



Studi Analisis Perilaku Kekakuan Sambungan Balok Kolom Baja Sumbu Minor

Edgard P. S. Lalujan^{#a}, Banu D. Handono^{#b}, Ronny E. Pandaleke^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^aedgard.ph.s.lalujan@gmail.com, ^bbanu2h@unsrat.ac.id, ^cronny_pandaleke@yahoo.com

Abstrak

Perancangan sambungan merupakan aspek kritis dalam struktur baja. Untuk struktur baja dengan profil I/HWF, sambungan terbagi menjadi sambungan sumbu kuat dan sumbu lemah. Kurangnya studi literatur ataupun standar yang meneliti sambungan balok-kolom penahan momen di sumbu minor kolom menjadi alasan pembuatan penelitian ini. Perilaku sambungan balok-kolom sumbu minor diamati dari tiga tipe variasi sambungan penahan gaya momen, yaitu Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*), Sambungan B (*Stub + Haunch*), dan Sambungan C (*Endplate + Haunch*). Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *IDEA Statica* dengan didasarkan metode *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM). Penelitian ini menggunakan metode studi komparatif berdasarkan tiga parameter pembanding utama, yaitu kekakuan, kekuatan, distribusi tegangan dan regangan. Hasilnya menunjukkan bahwa Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*) merepresentasikan kinerja sambungan terbaik dan merupakan satu-satunya sambungan yang terklasifikasi sebagai sambungan Terkekang Penuh (*Fully Restrained*), sedangkan sambungan B dan C terklasifikasi sebagai sambungan Terkekang Sebagian (*Partially Restrained*). Sambungan A berhasil mendistribusikan tegangan dengan baik pada komponen *skin plate*, pelat diafragma dan *flange* kolom, juga sangat meminimalisir tegangan dan regangan pada badan kolom (*Web*). Sebaliknya, pada sambungan B dan C, distribusi tegangan yang besar terjadi pada badan kolom, sehingga kegagalan terjadi pada badan kolom, sebelum sambungan dan elemen baloknya mencapai kekakuan dan kapasitas maksimumnya.

Kata kunci: sambungan balok-kolom baja, sumbu lemah, *box-strengthened*, *haunch*, kekakuan sambungan, CBFEM, *IDEA StatiCa*

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur di Indonesia semakin berkembang, baja menjadi salah satu material yang sudah mulai sering digunakan sebagai struktur utama, di mana perancangan sambungan balok-kolom menjadi salah satu aspek yang paling kritis. Pada penggunaan profil I/HWF, literatur maupun standar desain untuk sambungan penahan momen pada sumbu lemah (*minor axis*) masih sangat terbatas jika dibandingkan dengan sumbu kuat. Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengkaji kondisi ini, seperti Wahyudi et al. (2023) yang menyoroti perilaku sambungan sumbu lemah sebagai sambungan terkekang sebagian (*partially restrained*) yang rotasinya sangat mempengaruhi simpangan struktur global, serta usulan inovasi perkuatan dari Lu et al. (2018) yang menggunakan metode *box strengthened* menggunakan *cover-plate* dan *skin plate* dan Nie et al. (2024) dengan penggunaan *U-shaped connector*. Namun, inovasi perkuatan tersebut masih relatif asing dan jarang diaplikasikan dalam praktik konstruksi lokal. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah literatur dengan mengevaluasi kinerja modifikasi sambungan balok-kolom sumbu minor menggunakan elemen *haunch* yang jauh lebih familiar di Indonesia. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat menjadi landasan ilmiah sekaligus rekomendasi praktis bagi perencana struktur dalam menghasilkan desain sambungan sumbu lemah yang lebih optimal, aman, ekonomis, dan aplikatif di lapangan.

1.2. Rumusan Masalah

Bagaimana perilaku sambungan balok kolom baja sumbu minor dengan beberapa tipe sambungan yang berbeda dalam menahan gaya momen, menggunakan *software Idea Statica*.

1.3 Batasan Perencanaan

1. Profil baja yang digunakan adalah *Wide Flange* (WF) berdasarkan spesifikasi jurnal acuan (Lu et al., 2018), yaitu kolom HW 300×300×10×15 dan balok HN 350×175×7×11 (mutu baja Q235).
2. Analisis menggunakan perangkat lunak *Idea Statica* dengan metode *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM).
3. Hanya meninjau sambungan eksterior (*exterior joint*).
4. Evaluasi fokus pada perilaku sambungan itu sendiri (terlebih khusus komponen pelatnya, tidak difokuskan pada baut dan las) dan tidak memodelkan keseluruhan sistem struktur gedung.
5. Menggunakan 3 Tipe Sambungan penahan Momen pada sumbu lemah kolom, yaitu Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*), Sambungan B (*Stub + Haunch*), dan Sambungan C (*Endplate + Haunch*).
6. Aspek penilaian dari sambungan yang optimal ditinjau berdasarkan metode pelaksanaan konstruksinya.
7. Konfigurasi Baut dan Ketebalan Las sudah dianalisis oleh *software Idea Statica* melalui *Detailing Check* (jarak antar baut, jarak baut ke tepi pelat, dan ketebalan las minimum) dan *Capacity Check* (*tension resistance*, *shear resistance*, *bearing resistance*, *interaction of tension and shear*, dan *weld resistance*) didasarkan persyaratan standar, dalam hal ini menggunakan acuan GB 50017.

1.4 Tujuan Perencanaan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui dan membandingkan kapasitas momen dan perilaku sambungan (kekakuan, kekuatan, distribusi tegangan) antara beberapa detail sambungan haunch untuk sumbu lemah, menentukan konfigurasi sambungan yang paling optimal (dari aspek kekakuan, kekuatan, dan metode pelaksanaan) untuk diaplikasikan pada sumbu lemah kolom baja.

1.5 Manfaat Perencanaan

1. Untuk umum, agar dapat memiliki data perbandingan numerik antara beberapa tipe sambungan balok-kolom pada sumbu lemah kolom serta mendapatkan dasar empiris dan rekomendasi untuk perancangan sambungan sumbu lemah yang memperhitungkan aspek kekakuan dan kinerja.
2. Untuk penulis, menambah pengetahuan dan pemahaman dalam konsep desain sambungan balok-kolom baja sumbu lemah dan dalam menggunakan *software* pemodelan sambungan struktur baja.

