Available online https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekno

T E K N O

Volume 24, No. 96, Tahun 2026 p-ISSN: 0215-9617

Analisis Perilaku Tekuk Pelat Badan Balok Seluler Pada Sambungan Geser Balok Ke Balok Tipe Coped Dengan Variasi Jarak End Post

Nazario Rion[#a], Banu D. Handono[#b], Ronny E. Pandaleke[#c]

[#]*Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia*
[a]nazariorion9@gmail.com, [b]banu2h@unsrat.ac.id, [c]ronny_pandaleke@yahoo.com

Abstrak

Modifikasi profil baja menjadi balok seluler dengan sambungan ujung tipe *coped* rentan mengalami instabilitas struktural. Hilangnya pengekangan sayap atas mereduksi kapasitas geser, sehingga luasan pelat badan utuh (Region e') rentan terhadap tekuk geser lokal. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi jarak *end-post* terhadap kapasitas tekuk kritis dan perilaku mekanis balok seluler menggunakan *Linear Buckling Analysis* (LBA) berbasis *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM) pada perangkat lunak IDEA StatiCa. Sampel difokuskan pada penampang Seluler 280, 350, dan 420 dengan rasio penempatan bukaan 1,0D–1,4D. Hasil menunjukkan pada Seluler 280 dan 350, penambahan jarak *end-post* meningkatkan kapasitas tekuk hingga +12,4% karena aliran gaya terdistribusi secara merata. Sebaliknya, pada Seluler 420, pelebaran jarak justru mereduksi kapasitas hingga -45,7% akibat kerentanan luasan pelat badan terhadap tekuk elastis sebelum rambatan gaya mencapai sudut takikan. Kesimpulannya, jarak optimal lubang sangat bergantung pada geometri penampang; rasio maksimal 1,4D optimal untuk Seluler 280 dan 350, sedangkan Seluler 420 direkomendasikan menggunakan batas minimum 1,0D untuk mencegah kegagalan prematur.

Kata kunci: balok seluler, sambungan coped, jarak end-post, tekuk geser lokal, CBFEM

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Penggunaan material baja pada proyek konstruksi sangat luas karena keunggulan durabilitas serta fleksibilitas bentuknya. Guna memaksimalkan potensi tersebut, bentuk profil baja kerap dimodifikasi menjadi balok seluler (*cellular beam*). Elemen struktur lentur ini dibuat dengan memberikan lubang sirkular pada bagian pelat badan untuk menambah ketinggian profil secara keseluruhan. Melalui perubahan geometri tersebut, nilai momen inersia balok meningkat sehingga kapasitas lenturnya bertambah secara signifikan tanpa memperbesar berat sendiri struktur. Di samping mengoptimalkan performa mekanis, keberadaan bukaan sirkular ini juga dapat dimanfaatkan untuk jalur utilitas perpipaan dan kelistrikan di dalam gedung.

Namun demikian, balok seluler sering kali menghadapi kendala geometris di bagian tumpuan ujung, terutama pada sistem sambungan geser (*shear connection*). Proses penyambungan pelat badan ke elemen penopang membutuhkan pemotongan pelat sayap pada ujung balok untuk menghindari benturan antarpenampang, sebuah detail yang dikenal sebagai sambungan tipe *coped*. Pemotongan pada bagian sayap ini mengakibatkan penurunan kapasitas tekuk di sekitar tumpuan secara langsung, yang membuat pelat badan rentan terhadap kegagalan tekuk geser lokal (*local web buckling*). Pada struktur dengan detail sambungan tersebut, kegagalan tekuk akibat gaya geser umumnya terkonsentrasi di area pelat badan utuh antara batas akhir potongan tumpuan dan tepi lubang pertama, yang secara spesifik diidentifikasi sebagai luasan Region e'. Fokus kegagalan pada luasan Region e' menunjukkan bahwa penempatan lubang pertama dari ujung sambungan geser tidak boleh ditentukan secara sembarangan. Mengingat kerumitan distribusi tegangan pada area potongan tumpuan yang berpotongan dengan bukaan

