STUDI NUMERIKAL SAMBUNGAN BALOK KE KOLOM DENGAN TIPE PELAT UJUNG DIPERPANJANG PADA ARAH SUMBU LEMAH KOLOM

Victorius A. Saputra[1*], Mohammad Erfan[1] dan Hadi S. W. Sunarwadi [1]

[1]Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia*
Email: victorsaputra2004@gmail.com
[1]Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia
Email:
[`]Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia
Email:

ABSTRACT

Beam-to-column connections are critical components in steel structures because they transfer forces, moments, and deformations between structural members, thereby affecting the strength, stiffness, and ductility of the structural system, particularly for weak-axis column connections. This study investigates the behavior of an extended stiffened end-plate beam-to-column connection subjected to weak-axis bending using the Finite Element Method (FEM) in ABAQUS 2024. The numerical model was developed in accordance with SNI 1729:2020, SNI 7860:2020, AISC 341-22, AISC 360-22, AISC 358-22, FEMA 355D, and FEMA 350. Monotonic and cyclic loading analyses were performed to evaluate stress distribution, strain, moment-rotation response, and failure mechanism. The results show that the highest stress concentration occurred in the bolts, reaching 807.641 MPa at 4% rotation and 827 MPa at 6% rotation, indicating premature bolt yielding. The moment-rotation response revealed a semi-rigid connection behavior; however, the connection did not satisfy the minimum 4% rotation requirement for seismic moment connections. The study demonstrates that FEM analysis using ABAQUS provides an effective approach for evaluating the structural performance of weak-axis beam-to-column connections.

Keywords: beam-to-column connection, extended stiffened end-plate, weak-axis column, finite element method, ABAQUS.

ABSTRAK

Sambungan balok-kolom merupakan komponen penting pada struktur baja yang berfungsi meneruskan gaya, momen, dan deformasi antar elemen struktur, sehingga kinerjanya sangat memengaruhi kekuatan, kekakuan, dan daktilitas struktur, terutama pada sambungan yang bekerja pada arah sumbu lemah kolom. Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku sambungan balok-kolom tipe *extended stiffened end plate* pada arah sumbu lemah kolom menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak ABAQUS 2024 berdasarkan hasil perencanaan yang mengacu pada SNI 1729:2020, SNI 7860:2020, AISC 341-22, AISC 360-22, AISC 358-22, FEMA 355D dan FEMA 350. Analisis dilakukan melalui pembebanan monotonik dan siklik untuk mengevaluasi distribusi tegangan, regangan, hubungan momen-rotasi, serta mekanisme kegagalan sambungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada baut dengan tegangan maksimum sebesar 807,641 MPa pada rotasi 4% dan meningkat menjadi 827 MPa pada rotasi 6%, sehingga baut menjadi komponen yang mengalami pelelehan lebih awal. Kurva momen–rotasi menunjukkan bahwa sambungan memiliki perilaku semi-kaku dengan peningkatan kapasitas momen seiring bertambahnya rotasi, namun belum memenuhi persyaratan rotasi minimum sebesar 4% sebagaimana dipersyaratkan untuk sambungan momen pada struktur baja tahan gempa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisis numerik menggunakan ABAQUS mampu menggambarkan perilaku mekanis sambungan secara rinci dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi serta pengembangan desain sambungan balok-kolom pada arah sumbu lemah kolom.

Kata kunci: sambungan balok-kolom, *extended stiffened end plate*, sumbu lemah kolom, metode elemen hingga, ABAQUS.

1. PENDAHULUAN

Struktur baja merupakan salah satu sistem konstruksi yang banyak digunakan pada bangunan bertingkat karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemudahan fabrikasi, serta kecepatan pelaksanaan. Pada daerah dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi, struktur baja juga dituntut

.

memiliki daktilitas, dan kekakuan yang baik agar mampu mempertahankan stabilitas struktur selama terjadi gempa. Salah satu komponen yang sangat menentukan kinerja struktur baja adalah sambungan balok-kolom karena berfungsi meneruskan gaya aksial, gaya geser, dan momen antar elemen struktur. Kegagalan pada daerah sambungan dapat menyebabkan penurunan kapasitas struktur secara keseluruhan sehingga perencanaan sambungan harus memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, serta kapasitas rotasi sesuai ketentuan (AISC 341-22).