2. Metode Perencanaan

Penelitian ini menggunakan metode studi komparatif numerik terhadap 3 tipe sambungan momen balok-kolom pada sumbu lemah kolom sebagai berikut:

2.1. Data Input

- Material: Baja Q235 ($f_y = 235 \text{ MPa}$), Baut 10.9 ($f_{yb} = 936 \text{ MPa}$, $f_{ub} = 1040 \text{ MPa}$), Las E43 ($f_{fw} = 160 \text{ MPa}$).
- Profil: Kolom HW 300×300×10×15, Balok HN 350×175×7×11.
- Konfigurasi Baut: Untuk jumlah dan konfigurasi baut, serta ketebalan las, ditentukan menggunakan pendekatan proporsional desain praktis (*pre-design*) didasarkan pada proporsi studi literatur (Lu et al., 2018) dan praktik lapangan.

- Detail Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*): Menggunakan Haunch dan box strengthened mengacu pada jurnal (skin plate tebal 16 mm, diafragma tebal 12 mm).
- Detail Sambungan B (*Stub + Haunch*): Menggunakan Haunch dan Stub Connection.
- Detail Sambungan C (*Endplate + Haunch*): Menggunakan Haunch dan langsung disambung ke Web kolom dengan sambungan Endplate.

2.2. Data Output

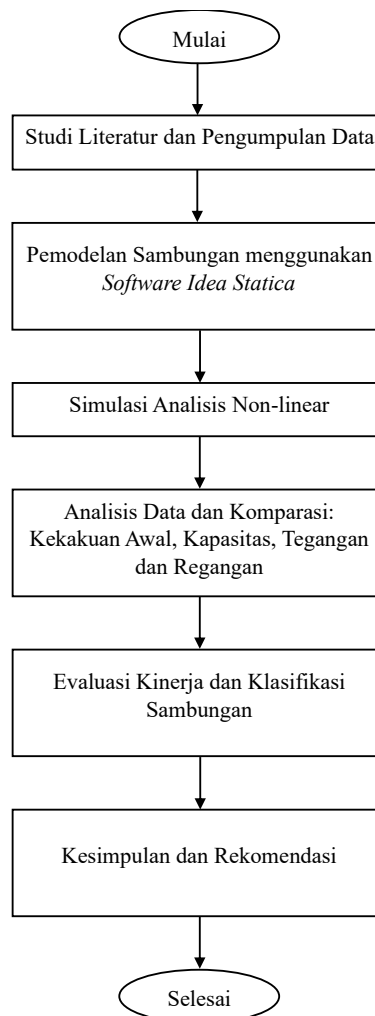
- Parameter Keluaran: Tabel Kekakuan Sambungan (Kekakuan Rotasional Awal ($S_{j,ini}$), Kapasitas Momen ($M_{j,Rd}$), Kapasitas Rotasi (ϕ_c), Diagram Kekakuan (Kurva Momen-Rotasi), Distribusi Tegangan, dan Distribusi Regangan.

2.3. Data Beban

Menggunakan beban desain momen (M_{ED}) sebesar 100 kN-m untuk Sambungan A dan B, serta momen sebesar 50 kN-m untuk Sambungan C. Beban pada Sambungan C disesuaikan (diperkecil) secara proposional guna memastikan perangkat lunak dapat mengobservasi perilaku kekakuan secara utuh sebelum mencapai batas keruntuhan, dikarenakan kapasitas momen sambungan C yang kecil.

2.4. Bagan Alir Perencanaan

Prosedur perencanaan gedung perkuliahan dalam penelitian ini mengikuti Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Perencanaan

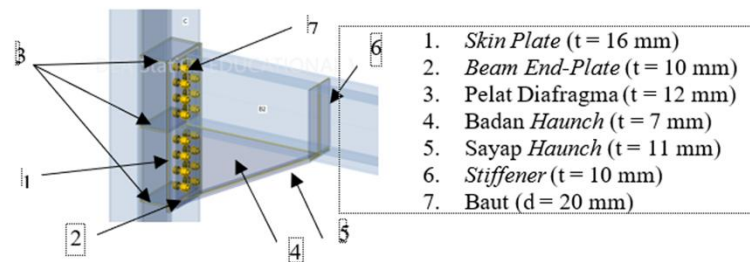
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemodelan Sambungan

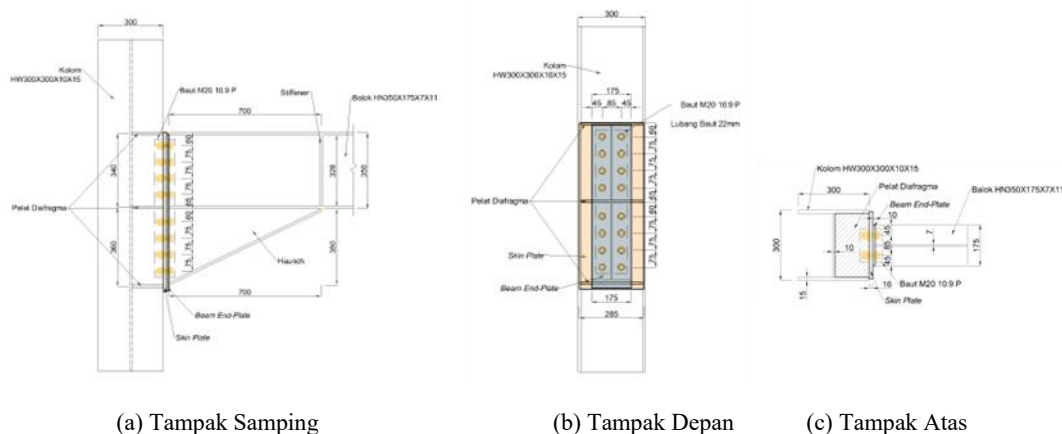
Pemodelan pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *IDEA StatiCa* berbasis metode *Component-Based Finite Element Method* (CBFEM) dengan tiga variasi detail sambungan yang dimodelkan, yaitu:

A. Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*)

Sambungan ini menggunakan *Haunch* dan *box strengthened* mengacu pada jurnal Lu et al. (2018) (*skin plate* tebal 16 mm, diafragma tebal 12 mm). Berikut ini merupakan tabel dan gambar detail model pada *software IDEA Statica*.



