

ANALISIS MOMEN-ROTASI SAMBUNGAN *HAUNCHED GUSSET PLATE* BALOK KOLOM BAJA CANAI DINGIN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Irwandra Septiadi^{1*}, Kiagus Muhammad Aminuddin², Muhammad Firdaus³, Bazar Asmawi¹, Verinazul Septriasyah⁴, Adji Utama⁴

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti

²Program Studi Profesi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang

⁴Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang

*E-mail : irwandra@univ-tridinanti.ac.id

Abstract

The increasing use of cold-formed steel (CFS) in building structural systems requires an accurate understanding of connection behavior, particularly beam–column connections which have an important role in transferring moment and rotation. One connection type that has been developed is the haunched gusset plate (HGP), which is designed to improve stress distribution and rotational performance of the joint. This study aims to analyze the moment–rotation characteristics of HGP connections in CFS beam–column structures with double channel sections using a numerical approach based on the Finite Element Method (FEM) implemented in ANSYS Workbench. The numerical model was developed based on the IJT-BGJ-9 experimental specimen from previous studies as a validation reference, considering material nonlinearity, boundary conditions, contact interaction, and explicit bolt modeling. The analysis focuses on the evaluation of joint strength capacity, stiffness capacity, and ductility capacity in accordance with the provisions of BS EN 1993-1-8. The results show that the FEM moment–rotation curve has very good agreement with the experimental results, with a rotation difference of 0,43% and a final stiffness difference of 1,30%. The HGP connection is classified as a semi-rigid, partial-strength, and ductile joint. These findings demonstrate that the developed FEM model is able to accurately represent the actual behavior of the connection and can be used as a reliable and efficient evaluation tool for the analysis and design of cold-formed steel frame connections.

Keywords : *Cold-Formed Steel, Beam–Column Connection, Moment–Rotation Behavior, Finite Element Analysis, Semi-Rigid Connection*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi dalam 10 tahun terakhir mendorong penerapan sistem struktur yang menekankan efisiensi material, kemudahan pelaksanaan, serta kinerja struktural yang handal (Sutama dkk., 2024). *Cold Formed Steel* (CFS) banyak digunakan dalam sistem rangka bangunan karena memiliki rasio kekuatan yang tinggi serta kemudahan dalam proses fabrikasi dan pemasangan di lapangan. Firdaus, dkk. (2020) menyebutkan penerapan CFS pada bangunan hunian dan gedung bertingkat rendah hingga

menengah menghasilkan material praktis, sistem pemasangan yang mudah, serta ramah lingkungan. Hal tersebut menyebabkan meningkatnya kebutuhan kajian mengenai perilaku elemen struktur dan sambungan secara analitis maupun eksperimental.

Elemen struktur CFS memiliki ketebalan relatif tipis sehingga respons struktur sangat dipengaruhi oleh deformasi lokal dan mekanisme tekuk, khususnya pada daerah sambungan. Sambungan balok–kolom berperan penting dalam menyalurkan momen lentur dan rotasi antar elemen, sehingga secara

langsung mempengaruhi stabilitas dan kapasitas rangka struktur (Aminuddin dkk, 2019). Oleh karena itu, perilaku sambungan menjadi aspek utama dalam analisis dan perancangan struktur CFS.

Pada sistem struktur CFS, sambungan umumnya dirancang menggunakan sistem baut dengan pelat penyambung untuk meningkatkan efisiensi konstruksi dan menghindari proses pengelasan. Desain sambungan tersebut ditujukan pada komponen sambungan seperti baut dan pelat penyambung seperti *rectangular gusset plate*, *T gusset plate*, *seat angle*, *web angle*, dan *haunched gusset plate*. Salah satu tipe pelat penyambung yang banyak dikembangkan adalah *Haunched Gusset Plate* (HGP) yang dirancang untuk meningkatkan distribusi tegangan serta mengontrol deformasi sambungan. Terkait dengan hal tersebut, penelitian HGP terus mengalami perkembangan yang pesat hingga beberapa tahun terakhir (Septiadi dkk, 2025).

Perilaku sambungan HGP telah dikaji melalui pengujian eksperimental menggunakan metode *Isolated Joint Test* (IJT). Aminuddin, dkk. (2020) melakukan pengujian eksperimental IJT terhadap sambungan HGP, dimana hasil pengujian menunjukkan bahwa sambungan memiliki respons *non-linier* yang terlihat pada hubungan momen–rotasi hingga kondisi pasca-elastis. Kapasitas momen yang dihasilkan menunjukkan peningkatan disertai kemampuan rotasi yang besar sebelum terjadinya kegagalan, sehingga sambungan tersebut dapat diklasifikasikan sebagai sambungan *semi-rigid* berdasarkan ketentuan Eurocode 3.

Meskipun pengujian eksperimental mampu menggambarkan perilaku sambungan secara aktual, metode ini memiliki keterbatasan dari segi biaya, waktu, dan jumlah variasi parameter pengujian. Oleh karena itu, analisis numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) banyak digunakan untuk memodelkan perilaku sambungan CFS secara lebih rinci. Pendekatan FEM mampu merepresentasikan hubungan momen–rotasi serta distribusi tegangan dan deformasi pada komponen sambungan yang sulit diamati melalui pengujian laboratorium, namun kajian numerik yang secara khusus memvalidasi hasil analisis FEM terhadap data eksperimen

sambungan HGP berdasarkan karakteristik kurva momen–rotasi masih terbatas (Amsyar dkk, 2021). Analisis FEM memperlihatkan konfigurasi dan ketebalan HGP dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap hubungan momen–rotasi sambungan CFS (Bucmys dkk, 2015).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis karakteristik hubungan momen–rotasi sambungan HGP pada struktur balok–kolom CFS dengan konfigurasi penampang *double channel* menggunakan metode FEM berbasis *ANSYS Workbench*. Pengembangan dan validasi model FEM dilakukan dengan mengacu pada data hasil pengujian eksperimental sambungan HGP yang diteliti oleh Aminuddin, dkk. (2020) untuk memastikan bahwa parameter material, kondisi batas, interaksi kontak, serta respons nonlinier yang dimodelkan secara numerik mampu merepresentasikan perilaku aktual sambungan. Analisis difokuskan pada evaluasi perilaku momen–rotasi sambungan yang dicirikan oleh tiga parameter utama, yaitu kapasitas kekuatan (*strength capacity*), kapasitas kekakuan (*stiffness capacity*), dan kapasitas daktilitas (*ductility capacity*). Parameter tersebut menjadi dasar dalam analisis dan desain sambungan rangka baja sesuai dengan ketentuan BS EN 1993-1-8 (Lee dkk, 2015). Model numerik yang dikembangkan diharapkan dapat digunakan sebagai alat evaluasi yang andal dan efisien.

