

EVALUASI NUMERIK DAMPAK KETIDAKSEMPURNAAN PENAMPANG DALAM BATAS TOLERANSI TERHADAP PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BAJA

H H Tjahjanto¹⁾, A K Hartono²⁾, W O Nugroho³⁾

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan
Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, 40141, Indonesia

E-mail: helmy.hermawan@unpar.ac.id¹⁾, 6102001081@student.unpar.ac.id²⁾, wivia.octarena@unpar.ac.id³⁾

ABSTRAK

Kinerja balok baja dalam menahan momen lentur dan gaya geser sangat dipengaruhi oleh geometri penampang dan properti materialnya. Dalam perancangan struktur baja, ketidaksempurnaan geometri penampang dalam batas toleransi umumnya tidak diperhitungkan secara eksplisit, meskipun dapat berkontribusi terhadap perubahan perilaku struktur. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak ketidaksempurnaan penampang dalam batas toleransi terhadap kekuatan dan kapasitas deformasi lentur serta geser pada balok baja berpenampang sayap lebar. Kajian dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak elemen hingga pada model balok kantilever dengan panjang yang berbeda untuk merepresentasikan kegagalan dominasi lentur dan geser. Variasi model mencakup enam tipe ketidaksempurnaan berdasarkan standar JIS G3192:2008. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidaksempurnaan penampang yang menghasilkan bentuk asimetris terhadap sumbu lemah (Tipe-1 dan Tipe-2) dapat menurunkan kapasitas rotasi dan daktilitas lentur balok, sehingga tidak dapat digunakan sebagai bagian dari sambungan balok kolom Rangka Momen Khusus sesuai SNI 7860:2020. Selain itu, kedua tipe ketidaksempurnaan ini (Tipe-1 dan Tipe-2) dan ketidaksempurnaan pelat badan web yang tidak lurus (Tipe-6) menurunkan kapasitas deformasi geser balok, hingga 7% di bawah kekuatan geser nominal penampang. Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun berada dalam batas toleransi, ketidaksempurnaan geometri penampang dapat berpengaruh terhadap performa struktur.

Kata kunci: analisis elemen hingga, kekuatan geser, kekuatan lentur, penampang baja sayap lebar, toleransi ketidaksempurnaan

1. Pendahuluan

Kekuatan lentur dan geser balok pada struktur baja ditentukan oleh besaran penampang dan properti material. Persamaan-persamaan desain komponen struktur baja diturunkan berdasarkan konsep mekanika dengan menerapkan penyederhanaan dan asumsi atau idealisasi bentuk geometri penampang. Berdasarkan SNI 1729:2020 [1] dan AISC 360-22 [2], kekuatan lentur balok dengan elemen-elemen kompak ditentukan oleh momen plastis penampang baja dan momen maksimum jika terjadi tekuk torsi-lateral. Kekuatan lentur tersebut dipengaruhi besaran penampang, di antaranya momen inersia dan modulus penampang plastis, yang dihitung pada geometri penampang nominal. Selain itu, gaya yang menghasilkan momen lentur pada balok dianggap bekerja melalui pusat berat penampang. Untuk balok berpenampang kompak, kekuatan geser balok ditentukan oleh

kapasitas geser pelat badan balok yang diasumsikan mengalami leleh geser di sepanjang pelat badan tanpa dibatasi oleh tekuk lokal.