lubang, analisis perilaku tekuk dan aliran tegangan dalam kajian ini menerapkan pendekatan *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM) menggunakan perangkat lunak IDEA StatiCa.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana pengaruh variasi jarak *end-post* terhadap kapasitas tekuk kritis, pola distribusi tegangan pada luasan Region e', dan mekanisme kegagalan tekuk geser lokal (*local web buckling*) pada berbagai dimensi penampang balok seluler dengan sambungan tipe *coped.*

1.3 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya berfokus pada analisis instabilitas lokal (*Linear Buckling Analysis* / LBA) pada pelat badan di area ujung balok.
2. Perilaku tekuk global seperti Tekuk Torsional Lateral (LTB) diabaikan. Pelat sayap diasumsikan dikekang penuh (*fully restrained*) di sepanjang bentang balok.
3. Panjang bentang model dibatasi sejauh 6 meter.
4. Variabel yang ditinjau murni hanya variasi jarak horizontal pusat lubang pertama dari muka tumpuan.
5. Jarak horizontal divariasikan secara bertahap dalam rentang rasio 1,0D hingga 1,4D (di mana D adalah diameter lubang bukaan).
6. Geometri lubang seluler diasumsikan berbentuk lingkaran sempurna. Bentuk bukaan lain (seperti heksagonal atau oktagonal) tidak diteliti.
7. Profil yang digunakan terbatas pada penampang IWF standar produksi lokal yang diekspansi menjadi balok seluler, meliputi kelompok profil IWF-280, IWF-350, dan IWF-420.
8. Kekakuan dan konfigurasi detail sambungan geser disesuaikan secara proporsional dengan kapasitas dan dimensi masing-masing kelompok profil balok seluler.
9. Analisis murni menggunakan studi komputasional berbasis *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM) melalui perangkat lunak IDEA StatiCa Member. Pengujian eksperimental secara fisik di laboratorium tidak dilakukan.
10. Pembebanan pada model dibatasi pada beban statis monotonik berupa gaya luar sebesar 1 kN yang diaplikasikan di sepanjang bentang balok, yang difungsikan murni sebagai beban pemicu (*trigger load*) untuk mengekstraksi nilai faktor pengali kritis tekuk. Beban dinamis maupun beban siklis (gempa) tidak diperhitungkan.

1.4 Tujuan Penelitian

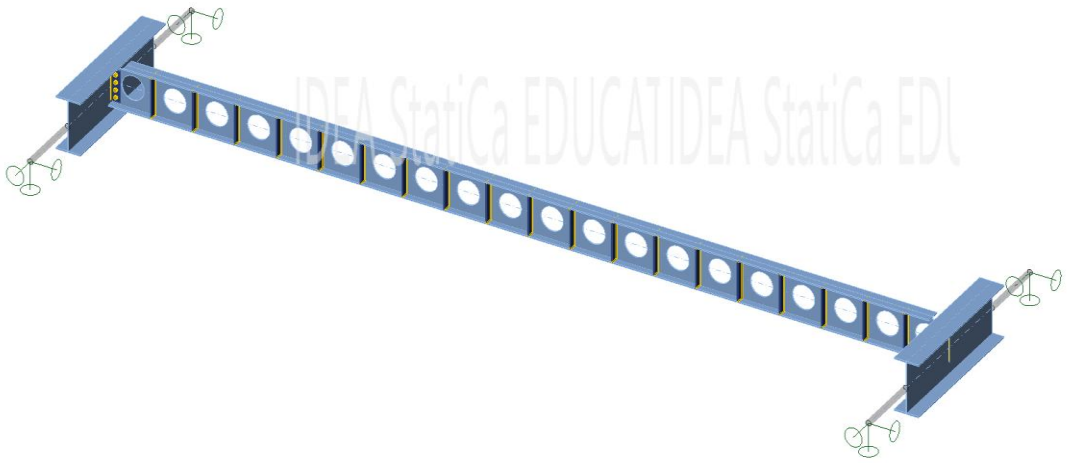
1. Menganalisis tingkat penurunan atau peningkatan kapasitas penampang balok seluler pada sambungan *coped* seiring dengan perubahan jarak horizontal *end-post* dari skala 1,0D hingga 1,4D.
2. Mengevaluasi perilaku tekuk lokal dan aliran tegangan yang terpusat pada area kritis antara ujung takikan dan bukaan pertama, menggunakan pendekatan *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM).
3. Merumuskan rekomendasi teknis mengenai batas jarak end post yang aman dan proporsional bagi fabrikasi balok seluler berprofil standar Indonesia.