2. METODOLOGI

Properti material yang digunakan dalam analisis numerik didefinisikan sebagai parameter utama pada pemodelan berbasis FEM. Seluruh data material disusun pada tabel *Engineering Data* dalam *ANSYS Workbench* sesuai dengan karakteristik masing-masing komponen struktur, yaitu balok, kolom, HGP, dan baut. Data material diperoleh dari penelitian terdahulu serta hasil pengujian laboratorium.

Properti Material dan Spesimen

Model struktur dan properti material dalam pemodelan FEM dirangkum sebagai berikut:

1. Model struktur terdiri atas kolom dengan tinggi 3 m dan balok dengan panjang 1,1 m.

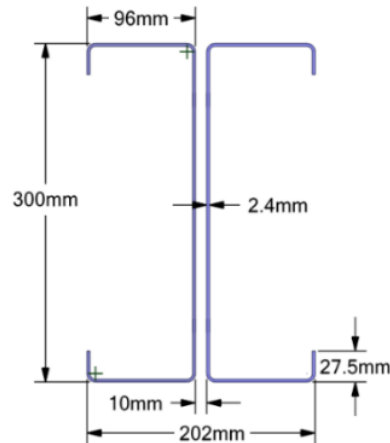
2. Sambungan balok–kolom menggunakan konfigurasi HGP dengan ketebalan 10 mm yang terbuat dari baja canai panas (*hot-rolled steel* / HRS).
3. HGP dipasang pada tengah tinggi kolom, yaitu 1,5 m dari dasar kolom.
4. Pembebanan diberikan pada balok pada jarak 1 m dari *flange* kolom untuk menghasilkan respons lentur pada sambungan.
5. Balok dan kolom dimodelkan menggunakan CFS dengan tegangan leleh 596,56 MPa dan tegangan tarik ultimit 683,44 MPa.
6. HGP dimodelkan menggunakan HRS dengan tegangan leleh 321,6 MPa dan tegangan tarik ultimit 465,4 MPa.
7. Sambungan menggunakan baut M12 Grade 8.8 dengan tegangan leleh 640 MPa dan tegangan tarik ultimit 800 MPa sebagai elemen utama transfer gaya dan momen.
8. Penggunaan sistem penahan lateral (*lateral bracing*) pada model sehingga analisis hanya dibatasi dengan pengaruh gaya arah vertikal dengan mengabaikan efek torsi.

Penelitian eksperimental yang dilakukan oleh Aminuddin, dkk. (2020) mengkaji perilaku sambungan HGP melalui tiga spesimen uji. Pada penelitian ini, analisis numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) dilakukan dengan menggunakan satu spesimen sebagai dasar acuan, yaitu spesimen IJT-BGJ-9. Pemilihan spesimen ini didasarkan pada kemampuannya merepresentasikan karakteristik momen–rotasi yang paling dominan, baik dari sisi kekakuan, kekuatan, maupun daktilitas, sehingga sesuai digunakan sebagai model perbandingan antara hasil eksperimental dan numerik.

Permodelan Sambungan

Balok dan kolom CFS dimodelkan menggunakan penampang *double channel section* yang disusun secara *back-to-back* seperti pada Gambar 1. Wang, dkk. (2018) membuat rangkaian balok dengan menggunakan penampang *lipped channel section* menjadi bentuk *built-up open* untuk mengidentifikasi kapasitas momen di sumbu utama. Konfigurasi ini dipilih untuk meningkatkan kapasitas penampang dan

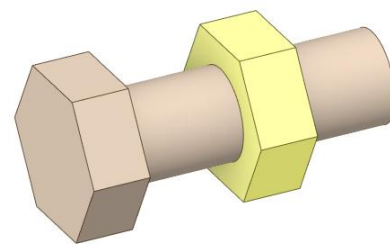
stabilitas lokal elemen struktur tanpa menambah ketebalan material secara signifikan. Dimensi geometris penampang balok dan kolom ditentukan sesuai dengan spesimen dan dimodelkan secara tiga dimensi menggunakan perangkat lunak *ANSYS SpaceClaim*. Pada Tabel 1 dapat dilihat properti dari penampang CFS yang dipakai. Seluruh komponen struktur, yaitu balok, kolom, dan HGP, dihubungkan menggunakan baut dan mur berdiameter 12 mm dengan mutu Grade 8.8 seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Penampang CFS C30024

Tabel 1. Dimensi Penampang CFS

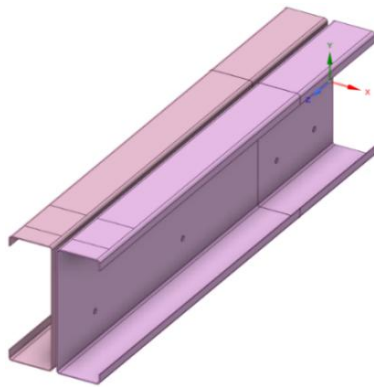
Dimensi	Web (mm)	Flange (mm)	Lip (mm)	Thick (mm)	Radius (mm)
Balok C30024	300	96	27,5	2,4	5
Kolom C30024	300	96	27,5	2,4	5



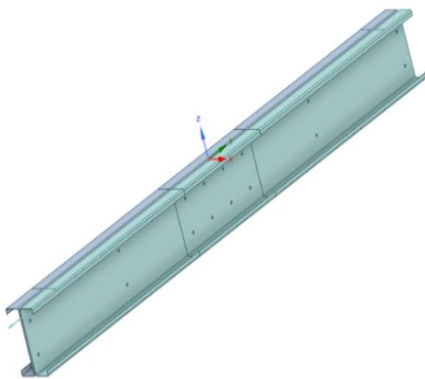
Gambar 2. Permodelan Baut dan Mur M12 Grade 8.8

Pada Gambar 3 dan 4 terlihat bagian *web* balok-kolom dibuat lubang masing-masing 4 dan 8 buah baut pada bagian titik penghubung dengan pelat penyambung HGP. Jumlah, jarak, dan susunan lubang baut ditentukan mengikuti konfigurasi sambungan pada spesimen eksperimental. Konfigurasi lubang baut tersebut disesuaikan dengan kebutuhan kapasitas sambungan agar distribusi gaya antara balok, kolom, dan pelat

penyambung HGP dapat bekerja secara optimal.

