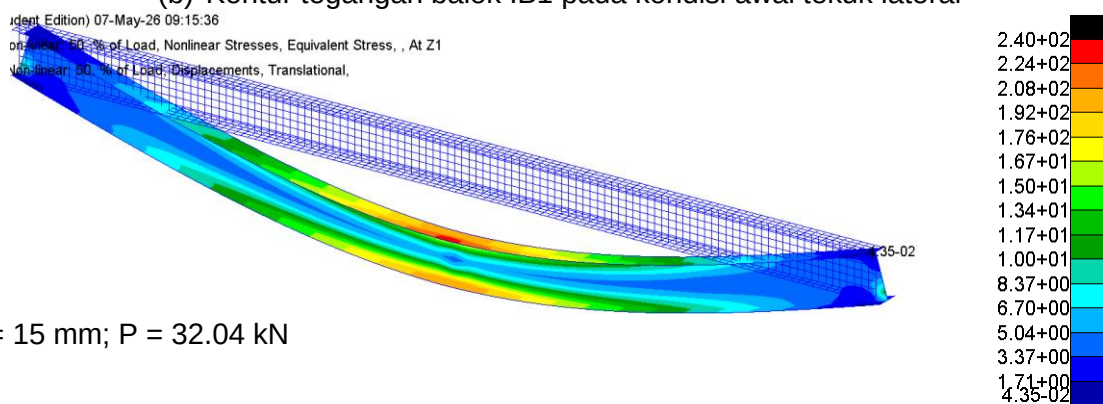
$\delta = 2.5 \text{ mm}$; $P = 94.57 \text{ kN}$

(a) Kontur tegangan balok IB1 pada kondisi leleh



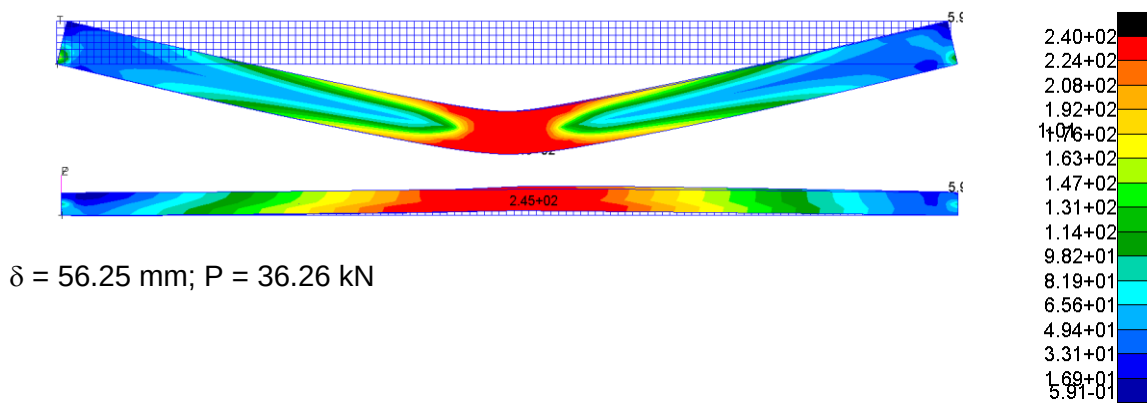
$\delta = 24.375 \text{ mm}$; $P = 119.97 \text{ kN}$

(b) Kontur tegangan balok IB1 pada kondisi awal tekuk lateral



$\delta = 15 \text{ mm}$; $P = 32.04 \text{ kN}$

(c) Kontur tegangan balok IB2 pada kondisi leleh

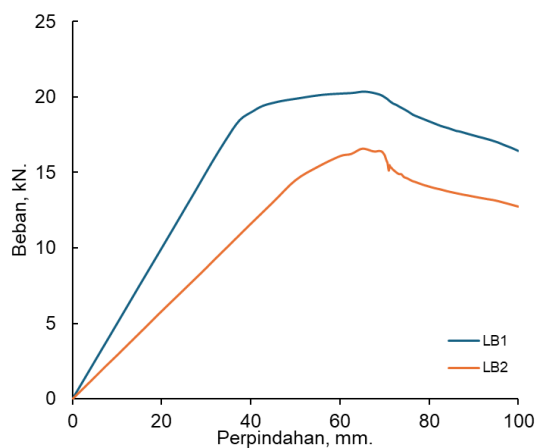


(d) Kontur tegangan balok IB2 pada kondisi awal tekuk lateral

Gambar 5. Kontur tegangan balok bentang bentang menengah ($L_p \leq L_b \leq L_r$)