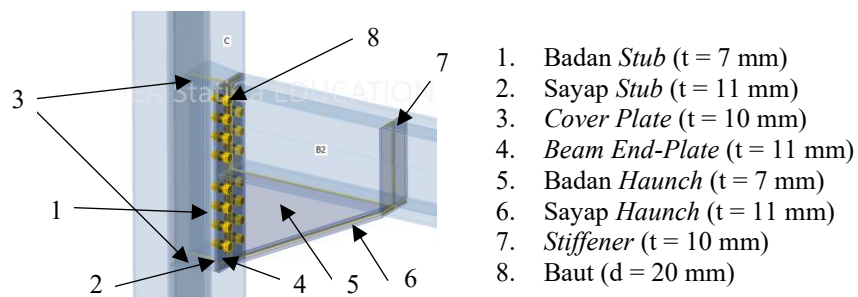
Gambar 2. Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*)



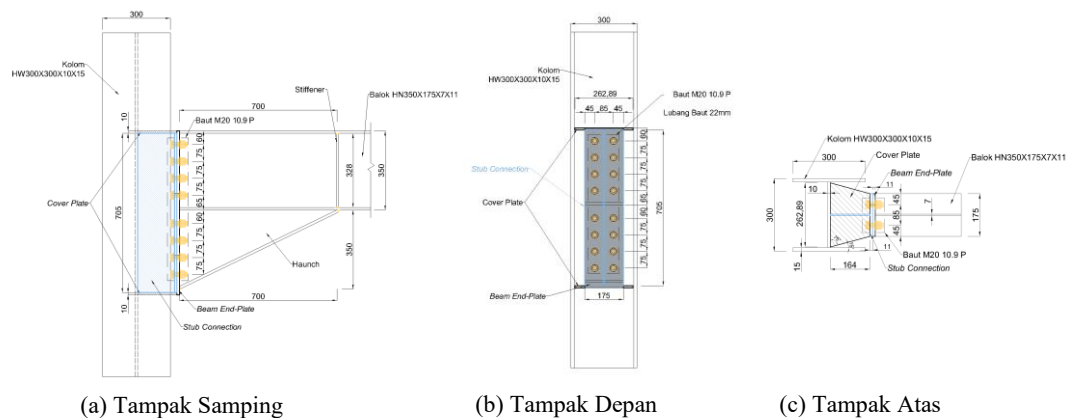
Gambar 3. Detail Sambungan A

B. Sambungan B (*Stub + Haunch*)

Sambungan ini menggunakan *Haunch* dan *Stub Connection* (biasanya profil balok yang dipotong di tengah Web Balok menjadi berbentuk T, kemudian di tutup dengan pelat “*Cover Plate*” di bagian atas dan bawah sebagai penutup). Berikut ini merupakan tabel dan gambar detail model pada *software IDEA Statica*.



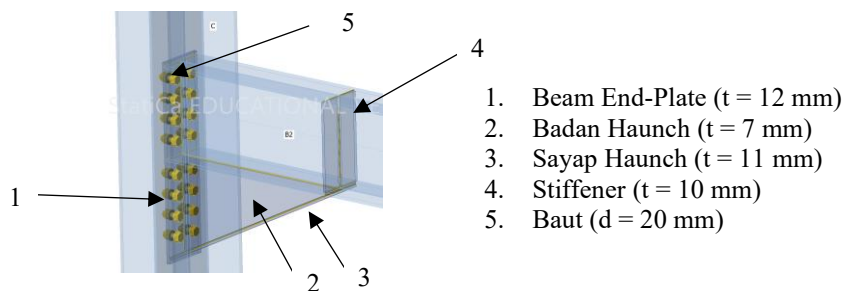
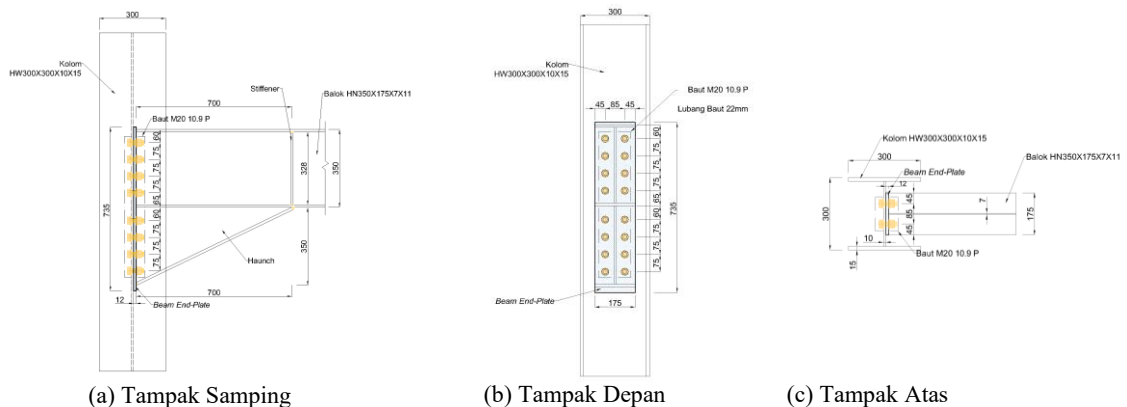
Gambar 4. Sambungan B (*Stub + Haunch*)



Gambar 5. Detail Sambungan B

C. Sambungan C (*Endplate + Haunch*)

Sambungan ini menggunakan *Haunch* dan langsung disambung ke *Web* kolom dengan sambungan *Endplate*. Berikut ini merupakan table dan gambar detail model pada *software IDEA Statica*.