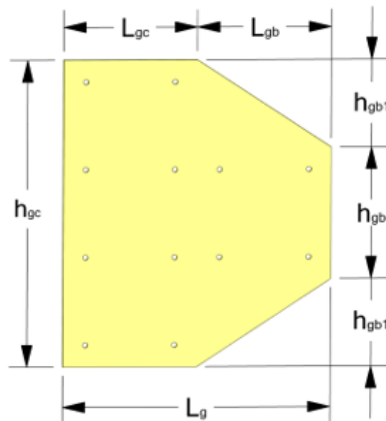


Gambar 3. Permodelan Balok CFS C30024



Gambar 4. Permodelan Kolom CFS C30024

Permodelan baut secara rinci bertujuan untuk menangkap interaksi kontak antara baut, pelat, dan elemen struktur lainnya. HGP diperlihatkan pada Gambar 5 dimodelkan sebagai elemen penyambung utama antara balok dan kolom. Tebal HGP memiliki ukuran 6 mm dan berfungsi untuk menyatukan dua penampang CFS. Dimensi dari HGP dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 5. Permodelan HGP Tebal 6 mm

Tabel 2. Dimensi Penampang HGP

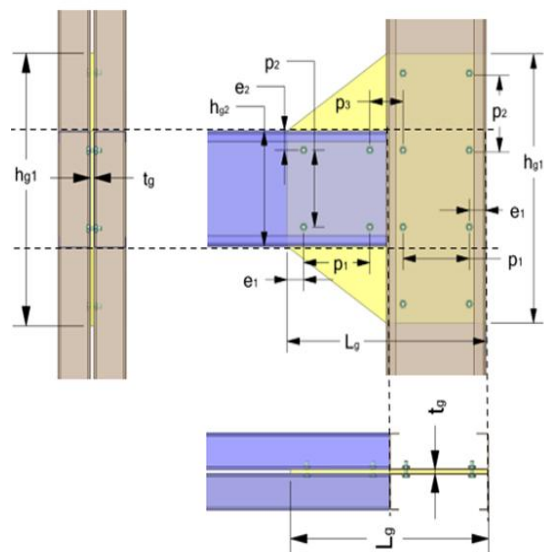
Spesimen IJT-BGJ-9					
L_g (mm)	L_{gc} (mm)	L_{gb} (mm)	h_{gc} (mm)	h_{gb} (mm)	h_{gb1} (mm)
600	300	300	600	300	150

Sesuai dengan perencanaan model, konfigurasi sambungan yang telah dirangkai membentuk satu kesatuan struktur balok-kolom CFS dengan sambungan HGP sesuai dengan ketentuan BS EN 1993-1-8:2005. Jarak baut sambungan dapat dilihat pada Tabel 3 dan susunan konfigurasi sambungan dapat dilihat pada Gambar 6.

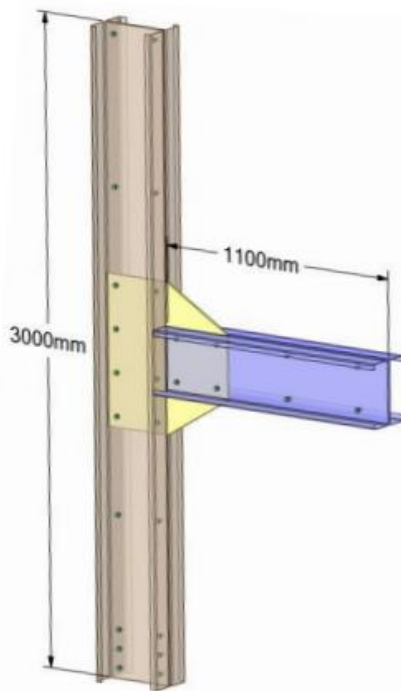
Tabel 3. Konfigurasi Sambungan CFS

Spesimen IJT-BGJ-9							
t_g (mm)	h_g (mm)	L_g (mm)	e_1 (mm)	e_2 (mm)	p_1 (mm)	p_2 (mm)	p_3 (mm)
10	300	600	75	75	150	150	150

Komponen-komponen struktur yang telah dimodelkan selanjutnya disatukan melalui proses *assembly* untuk membentuk sistem sambungan balok-kolom yang utuh. Proses penggabungan dilakukan secara bertahap, dimulai dengan penyambungan elemen kolom dan balok terhadap pelat HGP, kemudian diperkuat melalui pemasangan baut dan mur pada setiap lubang sambungan yang telah direncanakan. Seluruh proses *assembly* dilakukan menggunakan *ANSYS SpaceClaim* guna memastikan keterhubungan geometris antar komponen sesuai dengan konfigurasi sambungan yang dianalisis. Hasil *assembly* dari spesimen IJT-BGJ-9 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Permodelan Konfigurasi Sambungan

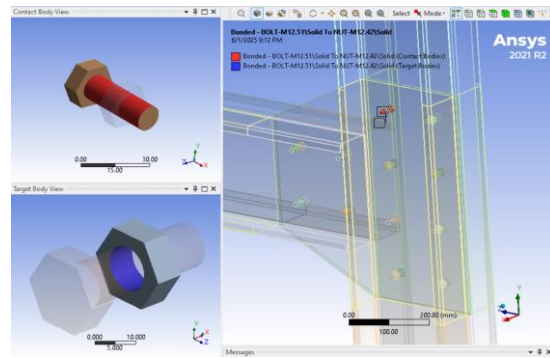


Gambar 7. Permodelan FEM Spesimen IJT-BGJ-9

Kontak Analisis (*Analysis Contact*)

Analisis kontak (*contact analysis*) digunakan untuk menentukan perilaku antar elemen struktur. Kontak *bonded* digunakan pada elemen yang diasumsikan terhubung secara monolit, seperti antara baut dan mur. Kontak *frictionless* diterapkan pada permukaan HGP dengan balok dan kolom, sedangkan kontak *frictional* digunakan pada permukaan yang dipengaruhi gaya pre-tension baut, seperti antara kepala baut dan pelat sambungan (Ghifari dkk, 2022). Nilai koefisien gesek pada kontak *frictional* ditentukan melalui pendekatan *trial and error* dengan kisaran 0,15–0,25 untuk memperoleh respons struktur yang stabil. Selain itu, sifat kontak diatur sebagai *no sliding–cannot separate* dan *sliding–separate* sesuai karakteristik masing-masing komponen, sehingga interaksi antar elemen dalam model FEM dapat merepresentasikan kondisi struktur secara lebih akurat (Firdaus dkk, 2022). Contoh dari salah satu *analysis contact* dapat dilihat pada Gambar 8.