Penyimpangan atau ketidaksempurnaan geometris terhadap bentuk dan ukuran penampang nominal dapat memicu perubahan perilaku kegagalan dan menurunkan kapasitas penampang dan komponen struktur dalam memikul beban. Pengaruh ketidaksempurnaan penampang terhadap perilaku balok dan kolom dievaluasi oleh Gérard [3], yang membandingkan hasil analisis numerik pada model-model dengan ketidaksempurnaan penampang sesuai ragam tekuk pertama dengan hasil eksperimental. Selain itu, studi yang dilakukan oleh Kovacevic [4] menemukan bahwa ketidaksempurnaan lokal pada penampang gelagar pelat memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap penurunan kekuatan dibandingkan ketidaksempurnaan global. Penentuan jenis

ketidaksempurnaan geometris awal yang mempengaruhi perkembangan perilaku pascatekuk juga berpengaruh terhadap kekuatan balok komposit baja-beton [5]. Dalam lingkup struktur dan komponen struktur secara global, ketidaksempurnaan geometris juga dapat mempengaruhi perilaku struktur khususnya saat mengalami tekuk [6] [7].

Pada praktik konstruksi, penyimpangan atau ketidaksempurnaan geometri penampang baja dapat terjadi walaupun diproduksi melalui proses yang terstandarisasi. Penampang yang tidak sempurna, atau terdapat penyimpangan dari bentuk dan ukuran nominal, tetap dapat digunakan dalam konstruksi selama tidak melampaui batas toleransi yang ditetapkan oleh standar. Salah satu standar yang diadopsi oleh industri baja di Indonesia dalam menetapkan batas-batas toleransi untuk berbagai jenis ketidaksempurnaan penampang, khususnya untuk penampang baja sayap lebar (*wide flange*) adalah JIS G3192:2008 [8]. Jenis-jenis ketidaksempurnaan penampang sayap lebar tersebut mencakup: (a) pelat sayap tidak tegak lurus; (b) pelat sayap tidak lurus; (c) pelat badan eksentris; dan (d) pelat badan melengkung.

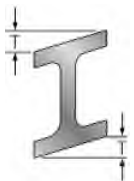
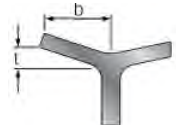
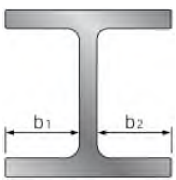
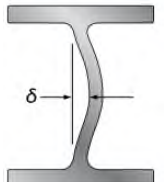
Ketidaksempurnaan penampang balok dalam batas toleransi pada umumnya tidak diperhitungkan dalam desain, meskipun dapat menyebabkan penurunan kekuatan dan perubahan ragam kegagalan dalam menahan momen lentur dan gaya geser. Penurunan kekuatan ini dapat terjadi secara signifikan dan tidak cukup dikompensasi oleh faktor kekuatan yang digunakan dalam desain. Berdasarkan hipotesis tersebut, kajian numerik terhadap balok baja berpenampang sayap lebar dilakukan untuk mengevaluasi dampak ketidaksempurnaan terhadap kekuatan dan kapasitas deformasi lentur dan geser. Hasil evaluasi digunakan untuk mengidentifikasi tipe-tipe ketidaksempurnaan penampang yang berdampak lebih besar maupun yang kurang berdampak terhadap perilaku balok.

2. Studi Kasus dan Analisis Numerik

Pengaruh ketidaksempurnaan penampang dalam batas toleransi terhadap kekuatan lentur dan geser balok baja dikaji pada penampang sayap lebar WF300x150x6,5x9 yang sesuai dengan JIS G3192 [8] dan terbuat dari material baja BJ37 ($F_y = 240$ MPa). Kajian dilakukan pada balok-balok yang diprediksi mengalami kegagalan lentur dan kegagalan geser. Ketidaksempurnaan atau penyimpangan penampang ditetapkan sama dengan

nilai-nilai pada batas toleransi yang terdapat 6 tipe, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