Gambar 6. Sambungan C (*Endplate + Haunch*)

Gambar 7. Detail Sambungan C

3.2 Perhitungan Batas Klasifikasi Kekakuan dengan $S_{j,ini}$ Eurocode

Berdasarkan Eurocode EN 1993-1-8:2005 (5.2.2.5 *Classification boundaries*), kekakuan rotasional awal ($S_{j,ini}$) digunakan untuk mengklasifikasikan sambungan. Batas klasifikasi dihitung dengan rumus:

Zona 1 : Kaku (*Rigid*)

$$S_{j,ini} \geq k_b \frac{EI_b}{L_b}$$

Dengan:

- $k_b = 8$ untuk rangka di mana sistem pengaku mengurangi perpindahan horizontal setidaknya 80%
- $k_b = 25$ untuk rangka lainnya, dengan syarat bahwa pada setiap tingkat $K_b/K_c \geq 0,1$

Zona 2: Semi-Kaku (*Semi Rigid*)

Semua sambungan di zona 2 harus diklasifikasikan sebagai semi-kaku. Sambungan di zona 1 atau 3 juga boleh diperlakukan sebagai semi-kaku (bersifat opsional).

Zona 3: Sendi (*Nominally Pinned*)

$$S_{j,ini} \leq 0.5EI_b/L_b$$

Untuk rangka di mana $K_b/K_c < 0,1$, sambungan harus diklasifikasikan sebagai semi-kaku.

Keterangan:

K_b adalah nilai rata-rata I_b/L_b untuk semua balok di bagian atas tingkat tersebut;

K_c adalah nilai rata-rata I_c/L_c untuk semua kolom pada tingkat tersebut;

I_b adalah momen inersia penampang balok;

I_c adalah momen inersia penampang kolom;

L_b adalah bentang balok (dari pusat ke pusat kolom);

L_c adalah tinggi tingkat kolom.

- $E = 206.000 \text{ MPa}$ (GB 50017 - Table 4.4.8 *Physical performance index of steels and steel castings*)

- $I_b = 13.502 \text{ cm}^4$ (IDEA Statica – Material Characteristic)

- $I_c = 6.7532 \text{ cm}^4$ (IDEA Statica – Material Characteristic)

- $L_b = 1500 \text{ mm}$

- $L_c = 3000 \text{ mm}$

- Perhitungan K_b dan K_c :

$$K_b = \frac{I_b}{L_b} = \frac{135.020.000 \text{ mm}^4}{1500 \text{ mm}} = 90.013,33 \text{ mm}^3$$

$$K_c = \frac{I_c}{L_c} = \frac{67.532.000 \text{ mm}^4}{3000 \text{ mm}} = 22.510,67 \text{ mm}^3$$

Maka,

$$\frac{K_b}{K_c} = \frac{90.013,33}{22.510,67} = 3,9987 > 0,1$$

Sehingga, diperoleh nilai batas kekakuan sebagai berikut:

Zona 1 : Kaku (*Rigid*)

$k_b = 25$ (diasumsikan struktur *unbraced*, juga hasil perhitungan $\frac{K_b}{K_c} > 0,1$)

$$S_{j,ini} > S_{j,R} = k_b \frac{EI_b}{L_b} = 25 \times \frac{206.000 \times 135.020.000}{1500} = 463568666666,6 \text{ Nmm/rad}$$

$$S_{j,ini} > S_{j,R} = 463568666666,6 \times 10^{-9} \text{ MNm/rad} = 463,568 \text{ MNm/rad}$$

Zona 2 : Semi-Kaku (*Semi-Rigid*)

$$S_{j,P} < S_{j,ini} < S_{j,R}$$

Zona 3 : Simple (*Pinned*)

$$S_{j,ini} < S_{j,P} = 0,5 \frac{EI_b}{L_b} = 0,5 \frac{206.000 \times 135.020.000}{1500} = 9271373333,3 \text{ Nmm/rad}$$

$$S_{j,ini} < S_{j,P} = 9271373333,3 \times 10^{-9} \text{ MNm/rad} = 9,27 \text{ MNm/rad}$$

3.3 Data Hasil Simulasi Analisis Idea Statica

Dalam analisis kekakuan sambungan, *IDEA Statica* memberikan beberapa *output* sebagai hasil analisisnya. Beberapa *output* utama dari *IDEA Statica* adalah Tabel Kekakuan, Diagram Kekakuan, dan Distribusi Tegangan dan Regangan.

A. Output Data IDEA Statica – Tabel Kekakuan

Tabel kekakuan berisi beberapa parameter (momen, kekakuan rotasi, sudut rotasi, dll) yang dapat menggambarkan kekakuan sambungan tersebut.

- Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*)

Tabel 1. Tabel Analisis Kekakuan Sambungan A - *IDEA Statica*

Rotational stiffness									
Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	Φ_c [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B2	My	LE1	124.6	512.0	8.5	1.50	463.6	9.3	Fully restrained

- Sambungan B (*Stub + Haunch*)

Tabel 2. Tabel Analisis Kekakuan Sambungan B - *IDEA Statica*

Rotational stiffness									
Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	Φ_c [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B2	My	LE1	105.9	248.2	6.0	1.50	463.6	9.3	Partially restrained

- Sambungan C (*Endplate + Haunch*)

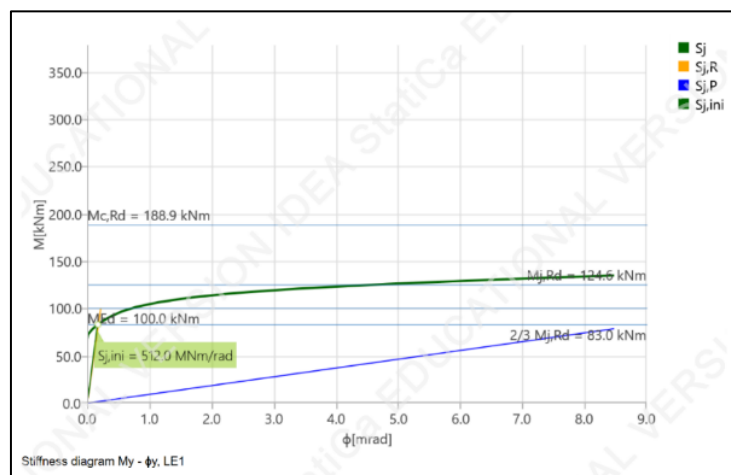
Tabel 3. Tabel Analisis Kekakuan Sambungan C - *IDEA Statica*

