STUDI NUMERIKAL SAMBUNGAN BALOK KE KOLOM BAJA TIPE PELAT UJUNG PADA ARAH SUMBU KUAT KOLOM

Yohanes Christian Kapitan[1*], Mohammad Erfan[1], Vega Aditama[1]

[1]Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia
Email: christiankapitan13@gmail.com

ABSTRACT

Beam-to-column connections are one of the most critical components in steel structures because they transfer internal forces between elements and influence structural response under loading, particularly during earthquakes. This study aims to evaluate the behavior of an extended end-plate connection on the strong axis through numerical analysis using the Finite Element Method (FEM) implemented in ABAQUS. The materials used include SS400 structural steel, ASTM A325 high-strength bolts, and E70 welding material. The analysis was carried out by applying monotonic loading concentrated at the top end of the column and cyclic loading based on displacement control in accordance with FEMA 350 and AISC 341-22 provisions. The parameters observed include stress distribution and the moment-rotation relationship of the connection. The analysis results show that the benchmark model was able to resist a maximum moment of 264.165 kN·m at 6% rotation, while the modified model reached 246.058 kN·m at the same rotation level. Both models satisfied the minimum moment capacity requirement of 0.8Mpb, or 245.52 kN·m, as specified in AISC 341-22. In terms of stress distribution, the modified model showed that plastic deformation was more concentrated in the beam, while the column stiffener remained in the elastic range, making the connection behavior more consistent with the strong column-weak beam design philosophy. In addition, the hysteresis curve of the modified model exhibited a more stable response and better energy dissipation capacity than the benchmark model. These findings indicate that adding a column stiffener can improve the seismic performance of extended end-plate connections through a more uniform stress distribution and a better plastic deformation mechanism.

Keywords: *extended end-plate*, moment-rotation, finite element method, cyclic loading, hysteresis curve.

ABSTRAK

Sambungan balok-kolom merupakan salah satu bagian yang sangat menentukan kinerja struktur baja karena berperan dalam meneruskan gaya dalam antarelemen serta memengaruhi respons struktur ketika mengalami pembebanan, terutama akibat gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku sambungan *extended end-plate* pada sumbu kuat melalui analisis numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) dengan bantuan perangkat lunak ABAQUS. Material yang digunakan meliputi baja struktural SS400, baut mutu tinggi ASTM A325, dan material las E70. Analisis dilakukan dengan memberikan beban monotonik yang dipusatkan pada ujung atas kolom serta pembebanan siklik berbasis *displacement-control* sesuai ketentuan FEMA 350 dan AISC 341-22. Parameter yang diamati mencakup distribusi tegangan serta hubungan momen-rotasi pada sambungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa model *benchmark* mampu menahan momen maksimum sebesar 264,165 kN·m pada rotasi 6%, sedangkan model modifikasi mencapai 246,058 kN·m pada rotasi yang sama. Kedua model memenuhi persyaratan kapasitas momen minimum sebesar 0,8Mpb atau 245,52 kN·m sebagaimana disyaratkan dalam AISC 341-22. Ditinjau dari distribusi tegangan, model modifikasi memperlihatkan bahwa deformasi plastis lebih terkonsentrasi pada balok, sementara pengaku kolom tetap berada dalam kondisi elastis sehingga perilaku sambungan menjadi lebih sesuai dengan filosofi desain *strong column-weak beam*. Di samping itu, kurva histeresis model modifikasi menunjukkan respons yang lebih stabil dan kemampuan disipasi energi yang lebih baik dibandingkan model *benchmark*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan pengaku pada kolom mampu meningkatkan kinerja seismik sambungan *extended end-plate* melalui distribusi tegangan yang lebih merata dan mekanisme peleleha yang lebih baik.

Kata kunci: *extended end-plate*, momen-rotasi, metode elemen hingga, pembebanan siklik, kurva histeresis.