1.5 Manfaat Penelitian

Memberikan rekomendasi teknis mengenai batas jarak aman penempatan lubang pertama (*end-post*) pada fabrikasi balok seluler bersambungan *coped* di Indonesia guna mencegah kegagalan tekuk lokal.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode studi komputasional berbasis *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM). Analisis dilakukan untuk mengevaluasi perilaku instabilitas melalui *Linear Buckling Analysis* (LBA) dengan bantuan perangkat lunak IDEA StatiCa Member.



Gambar 1. Pemodelan Balok Seluler di Perangkat Lunak IDEA StatiCa

2.1 Variabel Tetap

1. Panjang bentang balok: 6 m
2. Material baja: BJ37.
3. Beban pemicu (*trigger load*): 1 kN.
4. Kekakuan sambungan: proporsional terhadap dimensi profil dan dikunci konstan pada setiap kelompok.

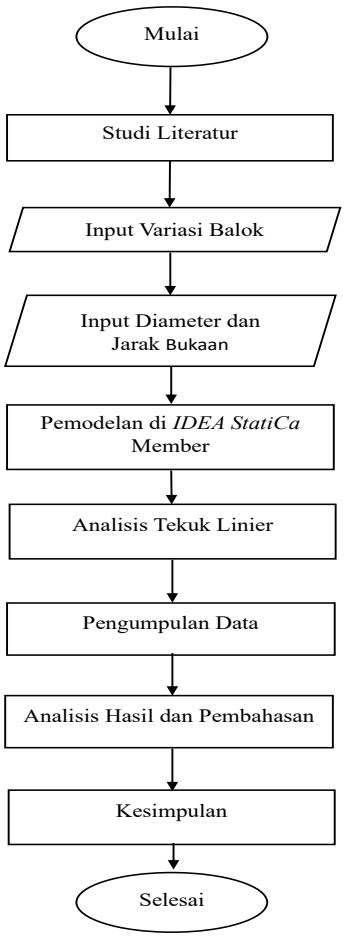
2.2 Variabel Bebas

Tabel 1. Daftar Konfigurasi Model Balok

Profil dasar	Tinggi akhir (mm)	Diameter lubang (mm)	Jarak end post (mm)				
			1D	1,1D	1,2D	1,3D	1,4D
IWF 200	280	160	160	176	192	208	224
IWF 250	350	200	200	220	240	260	280
IWF 300	420	240	240	264	288	312	336