Sambungan momen tipe *extended stiffened end-plate* merupakan salah satu jenis sambungan yang banyak diterapkan pada struktur baja karena memiliki kapasitas momen, kekakuan, dan daktilitas yang lebih baik dibandingkan sambungan pelat ujung konvensional. Penambahan *stiffener* pada pelat ujung mampu mengurangi deformasi lokal, meningkatkan distribusi gaya, serta memperbesar kapasitas rotasi sambungan sehingga sesuai digunakan pada struktur baja tahan gempa. Berdasarkan AISC 358-22, konfigurasi sambungan *extended end-plate* terdiri atas tipe 4E, 4ES, dan 8ES, di mana penambahan jumlah baut dan *stiffener* memberikan peningkatan terhadap kekuatan dan kekakuan sambungan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi perilaku sambungan *extended end-plate*. (Haghollahi & Jannesar, 2018) menunjukkan bahwa penambahan *rib stiffener* mampu meningkatkan kapasitas momen dan menurunkan konsentrasi tegangan di sekitar baut. (Aouiche et al., 2024) melaporkan bahwa ketebalan pelat ujung dan mutu baja merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap kekakuan awal dan kapasitas rotasi sambungan. Selanjutnya, (De'nan et al., 2024) menyatakan bahwa sambungan *extended end-plate* mampu meningkatkan kapasitas momen hingga sekitar 48% dibandingkan sambungan *flush end-plate*, meskipun perubahan mekanisme kegagalan berupa *local buckling* pada sayap balok masih dapat terjadi. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa modifikasi geometri sambungan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja sambungan baja.

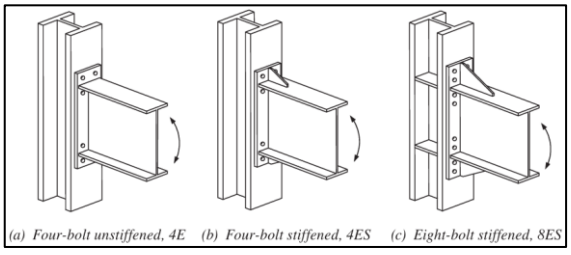
Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada sambungan balok-kolom pada arah sumbu kuat kolom (*strong-axis connection*), sedangkan penelitian mengenai sambungan *extended stiffened end-plate* pada arah sumbu lemah kolom (*weak-axis connection*) masih relatif terbatas. Padahal, sambungan pada arah sumbu lemah memiliki kapasitas lentur dan kekakuan yang lebih rendah sehingga memerlukan evaluasi yang lebih mendalam untuk memastikan terpenuhinya konsep *strong column-weak beam* dan persyaratan rotasi minimum pada sistem rangka pemikul momen khusus. Oleh karena itu, diperlukan analisis numerik yang mampu menggambarkan distribusi tegangan, regangan, deformasi, dan hubungan momen-rotasi secara rinci sebelum sambungan diterapkan pada struktur sebenarnya.

Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku sambungan balok-kolom tipe *extended stiffened end-plate* pada arah sumbu lemah kolom menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) dengan perangkat lunak ABAQUS 2024). Parameter yang dievaluasi meliputi distribusi tegangan, regangan, hubungan momen-rotasi, kapasitas momen, serta kemampuan sambungan dalam memenuhi persyaratan rotasi minimum sebesar 4%. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan desain sambungan balok-kolom pada arah sumbu lemah kolom untuk meningkatkan kinerja struktur baja tahan gempa.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sambungan balok-kolom tipe *extended stiffened end-plate*

Sambungan balok-kolom merupakan komponen utama pada struktur baja yang berfungsi meneruskan gaya aksial, gaya geser, dan momen dari balok ke kolom. Salah satu jenis sambungan momen yang banyak digunakan adalah *extended stiffened end-plate connection* karena memiliki kapasitas momen, kekakuan, dan daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan sambungan pelat ujung konvensional. Berdasarkan AISC 358-22, sambungan *extended end-plate* terdiri atas konfigurasi *four-bolt unstiffened* (4E), *four-bolt stiffened* (4ES), dan *eight-bolt stiffened* (8ES). Penambahan *stiffener* dan jumlah baut meningkatkan kekuatan sambungan, mengurangi deformasi lokal pada sayap kolom, serta meningkatkan kapasitas rotasi sehingga sesuai digunakan pada sistem struktur baja tahan gempa.



Gmbar 1. Sambungan Pelat Ujung Diperpanjang (AISC 358-22)

Sambungan balok-kolom pada arah sumbu lemah kolom

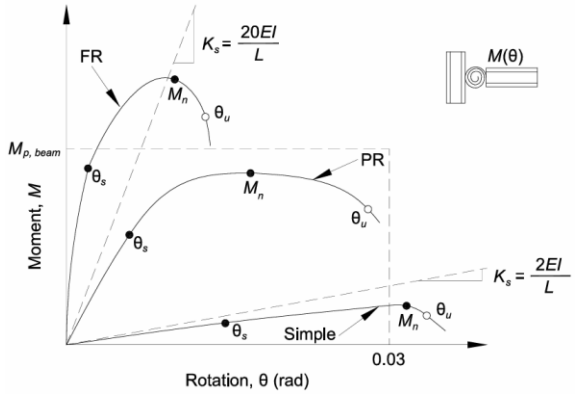
Perancangan sambungan balok-kolom pada arah sumbu lemah (*weak-axis connection*) memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan sambungan pada arah sumbu kuat karena kapasitas lentur dan kekakuan kolom pada arah tersebut lebih

.

rendah. Oleh karena itu, penerapan konsep *Strong Column-Weak Beam* (SCWB) menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa sendi plastis terjadi pada balok sehingga mekanisme keruntuhan tetap bersifat daktail. Ketentuan tersebut diatur dalam AISC 341-22 dan SNI 7860:2020 sebagai bagian dari konsep *capacity design* pada struktur baja tahan gempa.