PENDAHULUAN

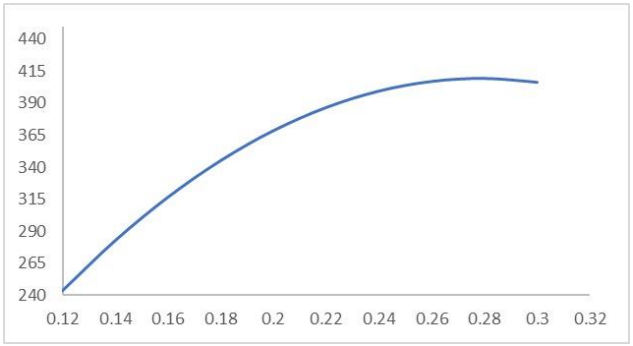
Struktur baja menjadi salah satu pilihan utama dalam konstruksi bangunan modern karena memiliki kekuatan yang tinggi, perbandingan kekuatan terhadap berat yang menguntungkan, serta proses fabrikasi dan pemasangan yang relatif efisien di lapangan. Pada sistem rangka baja, sambungan balok–kolom memegang peranan penting dalam meneruskan gaya antar elemen struktur, sehingga sangat berpengaruh terhadap kekakuan, kapasitas momen, dan perilaku struktur saat menerima beban lateral maupun gempa. Karena itu, perancangan sambungan yang tetap mampu menjaga kekuatan dan kekakuannya selama pembebanan menjadi salah satu hal yang krusial dalam desain struktur baja. Salah satu sambungan momen yang banyak digunakan pada rangka baja adalah sambungan pelat ujung diperpanjang (*extended end-plate connection*). Sambungan ini tersusun atas pelat ujung yang dilas pada bagian akhir balok dan kemudian diikat ke kolom dengan baut mutu tinggi. Perilaku sambungan tersebut dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain ketebalan pelat ujung, susunan baut, mutu material, serta keberadaan elemen pengaku (*stiffener*). Perbedaan pada parameter-parameter ini akan berdampak pada distribusi tegangan, kapasitas momen, kekakuan, dan pola kegagalan sambungan. Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan elemen pengaku dapat memperbaiki kinerja sambungan. (Bahaz *et al.*, 2018) melaporkan bahwa penggunaan pelat pengaku (*stiffener*) mampu meningkatkan kapasitas sambungan sekaligus menurunkan konsentrasi tegangan pada area baut dan muka kolom. Di sisi lain, (Lin *et al.*, 2022) menemukan bahwa pembebanan siklik dapat menurunkan kekakuan dan mengubah perilaku sambungan baja seiring bertambahnya jumlah siklus pembebanan. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa konfigurasi sambungan dan jenis pembebanan memiliki pengaruh yang besar terhadap respons mekanis sambungan. Walaupun penelitian mengenai sambungan *extended end-plate* telah cukup banyak dilakukan, kajian yang secara khusus membahas pengaruh penggunaan pengaku segitiga (*triangular stiffener*) terhadap perilaku sambungan pada pembebanan monotonik dan siklik masih terbatas. Selain itu, analisis yang lebih rinci mengenai hubungan momen–rotasi, distribusi tegangan, deformasi, serta mekanisme pelelehan melalui metode elemen hingga masih diperlukan sebagai dasar untuk mengembangkan desain sambungan baja yang lebih optimal. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini melakukan analisis numerik terhadap sambungan balok–kolom baja tipe *extended end-plate* dengan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Kajian dilakukan dengan membandingkan sambungan tanpa pengaku (*benchmark*) dan sambungan dengan pengaku segitiga pada kondisi pembebanan monotonik dan siklik. Evaluasi difokuskan pada hubungan momen–rotasi, distribusi tegangan, deformasi, kekakuan, dan mekanisme kegagalan sambungan sesuai dengan ketentuan (SNI 1729-2020, 2020) dan (American Institute of Steel Construction, 2022). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai efektivitas pengaku segitiga dalam meningkatkan kinerja sambungan pelat ujung diperpanjang sebagai salah satu alternatif desain sambungan momen pada struktur baja.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis numerik berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method*) (IsworoAnsyah and Razi, 2002) untuk mengevaluasi perilaku sambungan balok-kolom baja tipe extended *end-plate*, yang sesuai (American Institute of Steel Construction, 2022), (Construction, 2010). (Zienkiewicz and Taylor, 2005).