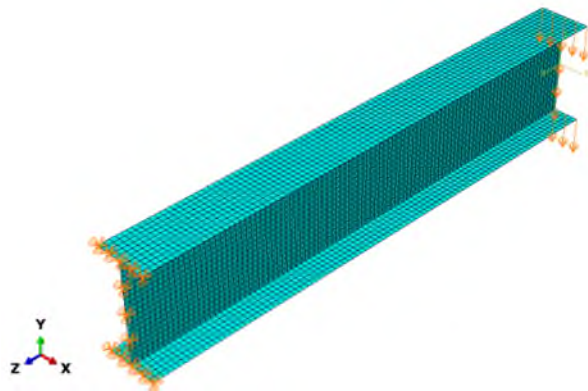
Tabel 1. Tipe dan Batas Toleransi Ketidaksempurnaan Penampang (JIS G3192 [8])

Tipe	Bentuk*	Batas Toleransi
1		$T \leq \min (0,01b_f; 1,5 \text{ mm})$
2		$T \leq \min (0,01b_f; 1,5 \text{ mm})$
3		$t \leq \min (0,015b; 1,5 \text{ mm})$
4		$t \leq \min (0,015b; 1,5 \text{ mm})$
5		$\frac{1}{2} (b_1 - b_2) \leq 2 \text{ mm}$
6		$\delta \leq 2 \text{ mm}$

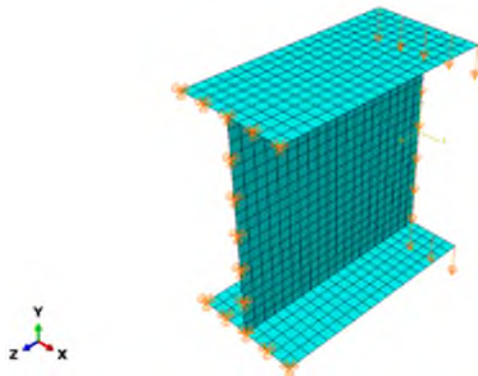
* Ilustrasi diambil dari Spesifikasi Teknis JFE Steel Wide Flange Shapes [9]

Kajian numerik dilakukan dengan perangkat lunak elemen hingga ABAQUS. Elemen pelat sayap dan pelat badan balok dimodelkan dengan elemen *shell* dengan mengabaikan adanya radius penebalan pada bagian pertemuan sayap-badan. Material baja dimodelkan berperilaku elasto-plastis ($E = 200000$ MPa; $F_y = 240$ MPa) yang diinput dalam bentuk korelasi *true stress - true strain*. Gambar 1

mengilustrasikan kondisi batas dan pembebanan. Pemodelan dan analisis dilakukan untuk balok kantilever dengan salah satu ujung ditumpu secara jepit (seluruh arah translasi ditahan), sedangkan pada ujung lainnya diberikan beban terpusat yang diaplikasikan dalam bentuk perpindahan monotonik dengan besaran yang bertambah secara bertahap dalam arah sumbu-y.



(a) Dominasi Lentur (B)



(b) Dominasi Geser (S)

Gambar 1. Pemodelan Numerik Balok: Kondisi Batas, Pembebanan, dan Diskretisasi

Terdapat dua variasi panjang balok: balok dengan panjang 1500 mm yang perilakunya didominasi lentur (notasi: 'B'); dan balok dengan panjang 300 mm yang perilakunya didominasi gaya geser (notasi: 'S'). Sebagai perbandingan, panjang balok yang secara teoretis menghasilkan kegagalan lentur bersamaan dengan kegagalan geser adalah 463,2 mm yang diperoleh dari M_p/V_n penampang balok, dengan M_p adalah momen plastis penampang dan V_n adalah kekuatan geser nominal penampang yang dihitung berdasarkan Pers. 1 dan Pers. 2 (SNI

1729:2020 [10]), yaitu:

$$M_p = F_y Z_x \quad (\text{Pers.1})$$

$$V_n = F_y A_w C_{v1} \quad (\text{Pers.2})$$

dengan:

F_y = tegangan leleh material baja (MPa)

Z_x = modulus penampang plastis (mm^3)

A_w = luas pelat badan = tinggi penampang keseluruhan dikali ketebalan pelat badan (mm^2)

C_{v1} = 1,0 (untuk penampang dengan pelat badan kompak)

Ketidaksempurnaan penampang diaplikasikan pada masing-masing panjang balok, dengan notasi sesuai nomor tipe ketidaksempurnaan pada Tabel 1. Nilai penyimpangan setiap tipe ditetapkan sama dengan nilai maksimum dalam batas toleransi. Khusus untuk balok tanpa ketidaksempurnaan penampang, notasi pemodelan diberikan kode '0'. Tabel 2 menjabarkan detail variasi model yang dilakukan.