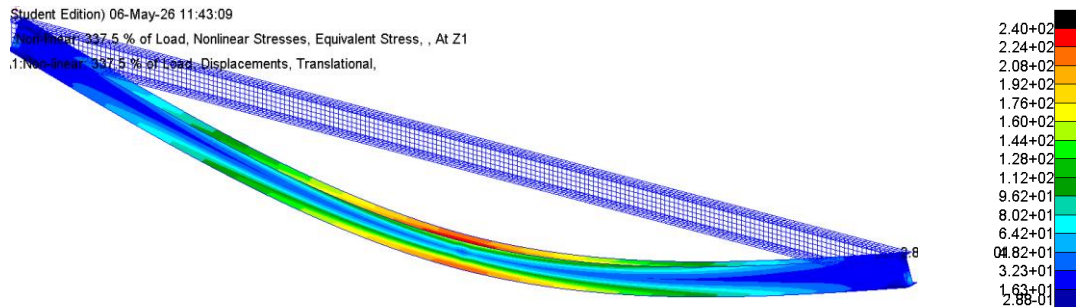
3.3. Balok bentang panjang ($L_p \geq L_r$)

Secara umum, kedua model balok bentang panjang memperlihatkan mekanisme respon nonlinier yang didominasi oleh perkembangan plastisitas di daerah tengah bentang hingga terbentuk zona sendi plastis pada kondisi ultimit. Kapasitas model LB 1 mencapai beban ultimit lebih tinggi dibanding LB 2 (**Tabel 4**). Di sisi lain model LB 1 memiliki kekakuan awal lebih tinggi ($K_e = 0.50 \text{ kN/mm}$) dibanding model LB 2 (0.29 kN/mm), yang menunjukkan bahwa balok lebih kaku dan lebih mampu menahan deformasi awal. Kedua model menunjukkan perpindahan ultimit yang relatif mirip (sekitar 65 mm), namun model LB 2 mencapai kapasitas tersebut pada level beban yang lebih rendah (**Gambar 6**), yang mengindikasikan penurunan kapasitas struktur dalam menahan beban seiring bertambahnya panjang bentang.

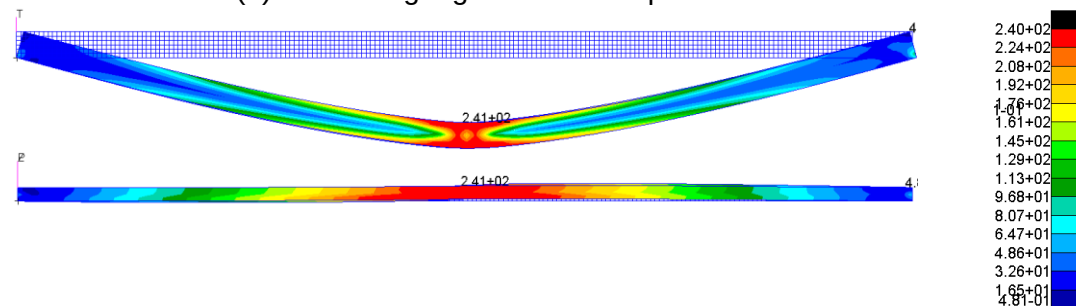
**Gambar 6.** Kurva beban vs. perpindahan pada balok bentang panjang ($L_b \geq L_r$)**Tabel 4.** Nilai beban dan perpindahan pada balok bentang panjang ($L_b \geq L_r$)

No.	Model	L_b mm	P_n kN	P_y kN	d_y mm	K_e kN.mm	P_{ult} kN	d_{ult} mm
1	LB1	5000	14.17	17.16	34.375	0.50	20.37	65.625
2	LB2	6000	9.77	14.50	50	0.29	16.60	65

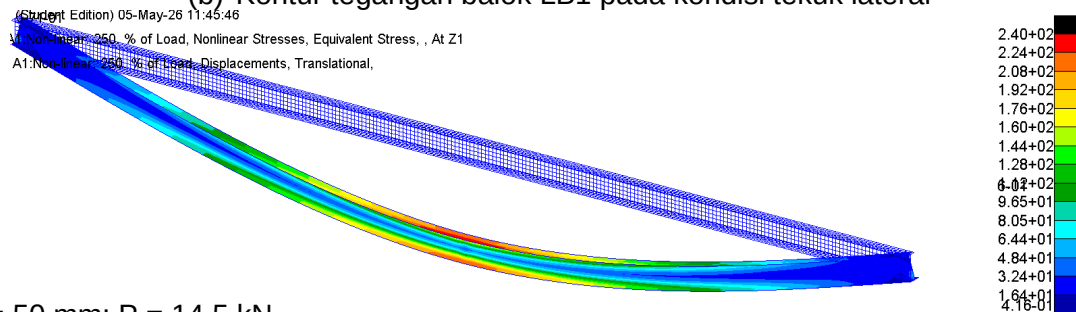
Pada kondisi ultimit, kedua model menunjukkan terbentuknya sendi plastis yang jelas di tengah bentang. Model LB 1 (**Gambar 7b**) memperlihatkan zona plastis yang lebih kecil, sedangkan model LB2 (**Gambar 7d**) menunjukkan penyebaran plastisitas pada area yang sedikit lebih luas yang mengindikasikan penurunan kekakuan struktural akibat pertambahan panjang bentang