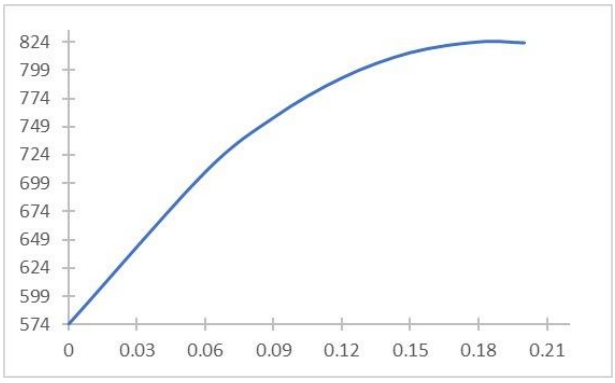
Material Propertis

Material utama yang digunakan pada elemen balok, kolom, pelat ujung, dan pelat pengaku adalah baja struktural SS400 dengan tegangan leleh sebesar 240 MPa dan tegangan putus ultimit sebesar 410 MPa.



Gambar 1. Mutu Material Baja SS400

Baut yang digunakan merupakan baut mutu tinggi (ASTM A325, 2009) dengan tegangan leleh sebesar 635 MPa dan tegangan ultimit sebesar 827 MPa (Yoganata, Pembimbing and Suswanto, 2020).



Gambar 2. Mutu Material Baut A325

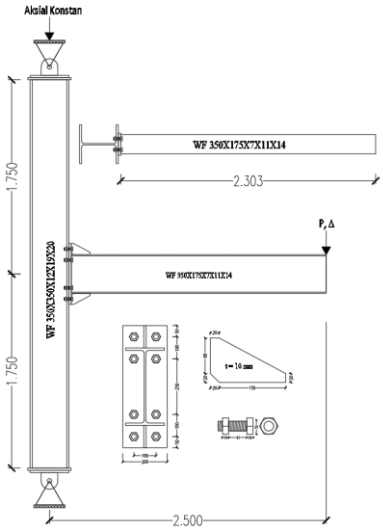
Sedangkan untuk mutu las mengunakan las E70 dengan tegangan leleh 400 Mpa dan tegangan putus 483 Mpa. Modulus elastisitas baja ditetapkan sebesar 200000 MPa. Properti material yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Material Propertis

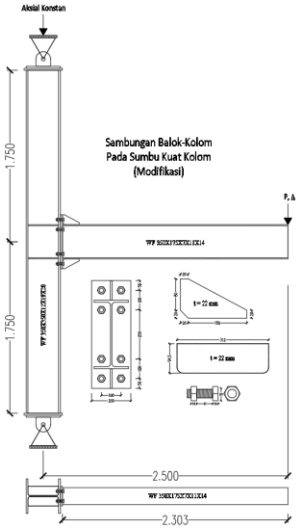
Jenis Material	Mutu Material	Tegangan leleh (Fy)	Tegangan Ultimate (Fu)	Modulus Elastisitas (E)
		N/mm2	N/mm2	N/mm2
Balok	SS400	240	410	200000
Kolom	SS400	240	410	200000
Pelat Ujung	SS400	240	410	200000
Pelat Pengaku	SS400	240	410	200000
Baut	A325	635	827	200000
Las	E70	400	483	200000

PEMODELAN SAMBUNGAN PADA ABAQUS

Pemodelan sambungan dilakukan menggunakan perangkat lunak ABAQUS berbasis metode elemen hingga 3D (Plm, 2021).

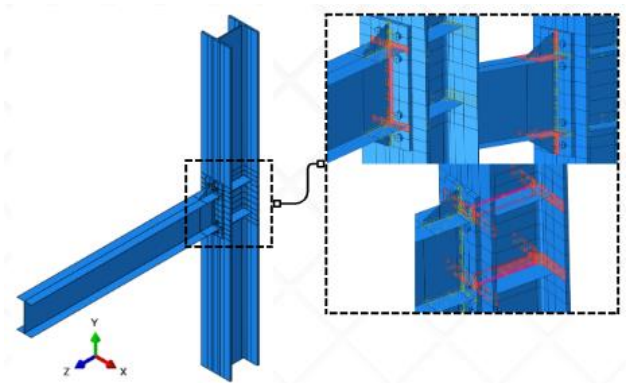


Gambar 3. Model Sambungan Benchmark



Gambar 4. Model Sambungan Modifikasi

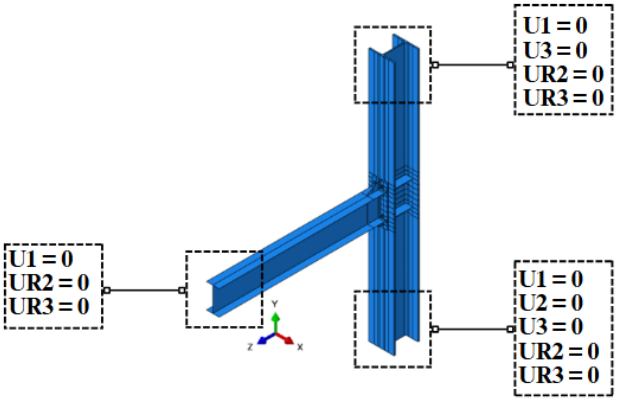
Sambungan las dimodelkan menggunakan interaksi tie constraint, sedangkan kontak antar permukaan baja menggunakan hard contact dengan koefisien friksi sebesar 0,3 (AWS, 2010), (Badan Standardisasi Nasional, 2020).