Perilaku mekanis sambungan

Kinerja sambungan baja dapat dievaluasi melalui hubungan momen-rotasi, distribusi tegangan, dan distribusi regangan. Kurva momen-rotasi menggambarkan kekakuan awal, kapasitas momen maksimum, serta daktilitas sambungan. Berdasarkan AISC 341-22, sambungan dikategorikan sebagai *Fully Restrained* (FR) apabila memiliki kapasitas momen minimal sebesar 0,8 kali momen plastis balok (0,8Mp), *Partially Restrained* (PR) apabila kapasitas momennya berada pada rentang 0,2Mp-0,8Mp, dan *Simple Connection* apabila kapasitas momennya kurang dari 0,2Mp. Selain hubungan momen-rotasi, distribusi tegangan dan regangan pada pelat ujung, baut, balok, serta kolom digunakan untuk mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan dan mekanisme kegagalan sambungan.



Gambar 2. Klasifikasi Hubungan Momen-Rotasi (AISC 360-22)

Metode elemen hingga (*finite element method*)

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan struktur dengan mendiskretisasi domain kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung melalui titik nodal. Dalam analisis struktur baja, FEM mampu memberikan informasi mengenai distribusi tegangan, regangan, deformasi, serta respons sambungan terhadap pembebanan statik maupun siklik. Pemodelan numerik pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ABAQUS 2024 berdasarkan hasil perencanaan sambungan sesuai SNI 1729:2020 dan AISC 360-22 sehingga perilaku sambungan dapat dianalisis secara menyeluruh sebelum diterapkan pada struktur sebenarnya.

3. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian numerik yang menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*/FEM) dengan bantuan perangkat lunak ABAQUS 2024 untuk menganalisis perilaku sambungan balok-kolom tipe *extended stiffened end-plate* pada arah sumbu lemah kolom terhadap pembebanan monotonik dan siklik. Tahapan penelitian meliputi penentuan properti material, perencanaan elemen struktur, perencanaan sambungan, pemodelan elemen hingga, serta analisis hasil.

Properti material

Material yang digunakan terdiri atas baja profil balok dan kolom, pelat ujung (*end plate*), pelat pengaku (*stiffener*), dan baut mutu ASTM A325. Seluruh material dimodelkan sebagai material elastis-plastis berdasarkan kurva tegangan-regangan (*stress-strain curve*). Properti material balok, kolom pelat ujung (*end plate*), dan pelat pengaku (*stiffener*) menggunakan baja struktural SS400. Baut dimodelkan menggunakan sifat mekanik ASTM A325 dengan pemberian gaya *pretension* sebelum pembebanan utama untuk merepresentasikan kondisi aktual pada saat pemasangan sambungan. Detail properti material dapat dilihat pada table 1.

Tabel 1. Data Material Properti

Jenis Material	Mutu Material	Tegangan leleh (Fy)	Tegangan Ultimate (Fu)	Modulus Elastisitas (E)
		N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
Balok	SS400	240	410	200000
Kolom	SS400	240	410	200000
Pelat Ujung	SS400	240	410	200000
Pengaku	SS400	240	410	200000
Baut	A325	635	827	200000
Las	E70	400	483	200000

Perencaan awal

Pada tahap perencanaan awal, ditentukan konfigurasi struktur yang akan digunakan sebagai model acuan dalam analisis numerik. Konfigurasi tersebut dirancang untuk merepresentasikan sambungan balok-kolom baja dengan tipe *extended stiffened end plate* pada arah sumbu lemah kolom. Adapun spesifikasi konfigurasi struktur yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tinggi kolom	:	3,5 m
Panjang balok	:	2,5 m
Letak sambungan	:	½ tinggi kolom
Posisi sambungan	:	Sumbu lemah
Jenis tumpuan	:	Sendi-sendi

.