Tabel 2. Detail Variasi Model

Model	Kode	Ketidaksempurnaan
Dominasi lentur, $L = 1500$ mm	B-0	Tanpa ketidaksempurnaan
	B-1	Tipe-1
	B-2	Tipe-2
	B-3	Tipe-3
	B-4	Tipe-4
	B-5	Tipe-5
	B-6	Tipe-6
Dominasi geser, $L = 300$ mm	S-0	Tanpa ketidaksempurnaan
	S-1	Tipe-1
	S-2	Tipe-2
	S-3	Tipe-3
	S-4	Tipe-4
	S-5	Tipe-5
	S-6	Tipe-6

3. Hasil Analisis Numerik

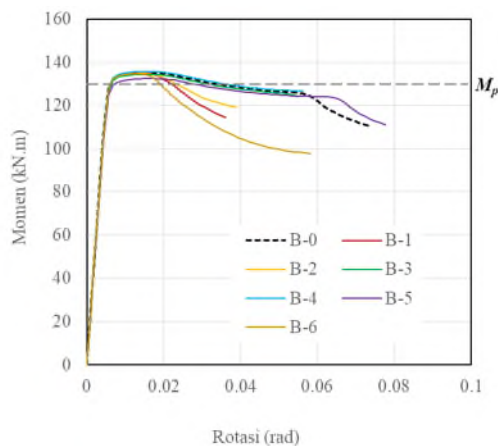
Perilaku lentur dan geser balok dengan ketidaksempurnaan penampang dalam batas toleransi dievaluasi untuk aspek kekuatan, deformasi, dan sebaran kelelahan pada penampang pada kondisi ultimit. Kondisi ultimit didefinisikan sebagai kondisi saat batas regangan sebesar 0,18 tercapai pada penampang, yang diindikasikan

dengan warna merah pada kontur nilai regangan plastis ekuivalen (PEEQ). Evaluasi dilakukan terhadap balok yang mengalami dominasi lentur (Balok 'B') dan balok yang mengalami dominasi geser (Balok 'S') secara terpisah.

3.1. Balok 'B': Dominasi Lentur

Pada balok yang didominasi lentur, dampak semua tipe ketidaksempurnaan terhadap kekuatan lentur penampang tidak signifikan, yang ditunjukkan dengan nilai momen maksimum pada kurva hubungan momen vs rotasi hasil analisis numerik (Gambar 2.). Kekuatan lentur semua model balok dapat melampaui kapasitas momen plastis penampang, M_p , dengan rentang kekuatan lentur berkisar antara $1,02M_p \sim 1,05M_p$.