2.3 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

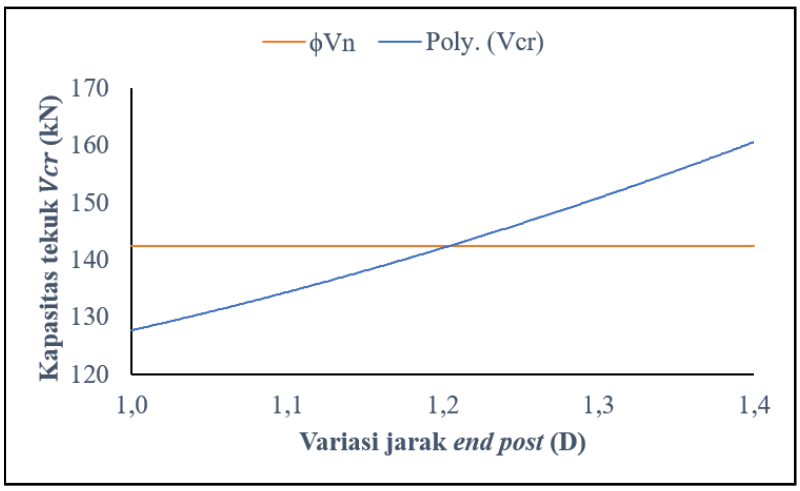
Sebelum mengevaluasi perilaku struktur balok hasil modifikasi, kekuatan dasar penampang utuh ditetapkan terlebih dahulu. Nilai kapasitas ini dikalkulasi memakai pendekatan analitis yang sepenuhnya merujuk pada pedoman SNI 1729:2020. Properti material yang diaplikasikan berupa baja mutu BJ37 dengan spesifikasi tegangan leleh (fy) sebesar 240 MPa.

- IWF 200 $\phi Vn = 142{,}56\ kN$
- IWF 250 $\phi Vn = 162\ kN$
- IWF 300 $\phi Vn = 213{,}84\ kN$

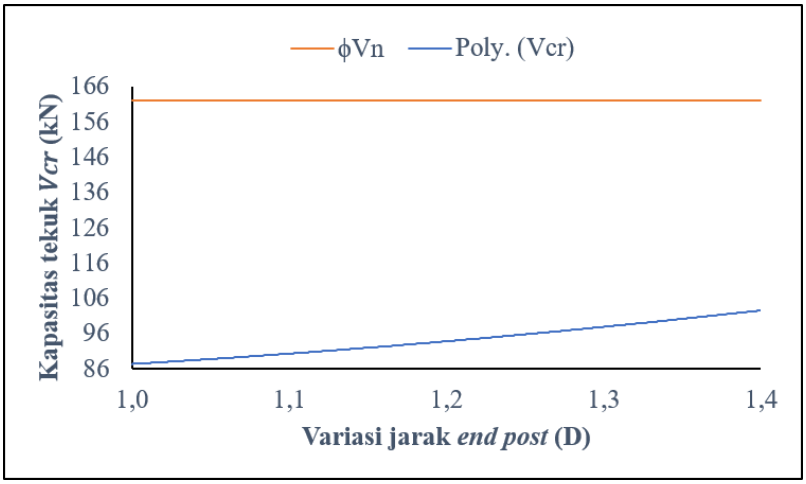
Berdasarkan hasil analisis komputasional dengan pendekatan *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM), diperoleh data kapasitas beban tekuk kritis pada luasan Region e' akibat pengaruh variasi jarak *end-post* sebagai berikut.

Tabel 2. Nilai α_{cr} Pada Setiap Variasi Jarak End Post

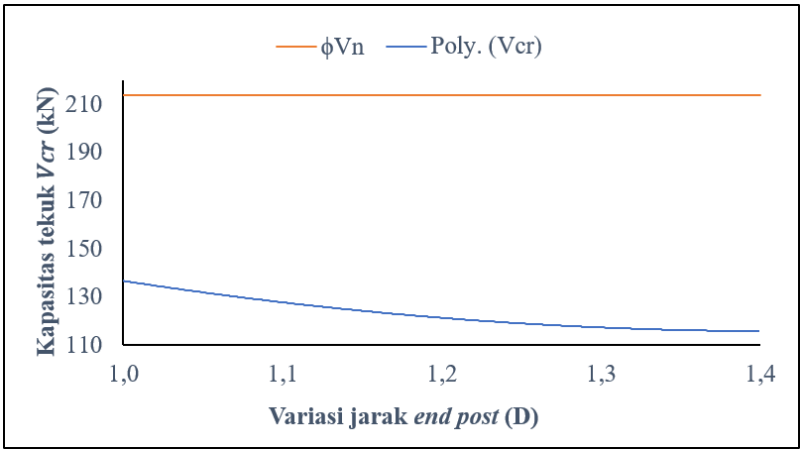
Jarak end post	Seluler 280	Seluler 350	Seluler 420
1,0D	128,17	87,09	136,78
1,1D	133,35	90,97	127,06
1,2D	142,57	93,91	122,56
1,3D	151,3	97,21	116,31
1,4D	160,34	102,95	116,05