Jenis beban	:	Beban monotonik, Beban cyclic

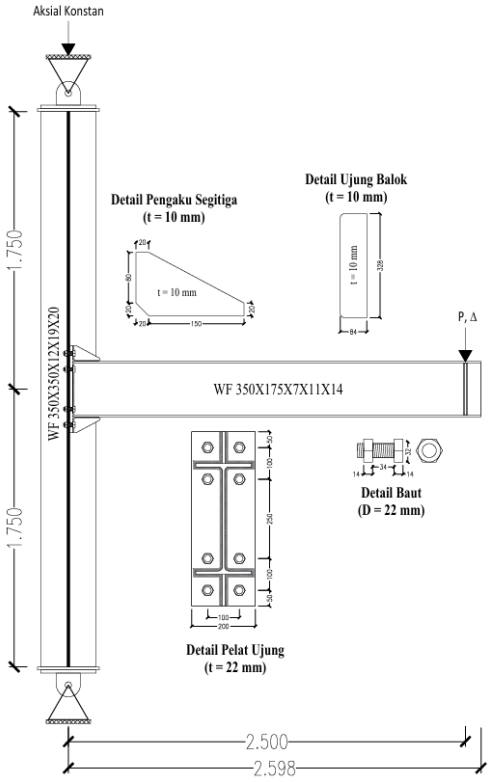
Konfigurasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses perencanaan dimensi elemen struktur, perancangan sambungan, serta pemodelan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*/FEM).

a. Perencanaan dimensi balok dan kolom

Perencanaan balok dan kolom dilakukan sesuai ketentuan SNI 1729:2020, SNI 7860:2020, AISC 341-22, dan AISC 360-22. Profil balok menggunakan IWF 350X175X7X11, sedangkan kolom menggunakan H 350X350X12X19. Perencanaan dilakukan untuk memperoleh kapasitas lentur, kapasitas geser, serta memastikan terpenuhinya konsep *Strong Column-Weak Beam* (SCWB) sehingga sendi plastis diharapkan terbentuk pada balok, bukan pada kolom maupun sambungan.

b. Perencanaan sambungan

Sambungan yang digunakan merupakan sambungan momen tipe *Extended Stiffened End-Plate* (4ES) yang terdiri atas pelat ujung setebal 22 mm, delapan baut ASTM A325 berdiameter 22 mm, dan pelat pengaku segitiga. Perencanaan sambungan meliputi kontrol kapasitas baut terhadap tarik, kontrol pelat ujung, dan kontrol las. Hasil perencanaan digunakan sebagai dasar dalam membangun model numerik pada ABAQUS.



Gambar 3. Detail Sambungan Balok-Kolom

Pemodelan elemen hingga

Pemodelan elemen hingga dilakukan menggunakan perangkat lunak ABAQUS 2024 untuk mengevaluasi perilaku sambungan balok-kolom tipe *extended stiffened end-plate* pada arah sumbu lemah kolom. Model tiga dimensi dibangun berdasarkan dimensi hasil perencanaan sambungan yang meliputi balok, kolom, pelat ujung (*end plate*), pelat pengaku segitiga, dan baut. Material baja dimodelkan sebagai material elastis-plastis dengan pendekatan *true stress-true strain* sehingga mampu merepresentasikan perilaku nonlinier material setelah mencapai tegangan leleh. Pendefinisian properti material meliputi modulus elastisitas, rasio *Poisson*, tegangan leleh, tegangan ultimit, serta kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari hasil konversi data material sesuai spesifikasi baja yang digunakan

Tabel 2. Komponen Part pada Pemodelan Elemen Hingga

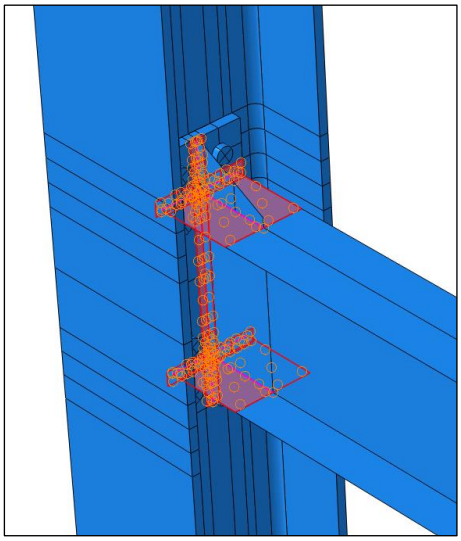
No.	Plat Baja			Baut		Mutu
	Bentuk	Tebal (mm)	Jumlah	Diameter (inch)	Jumlah	
1	Stiffner 	10	2			SS400
2	End-Plate 	22	1			SS400
3	Column WF 350x350x12x19x20 		1			SS400
4	Beam WF 300x175x7x11x14 		1			SS400
5	Bolt 			7/8	8	A325

Setiap komponen dimodelkan menggunakan jenis elemen yang disesuaikan dengan karakteristik geometrinya. Balok dan pelat pengaku dimodelkan menggunakan elemen *shell* karena memiliki ketebalan yang relatif kecil dibandingkan dimensi bidangnya, sehingga lebih efisien secara komputasi tanpa mengurangi akurasi hasil analisis. Sebaliknya, kolom, pelat ujung, dan baut dimodelkan menggunakan elemen *solid* agar distribusi tegangan tiga dimensi, deformasi lokal, serta interaksi antar komponen pada daerah sambungan dapat direpresentasikan dengan lebih akurat. Seluruh komponen kemudian dirakit (*assembly*) sesuai konfigurasi sambungan hasil perencanaan sehingga membentuk model sambungan yang utuh.