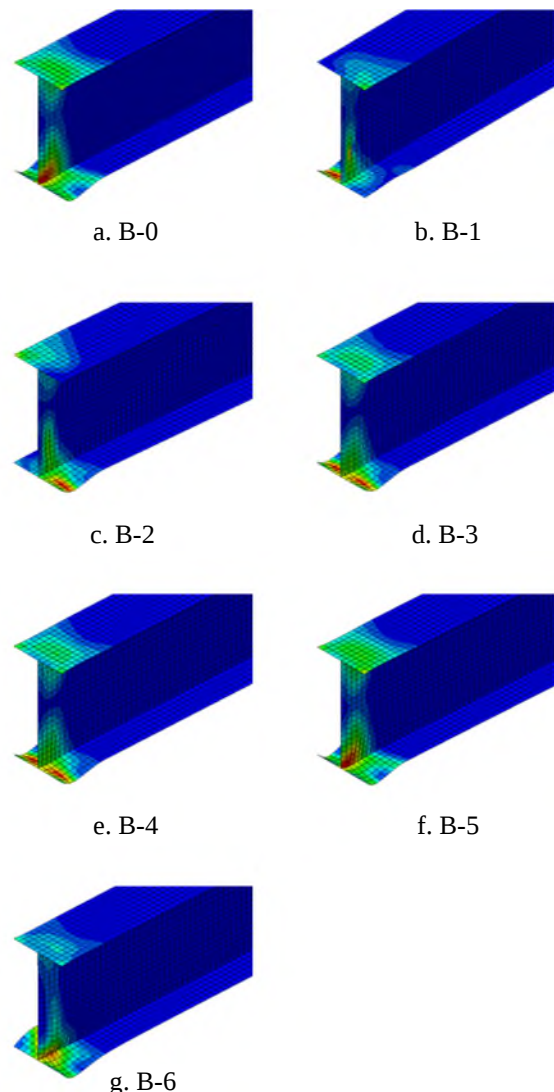
Walaupun tidak memiliki dampak signifikan terhadap kekuatan lentur, ketidaksempurnaan penampang berpengaruh terhadap penurunan kapasitas rotasi dan daktilitas balok dalam menahan lentur. Rasio daktilitas dihitung sebagai rasio antara rotasi pada kondisi ultimit terhadap rotasi pada saat kelelahan terjadi pertama kali pada penampang. Rasio daktilitas terendah dialami oleh ketidaksempurnaan Tipe-1 yaitu sebesar 6,47, sedangkan rasio daktilitas tertinggi dihasilkan dari ketidaksempurnaan Tipe-5 yaitu sebesar 13,92. Selain itu, ketidaksempurnaan penampang Tipe-1 dan Tipe-2 menghasilkan kapasitas rotasi balok lebih kecil daripada 0,04 radian. Padahal, nilai rotasi 0,04 radian ini dipersyaratkan pada desain Rangka Momen Khusus sesuai SNI 7860:2020[1].



Gambar 2. Momen vs Rotasi Balok 'B'

Ketidaksempurnaan penampang juga berdampak pada bentuk deformasi penampang pada kondisi ultimit, seperti terlihat pada Gambar 3. Walaupun secara umum terjadi deformasi pada pelat

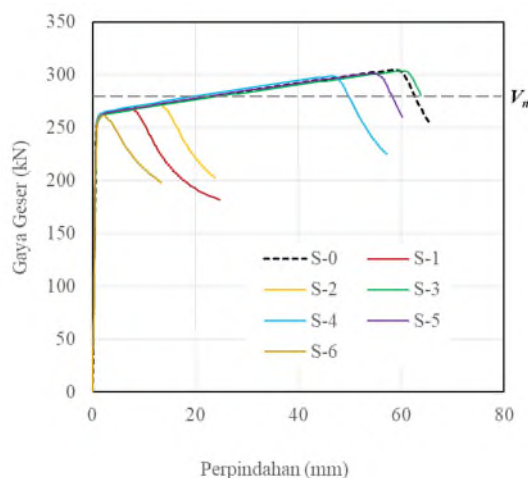
sayap tertekan, yang mengindikasikan tekuk lokal sayap, terdapat dua jenis deformasi, yaitu: deformasi simetris yang dialami oleh balok tanpa ketidaksempurnaan dan balok-balok dengan ketidaksempurnaan Tipe-3, Tipe-4, dan Tipe-5; dan deformasi asimetris pada balok-balok dengan ketidaksempurnaan Tipe-1, Tipe-2, dan Tipe-6. Merujuk pada Gambar 2, terdapat korelasi antara bentuk deformasi asimetris dengan rasio daktilitas yang lebih rendah. Pada balok yang mengalami deformasi asimetris, regangan plastis ultimit terkonsentrasi pada salah satu sisi sayap penampang sehingga kapasitas deformasi penampang secara keseluruhan menjadi terbatas. Selain itu, deformasi asimetris juga dapat menginisiasi ketidakstabilan lateral, khususnya setelah terjadi plastifikasi pada penampang balok.