Gambar 5. Pemodelan Las dan Interaksi Kontak

Boundary Condition

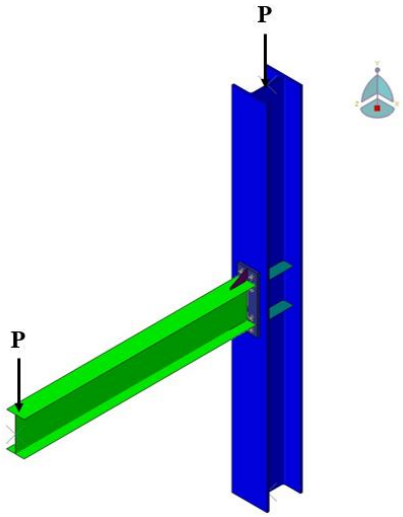
Boundary condition diterapkan pada ujung kolom dan balok untuk mensimulasikan kondisi aktual struktur.



Gambar 6. Boundary Condition

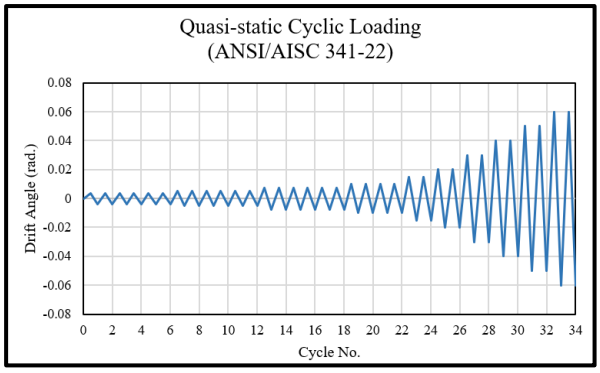
Skema Pembebanan

Beban monotonik diterapkan pada ujung kolom dengan arah vertikal sebesar 223,314 kN. Posisi ujung kolom berada pada jarak 1750 mm dari sumbu balok.



Gambar 7. Skema Pembebanan

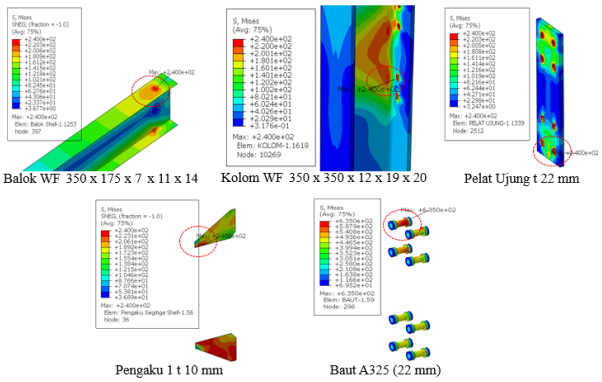
Dalam pengujian sambungan baja tahan gempa, pembebanan siklik diberikan menggunakan kontrol simpangan (*displacement control*). Beban perpindahan (*displacement*) diberikan pada ujung balok dengan nilai sebesar 150,18 mm hingga mencapai target rotasi minimum 4% dan maksimum 6%. Nilai perpindahan ini ditentukan berdasarkan hubungan antara rotasi balok dan panjang bentang balok. (American Institute of Steel Construction, 2022) dan (Emergency and Agency, 2000).