Interaksi antar komponen didefinisikan menggunakan *surface-to-surface contact* dengan formulasi *hard contact* pada arah normal dan perilaku gesek (*penalty friction*) pada arah tangensial untuk memungkinkan terjadinya kontak, pemisahan, dan gesekan antar

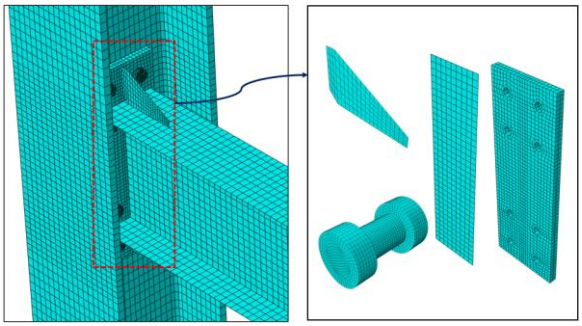
.

permukaan selama proses pembebanan. Sambungan las dimodelkan menggunakan *tie constraint*, sehingga kedua permukaan dianggap terikat sempurna tanpa mengalami slip. Baut dimodelkan sebagai elemen pengikat yang diberikan gaya *pretension* sebelum pembebanan utama guna mensimulasikan kondisi aktual setelah proses pengencangan baut.



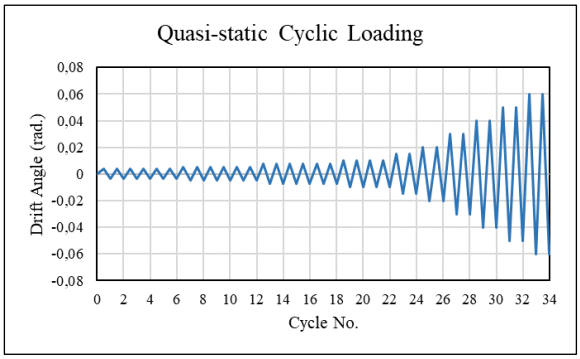
Gambar 4. Model Las yang Diterapkan pada ABAQUS

Proses diskretisasi dilakukan menggunakan elemen heksahedral (*hexahedral mesh*) karena memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dalam analisis struktur tiga dimensi. Ukuran mesh dibuat lebih rapat pada daerah kritis sekitar sambungan, untuk menangkap konsentrasi tegangan secara lebih detail, sedangkan bagian yang tidak kritis menggunakan ukuran elemen yang lebih besar untuk meningkatkan efisiensi komputasi.

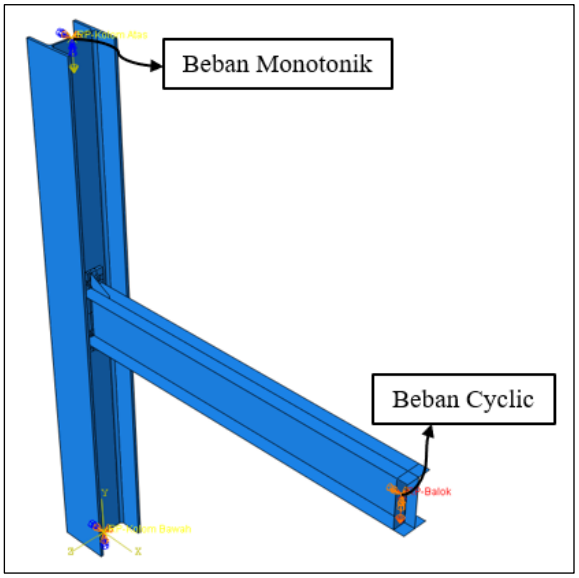


Gambar 5. *Meshing* yang Diterapkan pada Elemen

Kondisi batas diterapkan dengan menahan seluruh derajat kebebasan pada ujung kolom, sedangkan pembebanan diberikan pada ujung balok menggunakan metode *displacement control*. Analisis dilakukan melalui tahapan *Static, General* dengan dua jenis pembebanan, yaitu pembebanan monotonic sebesar 223314 N yang diperoleh dari gaya aksial hasil analisis struktur global menggunakan ETABS untuk memperoleh respons struktur terhadap beban yang meningkat secara bertahap dan pembebanan siklik berdasarkan ketentuan AISC 341-22, FEMA 350, dan FEMA 355D untuk mengevaluasi perilaku sambungan terhadap beban berulang. Parameter keluaran yang diamati meliputi distribusi tegangan Von Mises, distribusi regangan plastis, deformasi, serta hubungan momen-rotasi. Data hasil analisis tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kinerja sambungan berdasarkan pola distribusi tegangan, mekanisme deformasi, kapasitas momen, dan kemampuan rotasi 4% sesuai dengan ketentuan AISC 341-22.