Gambar 3. Grafik Perbandingan Kapasitas Tekuk Geser Seluler 280 Dengan Profil Asal



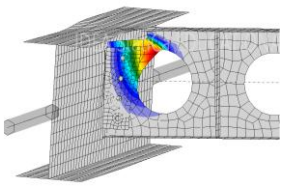
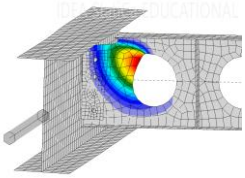
Gambar 4. Grafik Perbandingan Kapasitas Tekuk Geser Seluler 350 Dengan Profil Asal



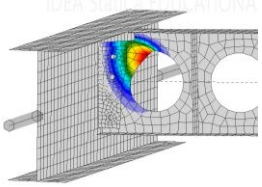
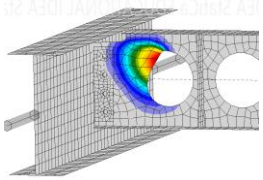
Gambar 5. Grafik Perbandingan Kapasitas Tekuk Geser Seluler 420 Dengan Profil Asal

Perbedaan tren nilai kapasitas tekuk (a_{cr}) dari hasil simulasi numerik mengindikasikan terjadinya pergeseran mode kegagalan. Perubahan perilaku struktur ini secara sensitif dipengaruhi oleh rasio kelangsingan pelat badan (h/tw) dan konfigurasi geometri pada sambungan ujung tipe *coped*. Guna menelusuri penyebab fluktuasi nilai kapasitas pada grafik sebelumnya, analisis dilanjutkan dengan mengamati bentuk deformasi fisik (*buckling shape*). Pengamatan tersebut difokuskan pada kondisi elemen penampang ketika tepat mencapai batas stabilitasnya.

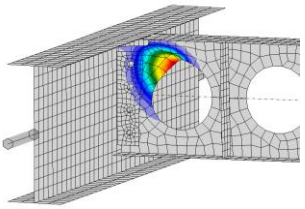
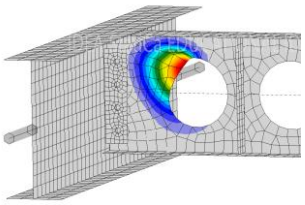
Tabel 3. Bentuk Tekuk Pelat Badan Profil Seluler 280

Diameter Bukaan (mm)	Parameter jarak *end post*	Variasi jarak *end post* (mm)	Nilai α_{cr} (kN)	*Buckling shape*
160	1,0D	160	128,17	
160	1,4D	224	160,34	

Tabel 4. Bentuk Tekuk Pelat Badan Profil Seluler 350

Diameter Bukaan (mm)	Parameter jarak *end post*	Variasi jarak *end post* (mm)	Nilai α_{cr} (kN)	*Buckling shape*
200	1,0D	200	87,09	
200	1,4D	280	102,95	

Tabel 5. Bentuk Tekuk Pelat Badan Profil Seluler 420

Diameter Bukaan (mm)	Parameter jarak *end post*	Variasi jarak *end post* (mm)	Nilai α_{cr} (kN)	*Buckling shape*
240	1,0D	240	136,78	
240	1,4D	336	116,05	