Pengaturan kontak yang tepat dapat menghasilkan analisis yang mampu menunjukkan distribusi gaya dan perilaku struktur yang mendekati kondisi aktual, sehingga parameter analisis seperti defleksi dan rotasi dapat diinterpretasikan secara lebih tepat.

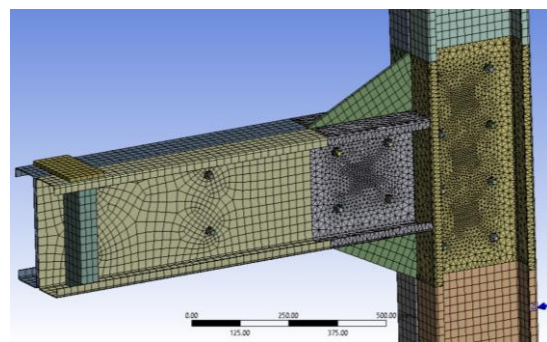


Gambar 8. Contoh *Contact Analysis* Antara Baut dan Mur

Pembentukan *Meshing*

Analisis FEM lebih konevergen dengan elemen heksahedral yang teratur dengan geometri yang dimodelkan presisi untuk meminimalkan distorsi elemen dan meningkatkan kualitas numerik. Penggunaan ukuran mesh yang lebih halus dapat meningkatkan akurasi, namun perlu disesuaikan dengan kapasitas perangkat keras agar komputasi tetap efisien (Alemdar dkk, 2021).

Pada penelitian ini, ukuran *mesh* sebesar 22 mm diterapkan pada komponen utama seperti balok, kolom, dan HGP. Sementara itu, baut dimodelkan dengan ukuran mesh yang lebih halus, yaitu 2,4 mm, menggunakan metode *multizone* dengan elemen heksahedral dan *linear element order* guna meningkatkan kualitas *mesh* dan kestabilan analisis. Bentuk *meshing* diperlihatkan pada permodelan Gambar 9.

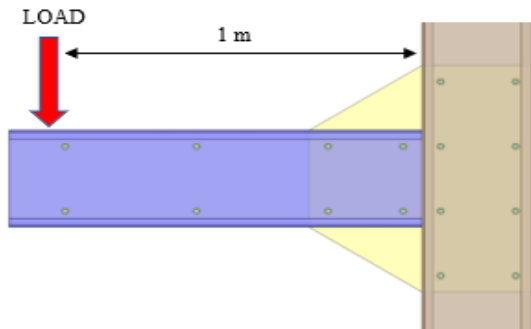


Gambar 9. Bentuk *Meshing*

Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Kondisi batas pada model numerik ditetapkan pada bagian ujung bawah kolom dimodelkan sebagai tumpuan jepit, sedangkan ujung atas kolom menggunakan tumpuan rol. Pembebanan diterapkan dalam bentuk beban

statis terpusat pada elemen balok dengan beban sebesar 46,3 MPa. Beban diberikan secara bertahap untuk memperoleh respons *non-linier* sambungan. Titik pembebanan ditempatkan pada permukaan *flange* balok dengan jarak 1 m dari *flange* kolom seperti pada Gambar 10 agar dapat memicu respon momen-rotasi yang signifikan pada sambungan.

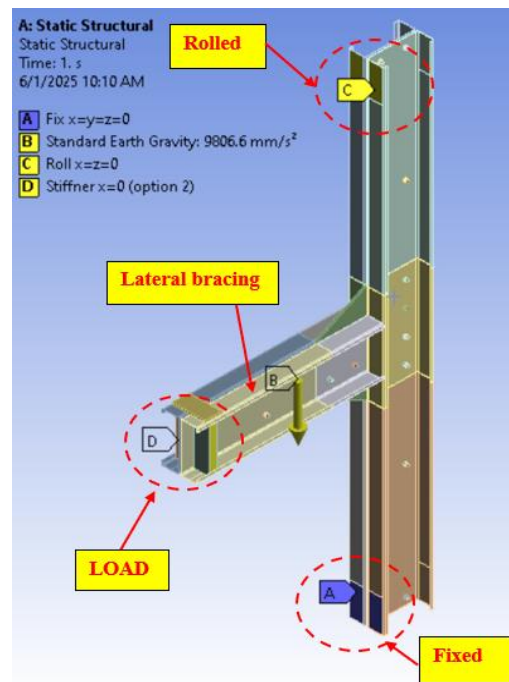


Gambar 10. Posisi Loading

Struktur dilengkapi dengan *lateral bracing* sebagai elemen pengaku serta pengekangan pada arah sumbu x untuk menjaga kestabilan model. Pengaturan ini bertujuan membatasi ketidakstabilan global dan memastikan deformasi struktur terkonsentrasi pada arah utama pembebanan. Dengan kondisi batas dan pembebanan tersebut, respons struktur yang dihasilkan diharapkan mampu merepresentasikan perilaku aktual sambungan balok-kolom baja canai dingin secara akurat. Hasil penerapan kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 11.

Selain itu, penerapan *lateral bracing* juga membantu meningkatkan kekakuan sistem struktur terhadap efek tekuk lokal maupun global akibat pembebanan. Akibat adanya elemen pengaku tersebut, distribusi gaya pada sambungan balok-kolom dapat berlangsung lebih merata sehingga deformasi yang terjadi selama proses analisis numerik menjadi lebih terkendali. Kondisi ini mendukung validitas hasil simulasi FEM dalam menggambarkan respons struktur secara mendekati kondisi aktual.

Penggunaan kondisi batas yang sesuai juga bertujuan untuk meminimalkan terjadinya *numerical instability* selama proses iterasi analisis. Konvergensi model dapat dicapai dengan lebih baik dan hasil perhitungan menjadi lebih konsisten.