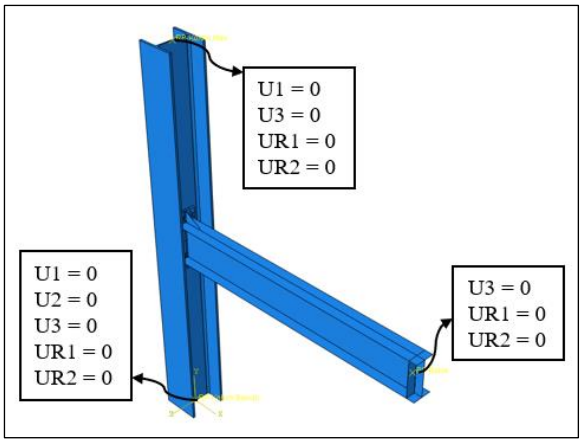


Gambar 6. Kurva Beban Siklik berdasarkan AISC 341-22, FEMA 350, dan FEMA 355D



Gambar 7. Skema Pembebanan

.



Gambar 8. Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

4. HASIL DAM PEMBAHASAN

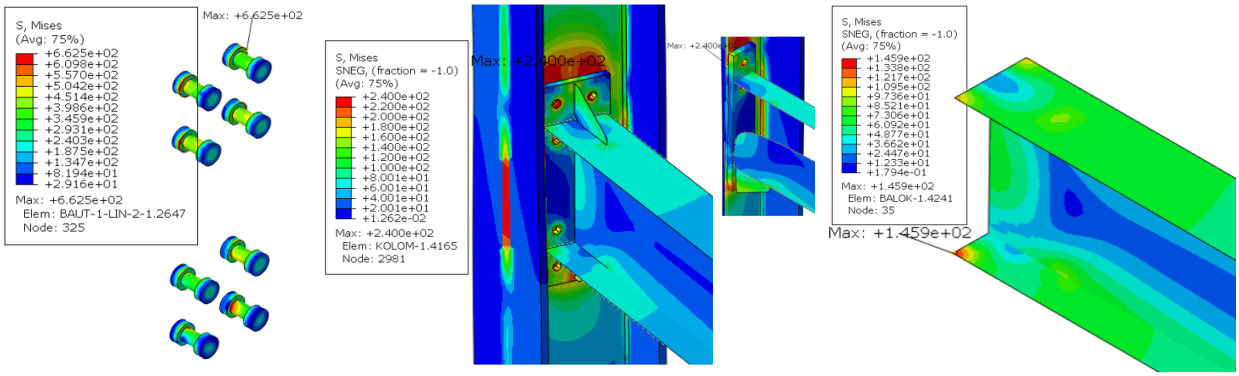
Distribusi tegangan

Distribusi tegangan hasil analisis elemen hingga digunakan untuk mengidentifikasi lokasi awal terjadinya konsentrasi tegangan dan mekanisme keruntuhan sambungan. Evaluasi dilakukan pada tiga kondisi pembebanan, yaitu saat leleh awal (*first yielding*), rotasi 4%, dan rotasi 6% berdasarkan distribusi tegangan *Von Mises*.

a. Distribusi tegangan pada kondisi leleh awal

Pada kondisi leleh awal, distribusi tegangan menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan mulai terjadi pada baut dan badan kolom (*column web*). Baut pada daerah tarik mengalami peningkatan tegangan akibat kombinasi gaya tarik dan momen yang bekerja pada sambungan, sedangkan badan kolom mulai menerima konsentrasi tegangan sebagai akibat dari transfer gaya melalui pelat ujung menuju elemen kolom. Kondisi ini menunjukkan bahwa mekanisme penyaluran beban telah menyebabkan interaksi yang signifikan antara baut, pelat ujung, dan badan kolom, sementara elemen balok masih berada dalam kondisi elastis.

Konsentrasi tegangan pada baut menunjukkan bahwa baut merupakan komponen yang pertama kali mengalami plastisasi, sedangkan peningkatan tegangan pada badan kolom mengindikasikan terjadinya deformasi lokal di sekitar daerah sambungan. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya kekakuan badan kolom pada arah sumbu lemah sehingga sebagian gaya tarik yang diteruskan oleh baut terkonsentrasi pada daerah tersebut. Meskipun demikian, distribusi tegangan pada tahap ini masih bersifat lokal dan belum menyebar secara signifikan ke sayap balok maupun komponen sambungan lainnya. Oleh karena itu, kondisi leleh awal menunjukkan bahwa mekanisme keruntuhan diawali oleh baut dan badan kolom, yang selanjutnya menjadi lokasi berkembangnya plastisasi seiring bertambahnya rotasi sambungan.