Pada kategori profil yang mempunyai rasio kelangsingan pelat badan (h/tw) tingkat rendah sampai menengah, yakni Seluler 280 dan Seluler 350, modifikasi ukuran jarak *end post* memberikan dampak positif berupa peningkatan kapasitas tekuk. Ditinjau berdasarkan prinsip mekanika, penambahan jarak *end post* tersebut berfungsi memperluas zona pelat badan utuh (*solid web*) di wilayah kritis tumpuan sebelum mencapai posisi lubang seluler yang pertama. Deformasi tekuk secara mutlak tetap terpusat pada wilayah sudut tumpuan *coped* berlanjut sampai ke tepi luasan bukaan. Peninjauan khusus terhadap luasan pelat badan yang memisahkan area takikan ujung dengan bukaan pertama, yang didefinisikan sebagai panel *Region e'*, membuktikan bahwa area penampang tersebut secara persisten berada di dalam kondisi *buckling shape*.

Visualisasi ragam tekuk pada balok berprofil Seluler 420 menampilkan pergeseran lokasi keruntuhan yang berbeda jika dibandingkan dengan karakteristik Seluler 280 maupun Seluler 350. Merujuk pada pengamatan di variasi 1,4D, bagian pelat badan yang berposisi di sudut takikan ujung tumpuan sama sekali tidak mengalami deformasi lengkung. Pusat kegagalan elemen bergeser secara mutlak ke arah tengah luasan panel *Region e'*. Deformasi penampang terwujud dalam bentuk lengkungan pelat dengan arah melintang diagonal. Bentuk ini menciptakan sebuah jalur keruntuhan yang membentang dari area bawah takikan sampai menuju tepi atas bukaan seluler yang pertama.

Perpindahan titik kegagalan tersebut dipicu oleh tingginya rasio kelangsingan pelat badan yang dimiliki oleh profil Seluler 420. Pembebanan geser di area tumpuan yang bekerja terpusat pada penampang pelat tipis ini menghasilkan tegangan utama tarik serta tekan yang saling berpotongan tegak lurus. Kehadiran tegangan tekan utama selanjutnya membentuk mekanisme distribusi gaya melalui lintasan *diagonal compression strut*. Mengingat kapasitas tegangan kritis dari penampang langsing ini tergolong sangat rendah, panel *Region e'* kehilangan tahanan kekakuan lateral yang memadai guna menyeimbangkan lintasan gaya tekan yang bekerja. Keadaan geometri tersebut mengakibatkan pelat badan langsung mengalami keruntuhan *out-of-plane local shear buckling* secara prematur, jauh sebelum wilayah sudut takikan menyentuh batas ambang tegangannya.

Perilaku struktural tersebut dapat diuraikan melalui pendekatan analitis yang merujuk pada pedoman AISC Manual Part 9 tentang *Local Web Buckling at Coped Ends*. Di dalam standar perencanaan tersebut, tingkat kelangsingan geometri pelat badan direpresentasikan melalui persamaan rasio $(t_w/h_0)^2$. Besaran rasio kelangsingan ini bertindak sebagai faktor pengali utama guna menetapkan batas Tegangan Tekuk Kritis (F_{cr}) pada komponen pelat badan. Rumusan teknis ini diturunkan langsung dari persamaan dasar terkait stabilitas pelat elastis:

$$F_{cr} = k\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t_w}{h_0}\right)^2$$