Rotational stiffness									
Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	Φ_c [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B2	My	LE1	58.3	12.4	13.8	1.50	463.6	9.3	Partially restrained

B. Output Data IDEA Statica – Diagram Kekakuan

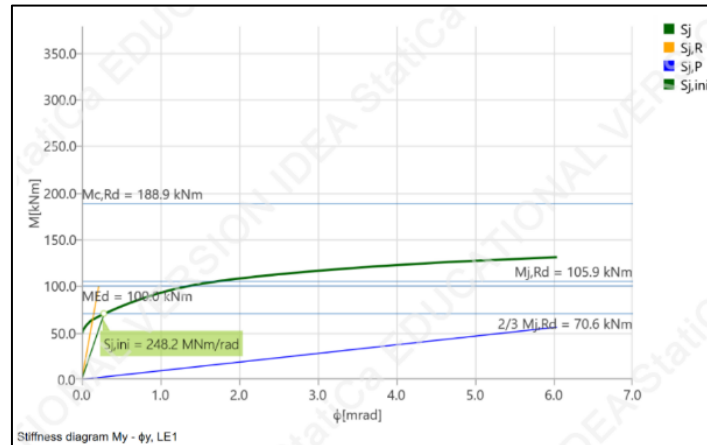
Diagram kekakuan, merupakan gambaran hubungan antara momen dan rotasi sambungan. Diagram ini digambarkan dengan Momen Lentur (M) pada sumbu Y dan Rotasi Relatif (ϕ) pada sumbu X.

- Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*)



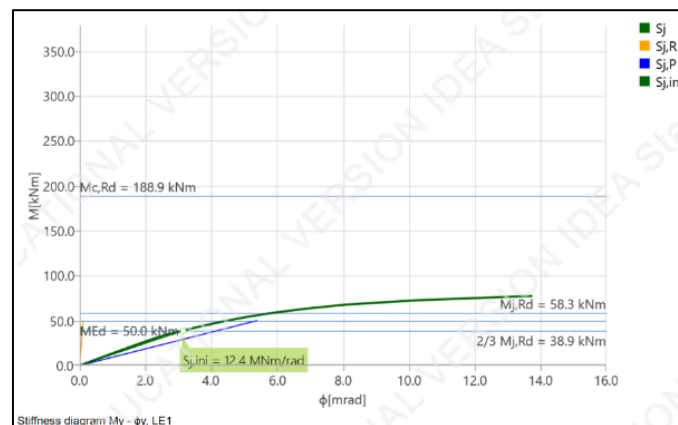
Gambar 8. Diagram Kekakuan Sambungan A – *IDEA Statica*

- Sambungan B (*Stub + Haunch*)



Gambar 9. Diagram Kekakuan Sambungan B – *IDEA Statica*

- Sambungan C (*Endplate + Haunch*)



Gambar 10. Diagram Kekakuan Sambungan C – *IDEA Statica*

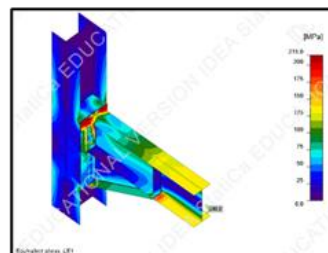
C. Output Data *IDEA Statica* – Distribusi Tegangan & Regangan

Pola distribusi Tegangan dan Regangan digambarkan dengan visualisasi menggunakan warna-warna yang menggambarkan besarnya suatu tegangan di lokasi tertentu pada sambungan yang dianalisis.

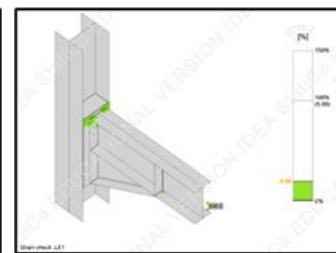
- Sambungan A (*Box Strengthened + Haunch*)

	Status	Item	f [MPa]	t _p [mm]	Loads	σ [MPa]	σ _{pl} [%]	σ _{eqd} [MPa]
+	✓	C-bfl 1	215.0	15.0	LE1	109.3	0.0	0.0
+	✓	C-tfl 1	215.0	15.0	LE1	109.1	0.0	0.0
+	✓	C-w 1	215.0	10.0	LE1	38.2	0.0	0.0
>	+	B2-bfl 1	215.0	11.0	LE1	211.6	0.0	0.0
+	✓	B2-tfl 1	215.0	11.0	LE1	215.0	0.0	0.0
+	✓	B2-w 1	215.0	7.0	LE1	159.9	0.0	0.0
+	✓	SEP1a	215.0	16.0	LE1	217.0	1.0	151.4
+	✓	SEP1b	215.0	10.0	LE1	216.2	0.6	151.4
+	✓	WID1a	215.0	7.0	LE1	107.5	0.0	0.0
+	✓	WID1b	215.0	11.0	LE1	113.5	0.0	0.0
+	✓	STIFF1a	215.0	12.0	LE1	49.3	0.0	0.0
+	✓	STIFF1b	215.0	12.0	LE1	107.1	0.0	0.0
+	✓	STIFF2	215.0	12.0	LE1	83.5	0.0	0.0
+	✓	STIFF3a	215.0	10.0	LE1	80.1	0.0	0.0
+	✓	STIFF3b	215.0	10.0	LE1	80.1	0.0	0.0