Gambar 11. Kondisi Batas (Boundary Condition)

Kurva Momen (M) - Rotasi (θ)

Proses untuk membuat grafik momen-rotation pada analisis FEM dibentuk menggunakan gabungan 5 defleksi (*displacement*) pada lokasi titik referensi (C1, C2, B1, B2, dan B3) sebagai acuan perpindahan arah z dan y pada balok dan kolom. Lokasi titik referensi tersebut berdasarkan metode perhitungan rotasi sambungan dari AlHendi dkk, (2015) diterapkan dalam permodelan spesimen IJT-BGJ-9 seperti pada Gambar 12. Menurut Anggara, dkk. (2025) defleksi (*displacement*) sangat penting dalam memahami seberapa besar deformasi yang dialami oleh suatu elemen struktur baik balok maupun kolom, sehingga pemahaman tersebut dapat digunakan dalam menentukan hubungan momen-rotasi pada jenis sambungan HGP.

Akumulasi seluruh titik rotasi dihitung sehingga membentuk satu titik rotasi sistem sambungan berdasarkan persamaan berikut (AlHendi dkk, 2015):

$$\theta_c = \text{atan}(a) - \text{atan}(b) \quad (1)$$

$$\delta_{b.el(x_{B3})} = -c(d - e) \quad (2)$$

Dimana persamaan a, b, c, d, dan e adalah:

$$a = \frac{V_{B3} - V_{B1} - \delta_{b.el(x_{B3})}}{x_{B3}} \quad (3)$$

$$b = \frac{H_{C2} - H_{C1}}{D} \quad (4)$$

$$c = \frac{P}{E_B E_I} \quad (5)$$

$$d = \frac{(x_{B3})^3}{6} \quad (6)$$

$$e = \frac{L_{load}(x_{B3})^2}{2} \quad (7)$$

Dimana:

- θ_C = Rotasi sambungan (rad)
- $\delta_{b,el}(x_{B3})$ = Defleksi elastis balok
- V_{B1} = Defleksi vertikal titik B1 (mm)
- V_{B3} = Defleksi vertikal titik B3 (mm)
- x_{B3} = Jarak dari B1 ke B3 (mm)
- H_{C2} = Defleksi horizontal titik C2 (mm)
- H_{C1} = Defleksi horizontal titik C1 (mm)
- D = Tinggi penampang balok (mm)
- P = Beban (N)
- E_B = Elastisitas penampang balok (MPa)
- I_B = Momen inersia penampang balok (mm⁴)

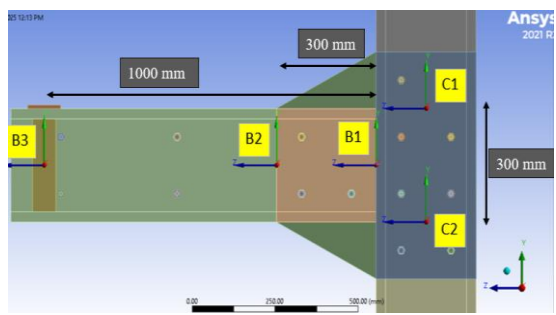
Setelah didapat rotasi pada sambungan maka digunakan persamaan umum momen dan kekakuan yaitu:

$$M_j = P \cdot L \quad (8)$$

$$S_j = \frac{M_j}{\phi_j} \quad (9)$$

Dimana:

- M_j = Momen sambungan (kNm)
- L = Panjang balok (mm)
- S_j = Nilai kekakuan (kNm/rad)

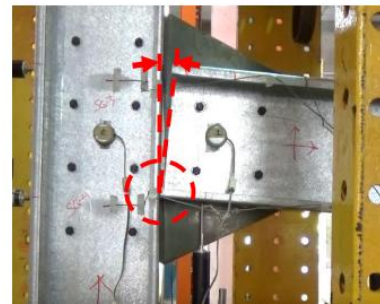


Gambar 12. Lokasi Titik Referensi Defleksi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

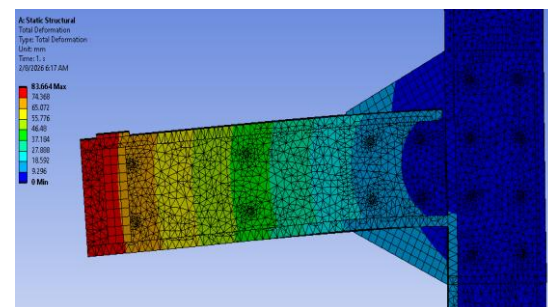
Penelitian ini mengacu pada studi eksperimental yang dilakukan oleh Aminuddin, dkk. (2020) mengenai perilaku

sambungan HGP sebagai dasar validasi dan perbandingan terhadap pemodelan FEM. Penelitian tersebut dipilih karena merepresentasikan konfigurasi dasar sambungan tanpa modifikasi tambahan sehingga mampu memberikan acuan yang jelas dalam mengevaluasi pengaruh pengembangan sambungan usulan. Melalui perbandingan hasil kurva *moment-rotation*, penelitian ini meninjau perubahan karakteristik sambungan berupa *strength*, *stiffness*, dan *ductility* akibat penambahan modifikasi pada sambungan HGP yang dianalisis (Gambar 13). Sebagai tindak lanjut dari penelitian terdahulu tersebut, dilakukan pemodelan numerik menggunakan program *ANSYS Workbench* untuk mengevaluasi respons sambungan terhadap pembebanan statik secara lebih rinci.



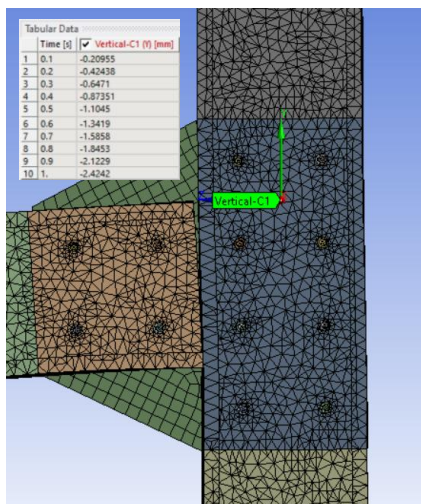
Gambar 13. Model Eksperimental HGP

Setelah dilakukan analisis (*solving*) menggunakan program *ANSYS Workbench*, maka akan terlihat hasil kontur deformasi pada permodelan seperti pada Gambar 14. Hasil dari tiap titik defleksi yang telah ditentukan (5 titik referensi) digabungkan untuk merepresentasikan nilai rotasi sambungan. Hasil dari *solving* pada tiap titik menghasilkan nilai defleksi pada sumbu x, y, dan z dengan membatasi permodelan hanya lingkup defleksi pada sumbu z dan y. Salah satu contoh titik kordinant defleksi yaitu titik C1 dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 14. Kontur Defleksi Hasil FEM