Persamaan matematis tersebut menunjukkan bahwa ambang batas tegangan pemicu instabilitas berbanding lurus terhadap rasio kelangsingannya. Mengingat rasio kelangsingan geometri pelat memiliki sifat kuadratik, penambahan ukuran yang kecil saja pada ketebalan pelat (t_w) sudah mampu menaikkan nilai tegangan tekuk kritis (F_{cr}) penampang. Dimensi pelat badan pada profil Seluler 280 dan Seluler 350 tergolong cukup tebal jika dibandingkan dengan ukuran tingginya. Proporsi dimensi ini menghasilkan nilai rasio kuadratik yang tinggi, sehingga batas ambang instabilitas elastis dari material berhasil ditunda. Sifat pelat penampang yang kaku tersebut memungkinkan wilayah sambungan memikul gaya geser secara optimal. Sebagai hasilnya, saat luasan area *Region e'* diperbesar, penampang menyediakan ruang pelat utuh yang sangat solid untuk menyebarkan aliran gaya secara merata menuju perletakan. Kestabilan penyebaran gaya inilah yang sangat berperan dalam mencegah terjadinya *Flexural Local Buckling* di bagian sudut *coped* terlalu dini. Kondisi tersebut memberikan dampak langsung terhadap peningkatan kapasitas geser tekuk kritis (V_{cr}) struktur secara keseluruhan, yang tercatat mengalami kenaikan hingga +12,456% untuk model Seluler 280.

Berdasarkan kondisi riil di dalam simulasi komputasi, beban geser memaksa rambatan gaya di pelat badan langsing tersebut bekerja selayaknya elemen *diagonal compression strut*. Perilaku mekanika dari jalur gaya ini mempunyai prinsip kerja yang serupa dengan fenomena tekuk pada elemen batang tekan berdasarkan penjabaran persamaan Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Berdasarkan persamaan batang tekan tersebut, penyebab menurunnya kapasitas pada profil Seluler 420 dapat diuraikan secara logis. Saat ukuran jarak *end post* diperbesar, dimensi lintasan imajiner dari *diagonal compression strut* (L) secara otomatis ikut memanjang. Mengingat variabel panjang L di dalam rumus Euler berposisi sebagai pembagi dengan fungsi kuadratik, penambahan bentang luasan ini memicu penurunan kapasitas beban kritis (P_{cr}) secara eksponensial pada fase awal. Setelah itu, pergerakan kurva kapasitas berubah menjadi lebih landai sejalan dengan pertambahan panjang bentang. Kondisi pelat badan Seluler 420 yang terlampau tipis membuatnya kehilangan kemampuan untuk mempertahankan stabilitas elemen batang tekan diagonal yang terus memanjang.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis komputasional dengan pendekatan *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM), simpulan penelitian memperlihatkan bahwa variasi jarak *end-post* dalam rentang rasio 1,0D sampai 1,4D memberikan pengaruh signifikan terhadap kapasitas beban tekuk kritis pelat badan. Karakteristik dimensi penampang yang tergolong kaku pada profil Seluler 280 dan Seluler 350 memicu tren peningkatan kapasitas tekuk secara bertahap seiring bertambahnya jarak bukaan, dengan peningkatan tertinggi mencapai nilai +12,46% pada konfigurasi rasio maksimal 1,4D. Perilaku mekanis pada kedua kelompok penampang tersebut memperlihatkan distribusi aliran gaya geser secara merata, sehingga area sudut takikan *coped* tetap aktif menahan tegangan dan berdeformasi secara proporsional bersamaan dengan pusat tekuk di tengah luasan panel Region e'.

Kondisi sebaliknya teramati pada penampang dengan spesifikasi pelat badan yang lebih langsing seperti Seluler 420, di mana pelebaran jarak *end-post* justru berdampak negatif berupa reduksi kapasitas kritis yang sangat drastis hingga mencapai nilai -45,73% pada konfigurasi rasio 1,4D. Penurunan kekuatan tersebut dipicu oleh tingkat kelangsingan pelat badan yang memicu kerentanan terhadap kegagalan tekuk elastis akibat bertambah panjangnya lintasan elemen batang tekan imajiner. Secara mekanis, pola deformasi tekuk *out-of-plane* pada bentang luasan Region e' yang terlalu panjang terpusat sepenuhnya di area tengah panel, sehingga mengakibatkan pelat melengkung lebih awal secara prematur sebelum rambatan aliran gaya sepenuhnya mencapai area sudut takikan ujung *coped*.