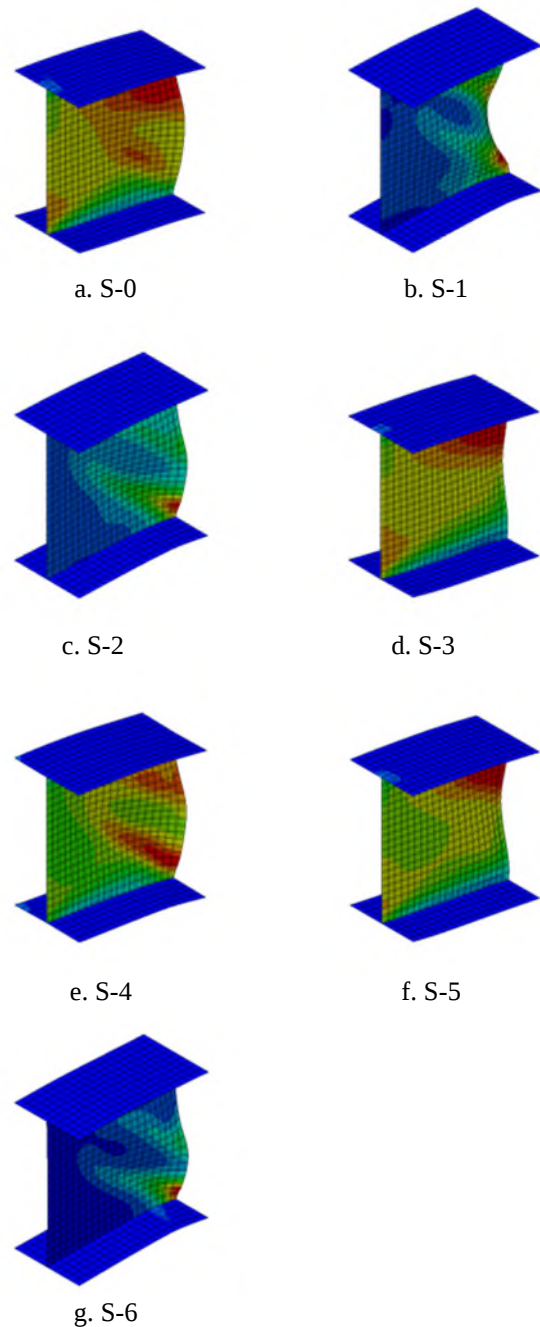
Gambar 3. Deformasi dan Kontur Kelelahan (PEEQ) Balok 'B' pada Kondisi Ultimit