Output defleksi dari lima titik referensi tersebut diakumulasi dan dihitung berdasarkan persamaan (1) hingga (7) sehingga menghasilkan nilai rotasi sambungan (θ). Nilai momen sambungan (M_j) kemudian dihitung berdasarkan persamaan (8) sesuai dengan beban statik yang dihasilkan pada tiap periode pembebanan. Hubungan antara nilai momen dan rotasi tersebut selanjutnya digunakan untuk membentuk kurva *moment-rotation* sebagai dasar evaluasi perilaku sambungan. Perbedaan ketiga kurva *moment-rotation* yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan adanya variasi respons kekakuan sambungan akibat modifikasi yang dilakukan pada model sambungan. Melalui kurva tersebut, karakteristik sambungan dapat diklasifikasikan berdasarkan batasan kekakuan sesuai ketentuan BS EN 1993-1-8, BS EN 1993-1-3, dan SCI P398, sehingga dapat diketahui apakah sambungan termasuk kategori *rigid*, *semi-rigid*, atau *pinned*.



Gambar 15. Contoh *Output* Titik Referensi Defleksi Vertikal-C1 Sumbu Y

Klasifikasi Kekakuan Sambungan (*Stiffness Classification*)

Hasil kurva momen-rotasi spesimen IJT-BGJ-9 pada Gambar 16 dengan nilai puncak momen yang sama yaitu 46,3 kN.m menghasilkan nilai rotasi 0,053 rad untuk eksperimen dan 0,0532 rad untuk FEM. Nilai kekakuan akhir (S_j) menghasilkan nilai 881,327 kNm/rad untuk eksperimen dan 869,834 kNm/rad untuk FEM. Nilai masing-masing rotasi dan kekakuan pada kedua metode analisis memiliki perbedaan yaitu 0,43% dan 1,3% seperti yang terlihat pada Tabel 5. Sesuai dengan ketentuan BS EN

1993-1-8 untuk mengklasifikasi sambungan berdasarkan kekakuan harus dibandingkan dengan *initial rotational stiffness* ($S_{j,ini}$), dimana:

$$\begin{aligned}
 S_{j,ini,pinned} &= 842,777 \quad \text{kNm/rad} \\
 S_{j,ini} &= 8021,409 \quad \text{kNm/rad} \\
 S_{j,ini,rigid} &= 13484,432 \quad \text{kNm/rad}
 \end{aligned}$$

Maka, $S_{j,ini}$ diklasifikasikan sebagai sambungan *Semi Rigid* seperti terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Klasifikasi Kekakuan Sambungan

Spesimen	Metode Analisis	<i>Joint Classification</i>	
		<i>Stiffness</i>	
IJT-BGJ-9	EXP	<i>Semi-Rigid</i>	$0,5 E I_b / L_b \leq S_{j,ini} \leq k_b E I_b / L_b$
IJT-BGJ-9	FEM	<i>Semi-Rigid</i>	$0,5 E I_b / L_b \leq S_{j,ini} \leq k_b E I_b / L_b$

Kondisi demikian telah mencapai keseimbangan antara kondisi yang kaku atau kondisi terlalu fleksibel. Sehingga tujuan akhir dari sambungan *semi-rigid* yaitu untuk memungkinkan perpindahan rotasi dalam kontrol keseimbangan.

Tabel 5. Persentase Nilai Kekakuan dan Rotasi

Spesimen	P (kN)	M_j (kNm)	S_j (kNm/rad)	Rotasi (Rad)
IJT-BGJ-9 (EXP)	46300	46,3	881,327	0,0530
IJT-BGJ-9 (FEM)			869,834	0,0532
Selisih (%)			1,30	0,43

Merujuk pada penelitian Bucmys dkk. (2016), analisis numerik menunjukkan deviasi sebesar 10–16% terhadap hasil eksperimental dianggap masih berada dalam batas toleransi. Sehingga, hasil dari nilai kekakuan dan rotasi pada Tabel 5 masih dalam tingkat evaluasi yang sangat baik.

Klasifikasi Kekuatan Sambungan (*Strength Classification*)

Berdasarkan klasifikasi kekuatan, sambungan dikategorikan sebagai *partial strength*. Hal tersebut dikarenakan momen sambungan tidak mencapai momen plastis atau momen tahanan balok secara keseluruhan. Nilai momen mencapai $0,25 M_{ex} \leq M_j \leq M_{ex}$ seperti terlihat pada Gambar 17, dimana momen sambungan (M_j) berada di tengah-tengah dalam pengertian tidak sepenuhnya kaku (*strength*) atau tidak sepenuhnya sendi (*pinned*).

$$M_{b,pl,Rd} = 74,071 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 46,3 \text{ kNm}$$

$$0,25 M_{b,pl,Rd} = 18,518 \text{ kNm}$$

Maka, $M_{j,Rd}$ diklasifikasikan sebagai sambungan *Partial Strength* seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Klasifikasi Kekuatan Sambungan

Spesimen	Metode Analisis	Joint Classification Strength	
		Strength	Strength
IJT-BGJ-9	EXP	Partial-Strength	$0,25 M_{cx} \leq M_j \leq M_{cx}$
IJT-BGJ-9	FEM	Partial-Strength	$0,25 M_{cx} \leq M_j \leq M_{cx}$

Klasifikasi Daktilitas Sambungan (*Ductility Classification*)