Sebagai rekomendasi teknis bagi kebutuhan fabrikasi, batas penempatan lubang seluler pertama sangat bergantung pada geometri spesifik penampang dasar. Konfigurasi penampang kaku seperti Seluler 280 dan Seluler 350 mencapai efektivitas tertinggi pada rasio maksimal 1,4D sebagai langkah penyebaran tegangan secara maksimal. Sementara itu, fabrikasi balok seluler berprofil langsing seperti Seluler 420 diwajibkan menerapkan batas rasio minimum 1,0D sebagai pembatas panjang lintasan elemen batang tekan diagonal sekaligus penahan terjadinya penurunan kapasitas tekuk geser lokal secara prematur.

5. Saran

Mempertimbangkan fenomena mekanis yang teramati, terdapat beberapa rekomendasi akademis bagi studi lanjutan. Pertama, penentuan ambang batas rasio kelangsingan pelat badan memerlukan kajian yang lebih mendalam. Riset selanjutnya disarankan melakukan studi parametrik melalui variasi ketebalan pelat badan dengan rentang yang lebih rapat sebagai dasar mengidentifikasi titik presisi pergeseran pusat keruntuhan dari wilayah sudut takikan ke arah tengah luasan panel Region e'. Kedua, eksplorasi terhadap variasi dimensi panjang dan kedalaman takikan (*coped*) sangat diperlukan. Perubahan parameter geometri tersebut secara langsung mendikte sudut kemiringan dari lintasan aliran gaya tekan diagonal, sehingga fluktuasi kapasitas geser akhirnya perlu dievaluasi lebih lanjut. Ketiga, pendekatan *Linear Buckling Analysis* (LBA) memiliki batasan karena sebatas memprediksi beban kritis awal tekuk elastis. Oleh sebab itu, kajian lanjutan diharapkan mampu menerapkan analisis nonlinier sebagai metode evaluasi sisa kapasitas kekuatan penampang atau cadangan kekuatan pascatekuk (*post-buckling reserve strength*) hingga benar-benar mencapai titik keruntuhan ultimitnya.

Referensi

American Institute of Steel Construction. (2011). *Steel construction manual* (14th ed.). AISC.
American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for structural steel buildings* (ANSI/AISC 360-16). AISC.
ArcelorMittal. (n.d.). *Cellular beams: Design guide and technical properties*. ArcelorMittal Commercial Sections.
Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural* (SNI 1729:2020). BSN.
Ente, A. A. G., Handono, B. D., & Pangouw, J. D. (2017). Studi numerik perilaku balok kastela terhadap variasi posisi lubang dari tumpuan. *Jurnal Sipil Statik*, *5*(7), 425–434.
European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EN 1993-1-1:2005). CEN.
European Committee for Standardization. (2006). *Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-5: Plated structural elements* (EN 1993-1-5:2006). CEN.
Hoffman, R., Dinehart, D., Gross, S., & Yost, J. (2006). Analysis of stress distribution and failure behaviour of cellular beams. In *Proceedings of the International ANSYS Conference*. Pittsburgh, PA, USA.
IDEA StatiCa. (n.d.). *Theoretical background: Component-based finite element method (CBFEM)*. IDEA StatiCa Documentation.
Šabatka, L., Wald, F., Kabeláč, J., Navrátil, J., & Kolaja, D. (2015). Component based finite element design of steel connections. *Steel Construction*, *8*(3), 180–186.
Segui, W. T. (2018). *Steel design* (6th ed.). Cengage Learning.
Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D. A., & Gardner, L. (2008). *The behaviour and design of steel structures to EC3* (4th ed.). Taylor & Francis.
Tsavdaridis, K. D., & D'Mello, C. (2011). Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, *67*(10), 1605–1620. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004
Ziemian, R. D. (Ed.). (2010). *Guide to stability design criteria for metal structures* (6th ed.). John Wiley & Sons.