Gambar 8. Rencana Beban Siklik

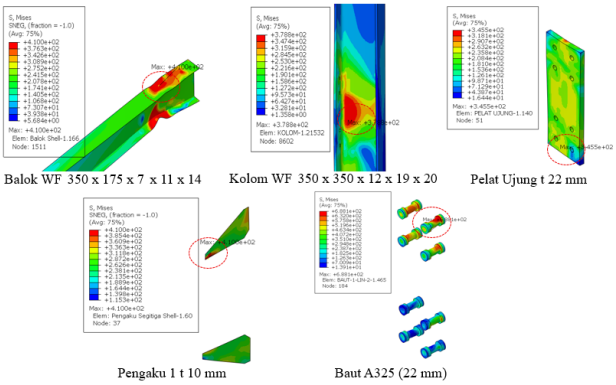
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Tegangan Saat Leleh Awal dan Putus Model Benchmark



Gambar 9. Distribusi Tegangan Saat Leleh Awal

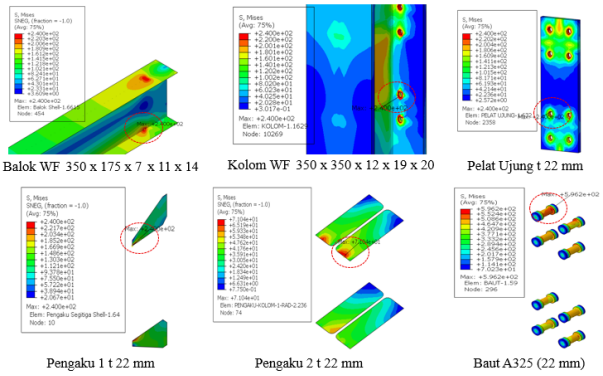
Gambar 9, menunjukan kondisi leleh awal yang terjadi pada rotasi 0,75% yang ditandai dengan tegangan pada balok dan pengaku segitiga telah mencapai tegangan leleh baja sebesar Fy = 240 MPa, sedangkan kolom dan pelat ujung mengalami leleh sebesar 240 Mpa akibat gaya pratarik baut. Hal tersebut menunjukkan bahwa elemen-elemen utama sambungan mulai mengalami perilaku plastis akibat pembebanan siklik yang diberikan. Pada baut diperoleh tegangan sebesar 635 MPa, dimana nilai tersebut telah melewati tegangan leleh baut namun masih berada di bawah tegangan ultimit baut sebesar Fu = 827 MPa, sehingga baut masih mampu menahan gaya yang bekerja tanpa mengalami kegagalan.



Gambar 10. Distribusi Tegangan Saat Leleh Putus

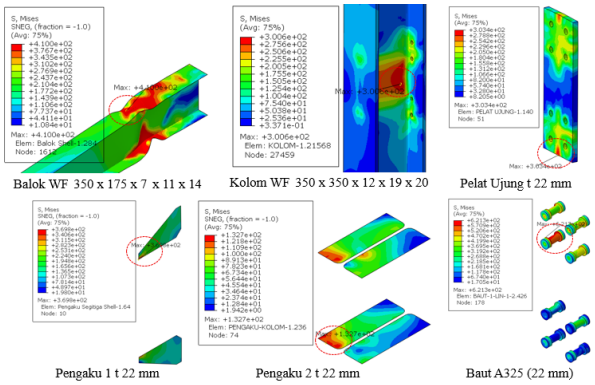
Gambar 10 menunjukkan distribusi tegangan pada elemen saat mencapai rotasi 6%. Balok dan pengaku segitiga mengalami tegangan tertinggi, masing-masing sebesar 410,0 MPa, diikuti kolom sebesar 378,8 MPa dan pelat ujung sebesar 345,5 MPa. Seluruh elemen telah melampaui tegangan leleh baja Fy = 240 MPa dan mendekati tegangan ultimit baja Fu = 410 MPa. Pada baut diperoleh tegangan sebesar 688,1 MPa dimana nilai tersebut telah melewati tegangan leleh sebesar 635 Mpa dan masih berada dibawah tegangan putus baut sebesar 827 Mpa. Kondisi ini menunjukkan bahwa deformasi plastis telah berkembang pada seluruh elemen sambungan seiring meningkatnya rotasi. Meskipun balok telah mencapai tegangan ultimit, pelelehan diawali oleh pengaku segitiga sebagai bagian dari sambungan. Hal tersebut menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan masih berawal pada elemen penyambung dalam hal ini adalah pengaku segitiga, yang mensyaratkan pembentukan sendi plastis terjadi pada balok, sedangkan sambungan tetap memiliki kapasitas yang lebih tinggi.

Distribusi Tegangan Saat Leleh Awal dan Putus Model Modifikasi



Gambar 12. Distribusi Tegangan Saat Leleh Awal.