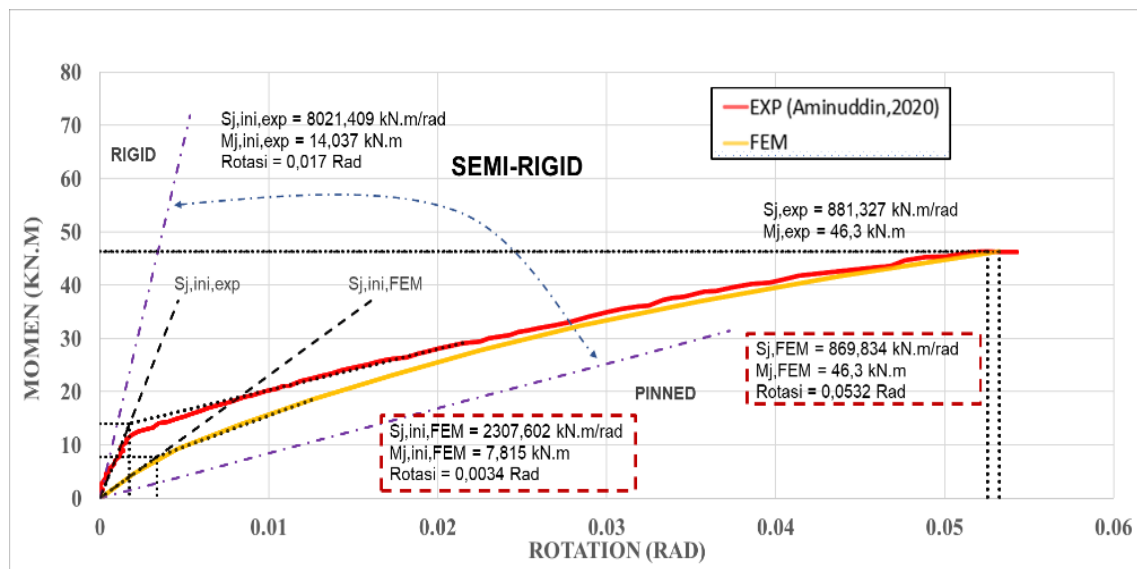
Sesuai dengan kalsifikasi terhadap daktilitas, dari hasil grafik momen-rotation dapat dilihat rotasi dikategorikan sebagai sambungan daktil seperti terlihat pada Gambar 18. Kondisi tersebut dikarenakan nilai rotasi berada diatas nilai batas yaitu $0,3 \leq 0,532$ rad untuk FEM dan $0,3 \leq 0,530$ rad untuk eksperimental seperti terlihat pada Tabel 7. Hal ini menunjukkan sambungan mengalami deformasi melewati batas elastis hingga plastis sehingga menghindari adanya keruntuhan mendadak atau dapat dikatakan struktur sambungan dapat menyerap dan menahan energi lebih lama. Maka, rotasi (ϕ) diklasifikasikan sebagai sambungan daktil.

Tabel 7. Klasifikasi Daktilitas Sambungan

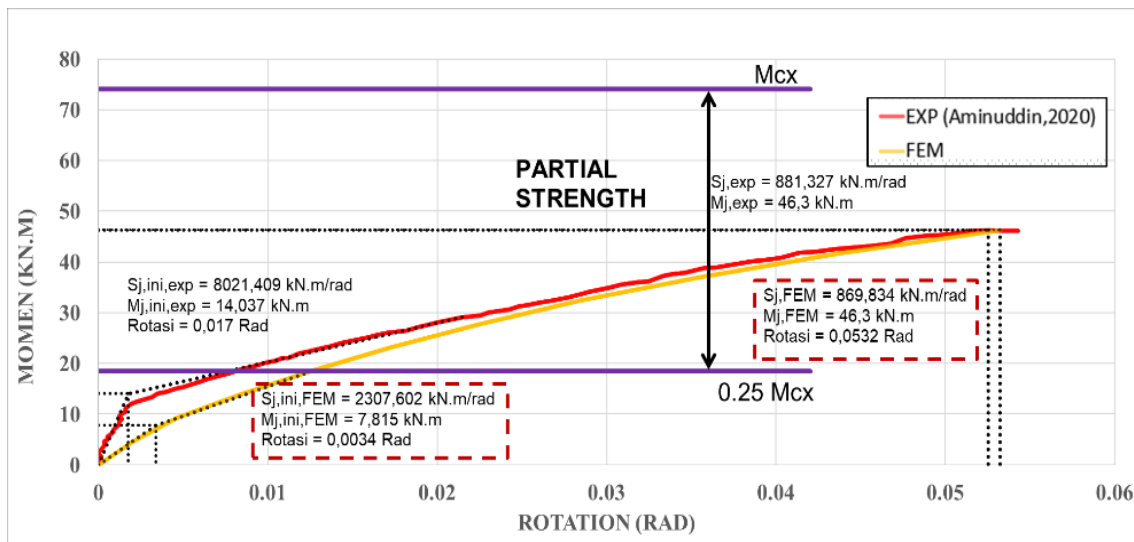
Spesimen	Metode Analisis	Joint Classification Ductility	
		Ductility	Ductility
IJT-BGJ-9	EXP	Ductile	$0,3 \leq \phi$ $0,3 \leq 0,532$ rad
IJT-BGJ-9	FEM	Ductile	$0,3 \leq \phi$ $0,3 \leq 0,530$ rad

4. KESIMPULAN

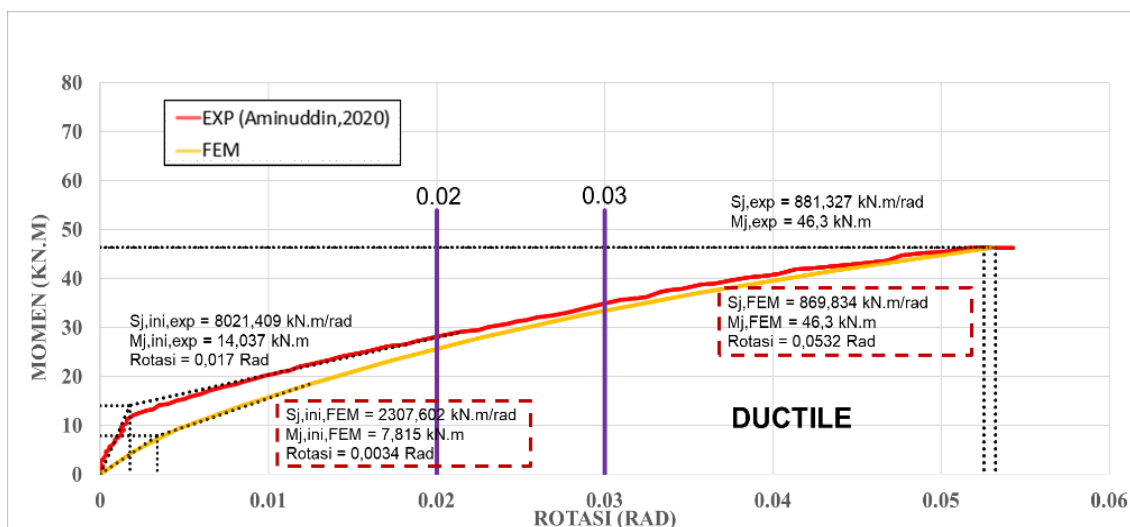
Hasil analisis sambungan balok dan kolom dengan penampang *double-channel* menggunakan FEM menghasilkan nilai rotasi dan kekakuan akhir masing-masing 0,0532 mm dan 869,834 kNm/rad. Berdasarkan nilai kekakuan tersebut sambungan penampang *double-channel* menghasilkan klasifikasi *semi rigid*, *partial strength*, dan daktil. Bila dibandingkan hasil analisis menggunakan FEM dengan hasil uji eksperimental nilai deviasi sebesar 0,43 % dan 1,3 % ditunjukkan untuk masing-masing nilai rotasi dan kekakuan akhir. Nilai deviasi tersebut menunjukkan bahwa pemodelan FEM pada sambungan HGP memiliki tingkat akurasi yang baik, sehingga layak digunakan sebagai acuan dalam evaluasi perilaku sambungan berdasarkan karakteristik *strength*, *stiffness*, dan *ductility*.