(a) Tabel Kontrol



(b) Variasi Tegangan



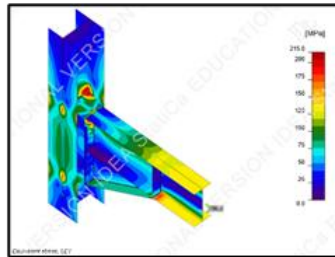
(c) Visualisasi Regangan

Gambar 11. Distribusi Tegangan & Regangan Sambungan A

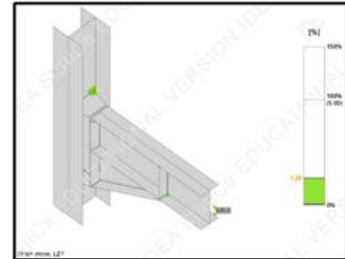
- Sambungan B (*Stub + Haunch*)

	Status	Item	f [MPa]	t _p [mm]	Loads	σ [MPa]	ϵ_{ps} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	
>	+	✓	C-bfl 1	215.0	15.0	LE1	156.4	0.0	0.0
	+	✓	C-tfl 1	215.0	15.0	LE1	156.3	0.0	0.0
	+	✓	C-w 1	215.0	10.0	LE1	215.6	0.3	0.0
	+	✓	B2-bfl 1	215.0	11.0	LE1	211.5	0.0	0.0
	+	✓	B2-tfl 1	215.0	11.0	LE1	137.3	0.0	0.0
	+	✓	B2-w 1	215.0	7.0	LE1	183.9	0.0	0.0
	+	✓	STUB1 1	215.0	10.0	LE1	217.6	1.3	0.0
	+	✓	STUB1 2	215.0	10.0	LE1	217.5	1.2	0.0
	+	✓	STUB1 3	215.0	7.0	LE1	197.2	0.1	0.0
	+	✓	STUB1-EPa	215.0	11.0	LE1	215.2	0.1	91.3
	+	✓	STUB1-EPb	215.0	11.0	LE1	215.2	0.1	91.3
	+	✓	WID1a	215.0	7.0	LE1	107.4	0.0	0.0
	+	✓	WID1b	215.0	11.0	LE1	105.4	0.0	0.0
	+	✓	STIFF1a	215.0	10.0	LE1	79.9	0.0	0.0
	+	✓	STIFF1b	215.0	10.0	LE1	79.9	0.0	0.0

(a) Tabel Kontrol



(b) Variasi Tegangan



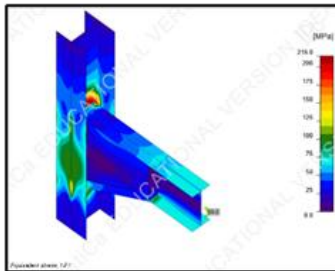
(c) Visualisasi Regangan

Gambar 12. Distribusi Tegangan & Regangan Sambungan B

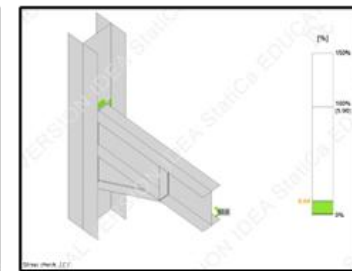
- Sambungan C (*Endplate + Haunch*)

	Status	Item	f [MPa]	t _p [mm]	Loads	σ [MPa]	ϵ_{ps} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	+	✓ C-bfl 1	215.0	15.0	LE1	108.5	0.0	0.0
	+	✓ C-tfl 1	215.0	15.0	LE1	108.3	0.0	0.0
	+	✓ C-w 1	215.0	10.0	LE1	216.3	0.6	108.6
	+	✓ B2-bfl 1	215.0	11.0	LE1	108.7	0.0	0.0
	+	✓ B2-tfl 1	215.0	11.0	LE1	121.3	0.0	0.0
	+	✓ B2-w 1	215.0	7.0	LE1	73.2	0.0	0.0
	+	✓ STIFF1a	215.0	10.0	LE1	39.0	0.0	0.0
	+	✓ STIFF1b	215.0	10.0	LE1	39.0	0.0	0.0
	+	✓ EP1	215.0	12.0	LE1	203.9	0.0	108.6
	+	✓ WID2a	215.0	7.0	LE1	52.5	0.0	0.0
	+	✓ WID2b	215.0	11.0	LE1	136.4	0.0	0.0

(a) Tabel Kontrol



(b) Variasi Tegangan



(c) Visualisasi Regangan

Gambar 13. Distribusi Tegangan & Regangan Sambungan C

3.4 Analisis Data dan Komparasi

Berdasarkan data numerik kekakuan dan kapasitas, beserta visualisasi distribusi tegangan-regangan yang telah dipaparkan sebelumnya, dilakukan analisis komparatif dari ketiga tipe sambungan untuk mengevaluasi perilaku dan kinerja ketiga variasi sambungan tersebut. Komparasi difokuskan pada tiga parameter utama, yaitu kekakuan, kapasitas momen, dan distribusi tegangan-regangan.

Tabel 4. Komparasi Perilaku Sambungan

	Sambungan A	Sambungan B	Sambungan C
Kekakuan Awal ($S_{j,ini}$) (MNm/rad)	512.0	248.2	12.4
Klasifikasi Kekakuan	Fully Restrained	Partially Restrained	Partially Restrained
Kapasitas Momen Desain Sambungan ($M_{j,Rd}$) (kNm)	124.6	105.9	58.3
Kapasitas Rotasi (ϕ_c): (mrad)	8.5	6.0	13.8

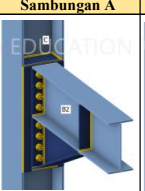
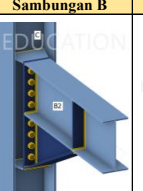
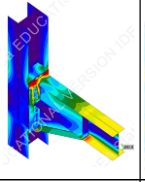
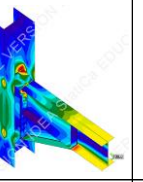
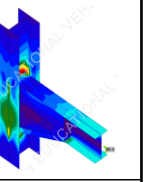
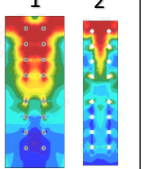
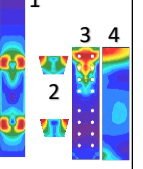
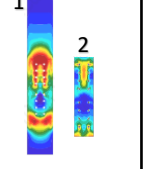
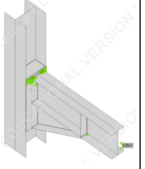
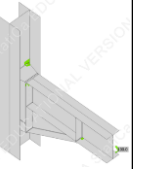
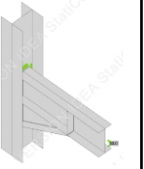
- **Kekakuan:**