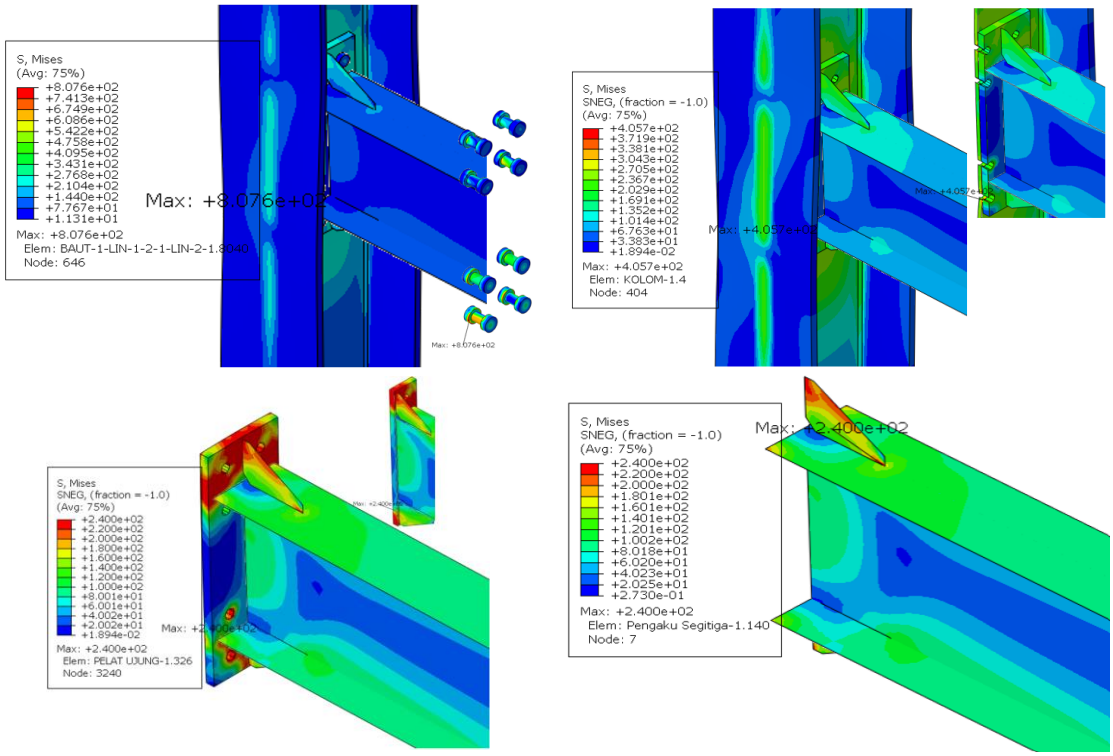
Gambar 9. Distribusi Tegangan Leleh Awal

b. Distribusi Tegangan pada Rotasi 4%

Pada rotasi 4%, distribusi tegangan menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan kondisi leleh awal. Konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada baut dengan tegangan maksimum mencapai 807,641 MPa, kemudian diikuti oleh badan kolom pada daerah sekitar sambungan dengan nilai sebesar 405,701 MPa. Peningkatan tegangan pada kedua komponen tersebut menunjukkan bahwa deformasi plastis telah berkembang akibat transfer gaya tarik dan momen dari balok melalui pelat ujung menuju kolom. Sementara itu, distribusi tegangan pada balok masih relatif lebih rendah sehingga pelelehan belum berkembang secara dominan pada elemen balok.

Pola distribusi tegangan tersebut mengindikasikan bahwa mekanisme keruntuhan sambungan diawali oleh baut dan badan kolom, bukan oleh balok sebagaimana yang diharapkan pada konsep *Strong Column-Weak Beam* (SCWB). Kondisi ini menyebabkan sambungan kehilangan sebagian kekakuannya sebelum mencapai mekanisme plastis yang diinginkan. Berdasarkan ketentuan AISC 341-22, sambungan momen khusus harus mampu mencapai rotasi minimum sebesar 4% tanpa mengalami kegagalan yang mengurangi kapasitas sambungan.

.