3.2. Balok ‘S’: Dominasi Geser

Berbeda dengan balok yang didominasi lentur, beberapa tipe ketidaksempurnaan penampang berdampak signifikan terhadap kekuatan geser balok, yang ditunjukkan dengan nilai gaya geser maksimum pada kurva hubungan gaya geser vs perpindahan ujung balok hasil analisis numerik (Gambar 4.). Kekuatan geser balok dengan ketidaksempurnaan Tipe-1, Tipe-2, dan Tipe-6 memiliki kekuatan geser lebih rendah daripada kekuatan geser nominal, V_n , rentang kekuatan geser berkisar antara $0,93V_n \sim 0,97V_n$. Jika dibandingkan dengan kekuatan geser balok tanpa ketidaksempurnaan penampang, nilai kekuatan geser ketiga tipe tersebut berkisar antara $0,86V_{maks,0} \sim 0,89V_{maks,0}$, dengan $V_{maks,0}$ adalah gaya geser maksimum yang dapat ditahan balok tanpa ketidaksempurnaan penampang. Secara khusus, pada balok dengan ketidaksempurnaan penampang Tipe-6, penurunan kemampuan penampang dalam memikul gaya geser terjadi segera sesaat setelah perilaku inelastis mulai terbentuk. Hal ini mengindikasikan bahwa ketidaksempurnaan tersebut sangat rentan menghasilkan ketidakstabilan penampang balok akibat geser, terutama jika balok didesain berperilaku inelastis dalam menahan geser. Pada fase elastis dan fase awal kelelahan tidak terdapat perbedaan perilaku geser pada semua model balok. Hal tersebut mengindikasikan ketidaksempurnaan penampang memicu kegagalan prematur setelah penampang memasuki fase inelastis. Kegagalan geser penampang diinisiasi oleh deformasi lokal pelat badan yang semakin besar dan menghasilkan ketidakstabilan penampang jika deformasi balok ditingkatkan.



Gambar 4. Gaya vs Perpindahan Ujung Balok ‘S’



Gambar 5. Deformasi dan Kontur Kelelahan (PEEQ) Balok ‘S’ pada Kondisi Ultimit

Gambar 5 memperlihatkan bahwa pada balok dengan ketidaksempurnaan Tipe-1, Tipe-2, dan Tipe-6, kelelahan pelat badan terkonsentrasi pada area yang terbatas, dibandingkan dengan kelelahan pada tipe lainnya. Pada balok tanpa ketidaksempurnaan penampang dan balok-balok dengan ketidaksempurnaan penampang Tipe-3, Tipe-4, dan Tipe-5, kelelahan pelat badan terjadi pada luasan yang lebih tersebar sehingga kekuatan

geser penampang dapat mencapai nilai V_n yang diprediksi dengan asumsi kelelahan terjadi di seluruh pelat badan penampang. Anomali peningkatan kekuatan geser terjadi pada balok dengan ketidaksempurnaan Tipe-3, yaitu penampang dengan pelat sayap melengkung ke arah dalam. Pada penampang tersebut, pelat sayap memiliki komponen proyeksi dalam arah vertikal yang berkontribusi terhadap kekuatan geser penampang balok.

3.3. Rekapitulasi Hasil Evaluasi

Hasil evaluasi numerik untuk balok-balok yang didominasi lentur dan geser diringkas dalam Tabel 3. Pada balok yang didominasi lentur, ketidaksempurnaan penampang yang menghasilkan bentuk sayap asimetris terhadap sumbu lemah penampang dapat menurunkan kapasitas deformasi balok. Hal tersebut disebabkan penampang yang asimetris cenderung mengalami deformasi lateral yang menyebabkan salah satu sisi sayap mengalami tekuk lokal yang lebih besar.

Tabel 3. Rekapitulasi Dampak Ketidaksempurnaan Penampang

Ketidaksempurnaan penampang	Lentur	Geser
Tipe-1	Kapasitas rotasi dan daktilitas terbatas (kurang dari ketentuan untuk rangka momen khusus)	Kekuatan kurang dari kekuatan geser nominal, kapasitas deformasi terbatas
Tipe-2	Kapasitas rotasi dan daktilitas terbatas (kurang dari ketentuan untuk rangka momen khusus).	Kekuatan kurang dari kekuatan geser nominal, kapasitas deformasi terbatas
Tipe-3	OK	OK
Tipe-4	OK	OK
Tipe-5	OK	OK
Tipe-6	OK	Kekuatan kurang dari kekuatan geser nominal, kapasitas deformasi terbatas

Pada balok yang didominasi geser, penurunan kekuatan geser terjadi akibat tekuk lokal pada pelat badan. Tekuk tersebut dapat diinisiasi oleh bentuk penampang dengan pelat badan tidak lurus (Tipe-6) atau ujung pelat badan yang memiliki sudut rotasi awal akibat pelat sayap yang tidak tegak lurus pelat badan (Tipe-1 dan Tipe-2).