Sambungan A merupakan sambungan dengan nilai kekakuan rotasional awal tertinggi sebesar 512 MNm/rad, juga merupakan satu-satunya sambungan pada penelitian ini yang terklasifikasi sebagai sambungan Terkekang Penuh (*Fully Restrained*). Sambungan B mengalami penurunan yang cukup signifikan pada kekakuan sambungannya, yaitu sebesar 248.2 MNm/rad. Penurunan ini setara dengan penurunan kekakuan sekitar 51% jika dibandingkan dengan Sambungan A. Sambungan B diklasifikasikan sebagai sambungan Terkekang Sebagian karena nilai kekakuan awal sambungan ini ($S_{j,ini}$) sebesar 248.2 MNm/rad berada di antara batas kekakuan Rigid ($(S_{j,R}) = 463.6$ MNm/rad) dan batas kekakuan Pinned ($(S_{j,P}) = 9.3$ MNm/rad). Sambungan C mengalami penurunan yang sangat signifikan pada kekakuan sambungannya, yaitu sebesar 12.4 MNm/rad. Penurunan ini setara dengan penurunan kekakuan sekitar 97% jika dibandingkan dengan Sambungan A. Sambungan C diklasifikasikan juga sebagai sambungan Terkekang Sebagian.

- **Kapasitas Momen:**

Sambungan dengan pekuatan *box-strengthened* ini menghasilkan kapasitas momen terbesar dari ketiga jenis sambungan yang dimodelkan, yaitu sebesar 124.6 kNm. Perkuatan ini meminimalisir konsentrasi tegangan pada badan kolom, sehingga sambungan mampu mencapai kekuatan yang jauh lebih besar sebelum mengalami leleh. Pada model sambungan menggunakan *Stub* ini, kapasitas momen yang dihasilkan adalah 105.9 kNm. Kapasitas ini masih termasuk besar dan jika dibandingkan dengan Sambungan A, terjadi penurunan kapasitas sekitar 15%. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun elemen *Stub* memiliki kekakuan yang baik, kekuatan total sambungan dibatasi oleh kegagalan lokal pelat badan (*web*) kolom tempat *Stub* tersebut dilas. Sambungan tanpa perkuatan ini (*End-plate* langsung ke *Web*) menunjukkan kapasitas momen paling kecil, yaitu sebesar 58.3 kNm. Terjadi penurunan kekuatan yang sangat signifikan dibandingkan dengan sambungan A dan B, penurunan sekitar 53% dibandingkan kapasitas Sambungan A dan sekitar 45% dibandingkan sambunga B. Rendahnya tahanan momen ini dikarenakan kegagalan pada badan (*web*) kolom pada sumbu lemah yang memiliki kapasitas momen sangat kecil dibandingkan sambungan atau elemen baloknya.

Tabel 5. Komparasi Distribusi Tegangan dan Regangan

	Sambungan A	Sambungan B	Sambungan C
			
TEGANGAN			
LOKASI TEGANGAN TERBESAR			
	1. Skin-Plate 2. Beam End-plate	1. Web Column 2. Cover Plate 3. Stub's Flange 4. Stub's Web	1. Web Column 2. Beam End-plate
REGANGAN			

- **Distribusi Tegangan dan Regangan:**

Sambungan A menunjukkan distribusi tegangan yang paling efektif dalam melindungi elemen struktur utama (badan kolom / *Web*). Tegangan tarik dari balok didistribusikan ke *Skin Plate* dan *Beam End-plate*, kemudian didistribusikan ke *flange* kolom dan pelat diafragma. Dengan distribusi tegangan seperti itu badan (*web*) kolom sumbu lemah hampir tidak menerima beban signifikan. Regangan plastis yang terjadi pada sambungan ini sebesar 0.98%, dan berlokasi pada *skin plate*. Hal ini baik dinilai baik dikarenakan deformasi terjadi pada komponen perkuatan tambahan, bukan pada elemen utama kolom. Pada Sambungan B, pola distribusi tegangan menunjukkan adanya masalah konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang terpusat pada area pertemuan kaki *Cover Plate* dengan badan kolom. Perkuatan *Stub* cukup kuat dan kaku untuk menahan gaya momen, namun dikarenakan tidak terhubung dengan *flange* kolom, gaya tersebut didistribusikan ke badan kolom yang menjadi tempat menumpu dari sambungan *Stub* ini. Sambungan B mencatatkan nilai regangan plastis tertinggi (1.28%). Sambungan C memperlihatkan perilaku komponen sambungan dan elemen balok yang tidak bekerja maksimal. Tegangan terdistribusi luas pada pelat badan kolom (*Web*) dikarenakan tidak adanya perkuatan yang diterapkan. Oleh sebab itu, sambungan *end-plate* balok secara langsung menarik badan kolom tersebut. Sementara badan kolom telah leleh, elemen balok dan *haunch* belum mencapai kondisi leleh. Ini menunjukkan bahwa kapasitas sambungan dibatasi sepenuhnya oleh kekuatan badan kolom, sehingga kekuatan dan kekakuan sambungan tidak dapat dimanfaatkan.

- **Kemudahan Pelaksanaan Konstruksi (*Constructability*)**

Desain sambungan yang kuat dan kaku harus dibarengi dengan pertimbangan kemudahan dalam pelaksanaannya di lapangan (*constructability*). Tingkat kesulitan pemasangan akan berdampak langsung pada biaya, durasi proyek, dan kualitas konstruksi. Berdasarkan evaluasi metode pelaksanaan komponen sambungan, berikut adalah komparasi pelaksanaan untuk ketiga variasi sambungan.