(a) Kontur tegangan balok LB1 pada kondisi leleh

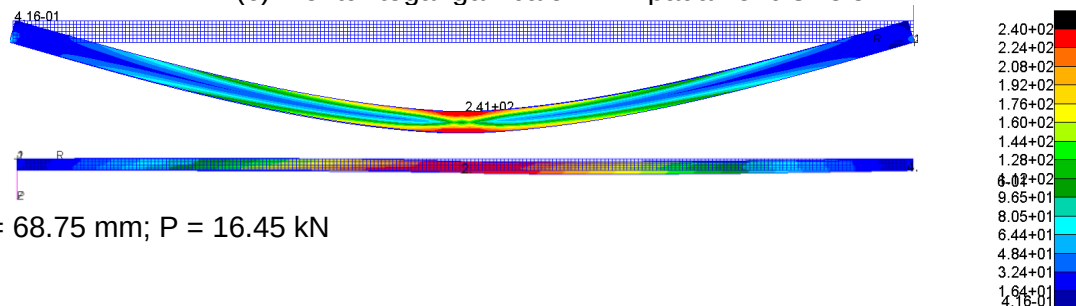


(b) Kontur tegangan balok LB1 pada kondisi tekuk lateral



$\delta = 50 \text{ mm}$; $P = 14.5 \text{ kN}$

(c) Kontur tegangan balok LB2 pada kondisi leleh



$\delta = 68.75 \text{ mm}$; $P = 16.45 \text{ kN}$

(d) Kontur tegangan balok LB2 pada kondisi tekuk lateral

Gambar 7. Kontur tegangan balok bentang panjang ($L_b \geq L_r$)

4. KESIMPULAN

Pada bentang pendek, perilaku balok relatif lebih kaku. Kekakuan yang tinggi menyebabkan deformasi kecil. Mekanisme keruntuhan didominasi oleh plastifikasi tanpa pengaruh instabilitas. Untuk bentang menengah zona plastis mulai meluas di area tengah bentang. Kapasitas beban masih relatif tinggi namun mulai terlihat penurunan dibandingkan bentang pendek karena efek kelangsingan dan distribusi tegangan. Selain itu rasio L_b/L_r juga berpengaruh terhadap respon balok bentang menengah. Sedangkan balok bentang panjang plastisitas lebih cepat dan kapasitas beban ultimit mengalami penurunan yang signifikan.

Secara umum, kapasitas teoritis dan numerik menunjukkan tren yang sama, yaitu mengalami penurunan kapasitas lentur seiring bertambahnya panjang bentang. Hal ini terjadi karena peningkatan panjang bentang menyebabkan kekakuan lentur balok berkurang dan meningkatkan kerentanan terhadap fenomena *lateral torsional buckling* (LTB).

DAFTAR PUSTAKA

- AISC. (2022). *Specification for Structural Steel Buildings Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings*.
- Galishnikova, V. V, & Gebre, T. H. (2019). A comparative study of beam design curves against lateral torsional buckling using AISC, EC and SP. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(1), 25–32. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-1-25-32>
- Kolakowski, Z., & Jankowski, J. (2018). Interactive buckling of steel C-beams with different lengths – From short to long beams. *Thin-Walled Structures*, 125, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.027>
- Li, Y., Lee, C.-C., & Cai, Y. (2023). Recent Research Advances in High-Performance Steel Tubular Members: Material Properties, Stub Columns, and Beams. *Buildings*, 13(11), 2713. <https://doi.org/10.3390/buildings13112713>
- Mascolo, I., Modano, M., Fiorillo, A., Fulgione, M., Pasquino, V., & Fraternali, F. (2018). Experimental and Numerical Study on the Lateral-Torsional Buckling of Steel C-Beams with Variable Cross-Section. *Metals*, 8(11), 941. <https://doi.org/10.3390/met8110941>
- Medland, I. C. (1980). Buckling of interbraced beam systems. *Engineering Structures*, 2(2), 90–96. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(80\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0141-0296(80)90035-8)
- Mohammadi, E., Hosseini, S. S., & Rohanimanesh, M. S. (2016). Elastic lateral-torsional buckling strength and torsional bracing stiffness requirement for monosymmetric I-beams. *Thin-Walled Structures*, 104, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.03.003>
- Ochshorn, J. (2010). Beams. Dalam *Structural Elements for Architects and Builders* (hlm. 129–191). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-771-9.00008-8>
- Ozbasaran, H., Aydin, R., & Dogan, M. (2015). An alternative design procedure for lateral–torsional buckling of cantilever I-beams. *Thin-Walled Structures*, 90, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.01.021>

Yoo, C. H., & Lee, S. C. (2011). Lateral-Torsional Buckling. Dalam *Stability of Structures* (hlm. 327–371). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385122-2.10007-7>

BIODATA

NIDIASARI

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Andalas.