Tidak semua tipe ketidaksempurnaan berdampak signifikan terhadap perilaku balok yang didominasi lentur atau geser. Ketidaksempurnaan penampang Tipe-3, Tipe-4, dan Tipe-5 dalam batas toleransi, terhadap perilaku lentur dan geser, masih menghasilkan kekuatan yang memadai dengan kriteria tercapainya kekuatan lentur dan geser nominal.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi perilaku balok yang mengalami lentur dan geser, dapat disimpulkan bahwa beberapa tipe ketidaksempurnaan dapat secara signifikan menurunkan kapasitas deformasi dan daktilitas lentur balok dan kekuatan geser balok. Ketidaksempurnaan penampang yang menghasilkan bentuk asimetris terhadap sumbu lemah (Tipe-1 dan Tipe-2) dapat menurunkan kapasitas rotasi dan daktilitas lentur balok. Karena keterbatasan nilai rotasinya, kedua tipe ketidaksempurnaan ini (Tipe-1 dan Tipe-2) tidak dapat digunakan sebagai bagian dari balok pada Rangka Momen Khusus sesuai SNI 7860:2020. Selain itu, kedua tipe ketidaksempurnaan ini (Tipe-1 dan Tipe-2) dan ketidaksempurnaan pelat badan yang tidak lurus (Tipe-6) menurunkan kapasitas deformasi geser balok, bahkan di bawah kekuatan geser nominal penampang. Pelat badan yang tidak lurus atau ujung-ujung pelat badan yang tidak tegak lurus pelat sayap dapat menginisiasi terjadinya tekuk lokal pelat badan dan menurunkan kekuatan geser balok. Beberapa tipe ketidaksempurnaan (Tipe-3, Tipe-4, dan Tipe-5) tidak berdampak signifikan terhadap perilaku lentur dan geser balok. Kajian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi batas toleransi ketidaksempurnaan penampang untuk tipe-tipe yang rentan menurunkan kapasitas deformasi dan kekuatan lentur atau geser balok, khususnya pada penampang yang didesain untuk memenuhi ketentuan-ketentuan seismik.

Daftar Pustaka

- [1] Badan Standardisasi Nasional, Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural

(SNI 1729:2020), 2020.

- [2] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-22), 2022.
- [3] L. Gérard, L. Li, M. Kettler and N. Boissonnade, "Recommendations on The Geometrical Imperfections Definition for The Resistance of I-sections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 162, pp. 1-18, 2019.
- [4] S. Kovacevic, N. Markovic, D. Sumarac and R. Salatic, "Unfavorable Geometric Imperfections in Steel Plate Girders Subjected to Localized Load," *Thin-Walled Structures*, vol. 161, pp. 1-16, 2021.
- [5] A. Rossi, A. de Souza, R. Nicoletti and C. Martins, "The Influence of Structural and Geometric Imperfections on The LDB Strength of Steel-concrete Composite Beams," *Thin-Walled Structures*, no. 1-19, p. 162, 2021.
- [6] S. Shayan, K. Rasmussen and H. Zhang, "On The Modelling of Initial Geometric Imperfections of Steel Frames in Advanced Analysis," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 98, pp. 167-177, 2014.
- [7] R. Stroetmann and S. Fominow, "Equivalent Geometric Imperfections for The LTB-design of Members with I-sections," *Steel Construction*, vol. 15, pp. 213-228, 2022.
- [8] Japanese Standards Association, Dimensions, Mass and Permissible Variations of Hot Rolled Steel Sections (JIS G3192:2008), 2008.
- [9] JFE Steel Corporation, Wide Flange Shapes.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, Ketentuasn Seismik untuk Bangunan Gedung Baja (SNI 7860:2020), 2020.