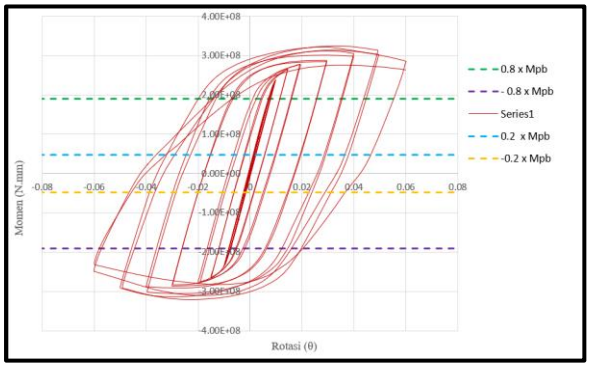
Gambar 12, menunjukan kondisi leleh awal yang mulai terjadi pada rotasi 0,75% yang ditandai dengan tegangan pada balok dan pengaku segitiga telah mencapai tegangan leleh baja sebesar Fy = 240 MPa. Sedangkan kolom dan pelat ujung mengalami leleh sebesar 240 Mpa akibat gaya pratarik baut. Nilai tersebut menunjukkan bahwa beberapa elemen sambungan mulai memasuki kondisi plastis akibat pengaruh pembebanan siklik. Pada pengaku kolom diperoleh tegangan sebesar 71,04 MPa sehingga elemen tersebut masih berada pada kondisi elastis. Sementara itu, baut mengalami tegangan sebesar 596,2 MPa, dimana nilai tersebut telah mendekati tegangan leleh baut namun masih berada di bawah tegangan ultimit baut sebesar Fu = 827 MPa, sehingga baut masih mampu menahan gaya yang bekerja tanpa mengalami kegagalan.



Gambar 13. Distribusi Tegangan Saat Leleh Putus.

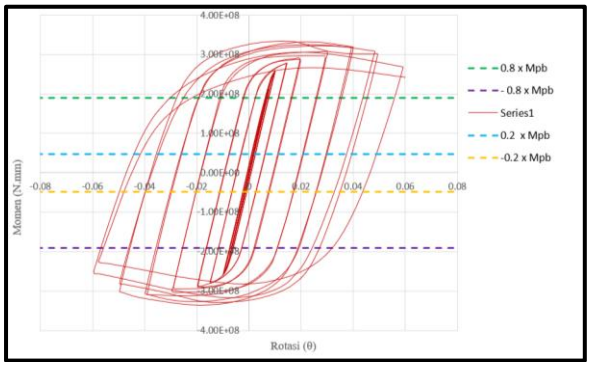
Gambar 13. menunjukkan distribusi tegangan pada elemen saat mencapai rotasi 6%. Balok mengalami tegangan sebesar 410,0 MPa, diikuti pengaku segitiga 369,8 MPa, pelat ujung 303,4 MPa, kolom 300,6 MPa, dan pengaku kolom 132,7 MPa. Dibandingkan dengan mutu baja yang digunakan Fy = 240 MPa, balok, pengaku segitiga, kolom, dan pelat ujung telah melampaui tegangan leleh, sedangkan pengaku kolom masih berada di bawah batas leleh. Balok telah mencapai tegangan ultimit baja Fu = 410 MPa, yang menunjukkan bahwa deformasi plastis berkembang secara dominan pada elemen balok. Sementara itu, pengaku kolom tetap berada dalam kondisi elastis sehingga mampu membantu mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah sambungan. Kondisi ini menunjukkan bahwa model modifikasi memiliki mekanisme pelelehan yang sesuai dengan prinsip sambungan, karena pembentukan sendi plastis lebih terkonsentrasi pada balok dibandingkan pada komponen sambungan.

Momen-Rotasi Model Benchmark dan Modifikasi



Gambar 11. Kurva Histeresis (P-Δ) Model Benchmark.

Gambar 11, menunjukkan hasil kapasitas momen yang dicapai sambungan sebesar 274,707 kN.m pada rotasi 4% dan 264,165 kN.m pada rotasi 6%. Nilai tersebut telah melampaui batas minimum (0,8Mpb) = 245,52 kN.m sehingga persyaratan kekuatan momen berdasarkan AISC 341-22 dapat dinyatakan terpenuhi.



Gambar 14. Kurva Histeresis (P-Δ) Model Modifikasi.