Tabel 6. Komparasi Kemudahan Pelaksanaan Konstruksi (*Constructability*)

Parameter Tinjauan	Sambungan A (Box-Strengthened)	Sambungan B (Stub Baut)	Sambungan C (End-plate Web)
Item Pekerjaan Fabrikasi	Tinggi. Potong pelat untuk diafragma dan <i>skin plate</i> , las 3 diafragma & <i>skin plate</i> pada kolom, serta pengelasan mur tanam (<i>welded nuts</i>).	Menengah. Profil I dipotong menjadi T, potong pelat <i>cover plate</i> , dan las perakitan <i>stub</i> ke kolom.	Rendah. Hanya memotong pelat <i>end-plate</i> dan mengelas <i>end-plate</i> pada balok.
Ruang Kerja & Akses Alat	Luas di depan <i>skin plate</i> , namun tidak ada akses di belakang <i>skin plate</i> untuk menahan mur.	Luas. Alat pengencang baut bebas beroperasi di luar sayap kolom.	Sempit. Alat pengencang baut terhalang oleh sayap kolom.
Presisi Baut	Sangat Ketat. Lubang baut harus 100% presisi dengan mur tanam.	Fleksibel. Mudah disesuaikan dengan kondisi lapangan.	Ketat. Toleransi penyesuaian terbatas akibat terhimpit sayap kolom.
Kesimpulan	Berisiko & Mahal. Menuntut presisi mutlak.	Paling Praktis & Efisien. Pemasangan paling mudah dan cepat.	Tidak Ergonomis. Sangat menyulitkan pekerja karena sempitnya ruang kerja.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis perilaku kekakuan sambungan balok-kolom baja sumbu minor menggunakan *software IDEA StatiCa*, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan perkuatan *box-strengthened* pada sambungan A terbukti efektif dalam mengatasi kelemahan dari tipe sambungan balok-kolom sumbu lemah yang memiliki kekakuan dan kapasitas momen yang relatif kecil. Hal ini dibuktikan dengan hasil analisis perilaku dan kinerja sambungan A yang menunjukkan hasil terbaik dari segi kekakuan awal dan juga kapasitas momen sambungannya. Sambungan A juga merupakan satu-satunya sambungan pada penelitian ini yang terklasifikasi sebagai sambungan Terkekang Penuh (*Fully Restrained*).
2. Sambungan A juga merupakan sambungan terbaik dari segi distribusi tegangan dan regangannya. Hal ini dikarenakan gaya yang bekerja pada sambungan ini berhasil didistribusikan dengan baik pada komponen sambungannya dan tidak membebani badan kolom (*Web*), melainkan menyalurkan gayanya ke *flange* kolom, sehingga mendukung aturan "*Strong Column – Weak Beams*".
3. Hasil analisis pada sambungan C mengonfirmasi bahwa sambungan momen yang disambung secara langsung pada sumbu lemah kolom (*Web*), tanpa adanya perkuatan, merupakan desain yang kurang tepat. Tegangan yang terkonsentrasi pada badan kolom (*Web*), menyebabkan kegagalan terjadi pada badan kolom tersebut sebelum sambungan atau elemen struktur baloknya mencapai kondisi ultimit. Hal itu disebabkan oleh kekakuan dan kapasitas momen badan kolom jauh lebih kecil dibandingkan sambungannya. Sehingga, kekakuan dan kapasitas sambungan turun secara drastis.

5. Saran

1. Berhubung dengan tingginya tingkat kesulitan pelaksanaan konstruksi (*constructability*) sambungan A, alternatif terbaik untuk desain sambungan momen balok-kolom sumbu minor adalah tipe sambungan B.
2. Sambungan A disarankan untuk diteliti lagi dengan modifikasi pada sambungan baut *end-plate* yang diganti menjadi sistem sambungan las langsung. Sayap balok dan badan balok disambungkan secara langsung ke *skin plate* kolom.
3. Nilai kekakuan awal (*Initial Rotational Stiffness*) bisa dimasukkan dalam analisis struktur global pada *software* untuk melihat perilaku struktur bangunan global, seperti drift tingkat (*story drift*) ataupun simpangan lateral (*story displacement*).
4. Perlu dilakukan studi parametrik lebih lanjut mengenai pengaruh ketebalan *skin plate* dan dimensi *haunch* terhadap efisiensi sambungan A, untuk mendapatkan desain yang paling optimum dari segi berat material dan biaya fabrikasi.
5. Hasil analisis numerik ini sebaiknya divalidasi dengan pengujian eksperimental di laboratorium untuk mengonfirmasi perilaku sambungan, kapasitas momen dan mode kegagalan yang terprediksi oleh perangkat lunak.

Referensi

- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). *ANSI/AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, IL: AISC.
- Badan Standardisasi Nasional. 2020. *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, SNI 729:2020. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- European Committee for Standardization (CEN). (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints (EN 1993-1-8:2005)*. Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization (CEN). (2006). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements (EN 1993-1-5:2006)*. Brussels: CEN.
- Lu, Linfeng, Yinglu Xu, Huixiao Zheng, and James BP Lim. "Cyclic response and design procedure of a weak-axis cover-plate moment connection." *Steel Compos. Struct* 26, no. 3 (2018): 329-345.
- Lu, Linfeng, Yinglu Xu, and James BP Lim. "Mechanical performance of a new I-section weak-axis column bending connection." *Steel Compos. Struct* 26, no. 1 (2018): 31-44.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. (2017). *GB 50017-2017: Standard for design of steel structures*. China Architecture & Building Press.
- Nie, Shaofeng, Siyuan Chen, Weijie Wu, Xin Jiang, Shuo Wang, Yongzhen Lin, and Mengxue Liu. "An

Investigation on the Seismic Behavior of the End-Plate Connection between a Steel Beam and the Weak-Axis of an H-Shaped Column Using a U-Shaped Connector." *Buildings* 14, no. 4 (2024): 1087.

Wahyudi, Eko, Nawir Rasidi, and Bobby Asukmajaya. "KINERJA STRUKTUR BAJA DENGAN SAMBUNGAN PARTIALLY RESTRAINED PADA SUMBU LEMAH KOLOM." *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)* 4, no. 4 (2023): 248-255.