Gambar 16. Kurva Momen-Rotasi FEM vs Exp Pada Klasifikasi Kekakuan Sambungan



Gambar 17. Kurva Momen-Rotasi FEM vs Exp Pada Klasifikasi Kekuatan Sambungan



Gambar 18. Kurva Momen-Rotasi FEM vs Exp Pada Klasifikasi Daktilitas Sambungan

REFERENSI

- Alemdar, F., Geleta, H. D., & Algaadi, F. M. (2021). *Moment-Rotation Characteristics and Finite Element Analysis Of Cold Formed Steel Connections*. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26(1):29-46.
- Alhendi, H., & Celikag, M. (2015). *Parametric study on moment-rotation characteristics of reverse channel connections to tubular columns*. *Journal of Constructional Steel Research*, 261-273.
- Aminuddin, K., Saggaff, A., Tahir, M. M., Ngian, S. P., Sulaiman, A., Firdaus, M., & Aghlara, R. (2019). *Analytical and Experimental Investigation on Slip-in Gusset Plate Connection for Double C-channel Sections of Cold-formed Steel*. *The Open Civil Engineering Journal*, 13(1).
- Aminuddin, K. M., Saggaff, A., & Tahir, M. M., Shek, P. N., Sulaiman, A., Firdaus, M., Hanfiah, Saloma. (2020). *Experimental Study Of Slip In Haunched Gusset Plate For Cold Formed Steel Connections*. *Internatioanl Journal if Scientific & Technology Research Volume 9, ISSUE 02*. ISSN 2277-8616.
- Amsyar, F., Tan, C. S., Mohammad, S., Tahir, M. M., & Hamid, H. A. (2021). *Partial Strength Beam-to-column Connection of Cold-formed Single Channel Section: Numerical and Experimental Study*. *ASM*

- Science Journal*, 14. pp. 1-11. ISSN 1823-6782
- Anggara, M. R., Syahrul Fuad, I., Firda, A., & Septiadi, I. (2025). *Analisis beban gempa pada gedung rumah sakit menggunakan metode statik dan dinamik*. *Jurnal Teknik Sipil LATERAL*, 3(2).
- Brown, D., Iles, D., Brettle, M., & Malik, A. (2013). *SCI P398 - Joints in steel construction – moment-resisting Joints to EUROCODE 3 book*. London: *The Steel Construction Institute (SCI)*.
- Bučmys, Ž., & Daniūnas, A. (2015). *Analytical and experimental investigation of cold-formed steel beam-to-column bolted gusset-plate joints*. *Journal of civil engineering and management*, 21(8), 1061-1069.
- Bučmys, Ž., Daniūnas, A., Jaspart, J. P., & Demonceau, J. F. (2016). *A component method for cold-formed steel beam-to-column bolted gusset plate joints*. *Thin-Walled Structures*, 123, 520-527.
- Firdaus, M., Saggaff, A., Tahir, M. M., Aminuddin, K. M., Ngian, S. P., Siang, T. C., Salih, M. N. A., Hosseini, M., & Sulaiman, A. (2020). *Behavior of partial strength of beam-to-column connection with gusset plate for cold-formed steel sections*. *ASEAN Engineering Journal*, 10(2), 99-114.
- Firdaus, M., Setiobudi, A., Alzahri, S. A., & Albimanzura, R. M. F. S. (2022). *Perilaku Sambungan Baut Flush End-Plate Balok Kolom Menggunakan Ansys Work Bench*. *Teknika Jurnal Teknik* 9(1):56
- Ghifari, F., Suswanto, B., & Tajunnisa, Y. (2022). *Analisis Numerik Sambungan Bolted Flange Plate (BFP) dengan Menggunakan Program ANSYS*. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 20(1):49
- Lee, Y. H., Tan, C. S., Mohammad, S., Lim, J. B., & Johnston, R. (2015). *Numerical study of joint behaviour for top-seat flange cleat connection in cold-formed steel structures*. *Scientia Iranica*, 22(4), 1554-1566.
- Septiadi, I., Rosidawani, & Aminuddin, K. M. (2025). *Analisis Metode Elemen Hingga (Finite Element Method) Perilaku Sambungan Haunched Gusset Plate dengan Penampang Dobel Kanal*. *Jurnal Ilmu Multidisiplin* 4(2):812-822
- Standard, B. (2005). *BS EN 1993-1-8:2005 - Eurocode 3: Design of steel structures . Part 1-8: Design of joints*.
- Standard, B. (2006). *BS EN 1993-1-3:2006 - Eurocode 3 : Design of steel structures : Part 1-3: General rules : Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*.
- Sutama, A., Septriasyah, V., & Angraini, D. D. (2024). *Studi Komparatif Perilaku Struktur Gedung Beton Bertulang Dengan Variasi Geometri Kolom Persegi dan Kolom Bulat*. *Bearing: Jurnal Penelitian dan Kajian Teknik Sipil*, 9(2), 64-69.
- Wang, L., & Young, B. (2018). *Behaviour and design of cold-formed steel built-up section beams with different screw arrangements*. *Thin-Walled Structures*, 131, 16-32.