Gambar 14. menunjukkan hasil kapasitas momen terhadap pembebanan siklik dengan pola kurva yang relatif penuh dan simetris. Pada saat rotasi 4%, sambungan mampu mencapai momen sebesar 259,792 kN.m, sedangkan pada rotasi 6% diperoleh momen sebesar 246,058 kN.m. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan AISC 341-22, dimana kapasitas momen sambungan harus mencapai minimal (0,8Mpb) = 245,52 kN.m.

KESIMPULAN

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa baik model benchmark maupun model modifikasi mulai mengalami leleh pada balok dan pengaku segitiga saat tegangan mencapai 240 MPa pada rotasi 0,75%. Meskipun demikian, perkembangan daerah plastis pada kedua model menunjukkan perilaku yang berbeda. Pada model benchmark, balok dan pengaku segitiga telah mencapai tegangan ultimit sebesar 410,0 MPa pada rotasi 6%, sehingga pelelehan tidak hanya terjadi pada balok, tetapi juga menyebar ke elemen sambungan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa mekanisme keruntuhan belum sepenuhnya mengikuti konsep *strong column-weak beam*. Sebaliknya, pada model modifikasi hanya balok yang mencapai tegangan ultimit 410,0 MPa, sedangkan pengaku segitiga, pelat ujung, kolom, dan pengaku kolom masih berada di bawah batas tegangan ultimit saat mencapai rotasi 6%. Hal ini menunjukkan bahwa sendi plastis terbentuk pada balok, sehingga mekanisme pelelehan menjadi lebih sesuai dengan prinsip perencanaan sambungan tahan gempa.
2. Dari sisi kapasitas momen, model benchmark mampu menahan momen sebesar 274,707 kN·m pada rotasi 4% dan 264,165 kN·m pada rotasi 6%, sedangkan model modifikasi menghasilkan kapasitas momen sebesar 259,792 kN·m pada rotasi 4% dan 246,058 kN·m pada rotasi 6%. Seluruh nilai tersebut telah melampaui persyaratan minimum sebesar 0,8Mpb yaitu 245,52 kN·m menurut AISC 341-22. Dengan demikian, kedua model memenuhi persyaratan kekuatan sambungan, namun model modifikasi menunjukkan mekanisme pelelehan yang lebih baik karena mampu mengarahkan pembentukan sendi plastis pada balok sebagai elemen yang memang direncanakan untuk mengalami perilaku plastis yang stabil saat menerima beban siklik.

DAFTAR PUSTAKA

American Institute of Steel Construction (2022) "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 341-22)," *In American Institute of Steel Construction* [Preprint].

ASTM A325 (2009) "Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength," *ASTM Standard, ASTM International, Pennsylvania, USA*, pp. 1–8.

AWS (2010) *Standard Welding Terms and Definitions, American Welding Society (AWS)*.

Badan Standardisasi Nasional (2020) "Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural," *Sni 1729-2020*, (8), pp. 1–336.

Bahaz, A. *et al.* (2018) "Analysis of the Behaviour of Semi Rigid Steel End Plate Connections," *MATEC Web of Conferences*, 149, pp. 1–6. Available at: https://doi.org/10.1051/matecconf/201714902058.

Construction, A.I. of S. (2010) "Specification for Structural Steel Buildings," pp. 1–612.

Emergency, F. and Agency, M. (2000) "Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings."

IsworoAnsyah, H. and Razi, P. (2002) *Metode elemen hingga hidro.*, *Universitas Lambung Mangkurat*. Available at: https://share.google/mWV56RMpJw6NMdIW6.

Lin, T. *et al.* (2022) "Finite-Element Analysis of High-Strength Steel Extended End-Plate Connections under Cyclic Loading," *Materials*, 15(8), pp. 1–14. Available at: https://doi.org/10.3390/ma15082912.

Plm, C. (2021) "iJs SIMULIA."

SNI 1729-2020, S. (2020) "SNI 1729:2020 Bangunan Struktural Baja," *SNI 1729:2020 Bangunan Struktural Baja* [Preprint], (8).

Yoganata, Y.S., Pembimbing, D. and Suswanto, B. (2020) "Studi Analisis Perilaku Sambungan Extended End-Plate Akibat Beban Siklik Menggunakan Metode Elemen Hingga."

Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2005) "Method for Solid and Structural Mechanics UNESCO Professor of Numerical Methods in Engineering," *Methods* [Preprint].