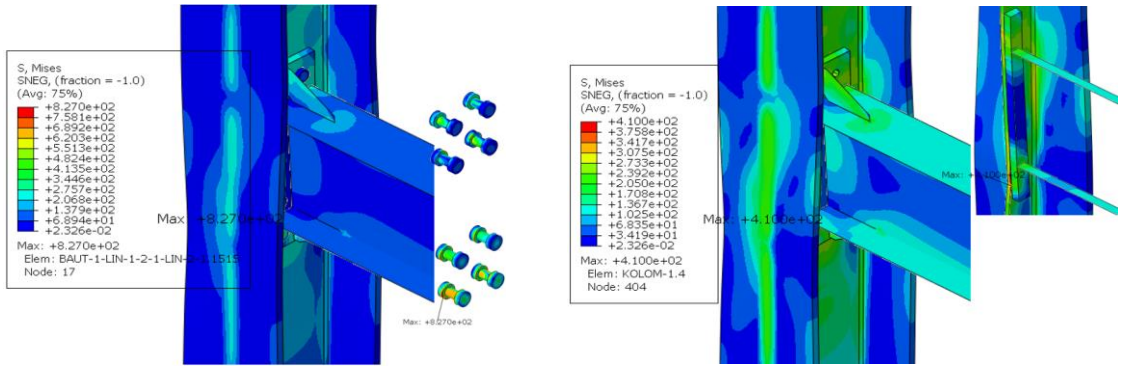


Gambar 10. Distribusi Tegangan Rotasi 4%

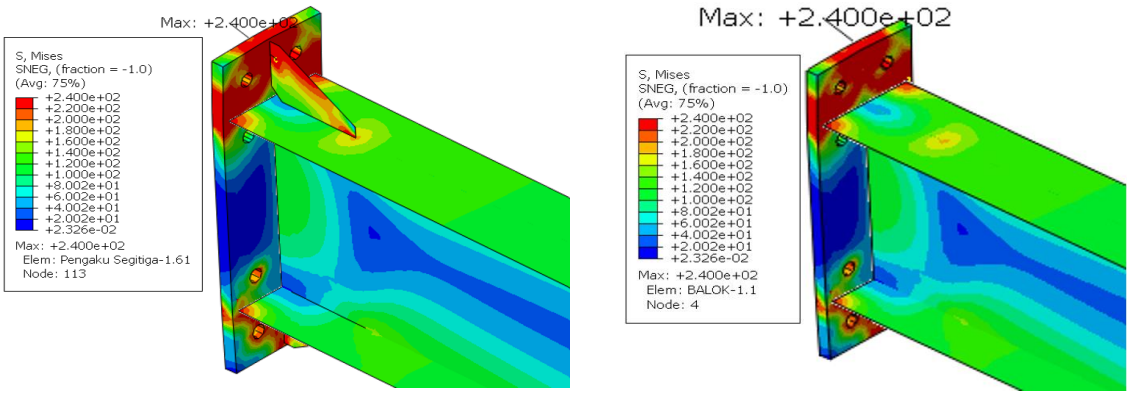
c. Distribusi Tegangan pada Rotasi 6%

Pada rotasi 6%, distribusi tegangan menunjukkan bahwa plastisasi telah berkembang secara signifikan pada daerah sambungan. Konsentrasi tegangan tertinggi masih terjadi pada baut dengan tegangan maksimum mencapai 827 MPa, yang menunjukkan bahwa baut telah mendekati kondisi tegangan ultimit dan menjadi komponen yang mengendalikan mekanisme keruntuhan sambungan. Selain itu, peningkatan tegangan juga terjadi pada badan kolom di sekitar daerah sambungan akibat transfer gaya tarik dan gaya geser dari pelat ujung menuju kolom. Hal ini menunjukkan bahwa seiring bertambahnya rotasi, kemampuan baut dan badan kolom dalam menahan beban mulai menurun sehingga deformasi plastis berkembang lebih luas pada daerah sambungan.

Distribusi tegangan pada rotasi 6% juga menunjukkan bahwa tegangan mulai menyebar ke elemen balok, terutama pada sayap balok yang mengalami tegangan maksimum sebesar 240 MPa sehingga material balok mulai memasuki kondisi leleh.



.



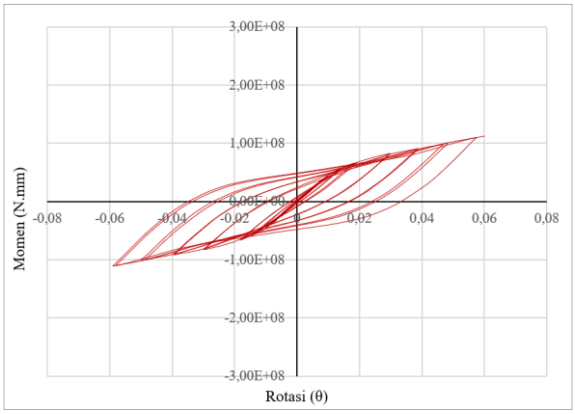
Gambar 11. Distribusi Tegangan Rotasi 6%

Kurva histeresis

Hubungan momen-rotasi digunakan untuk mengevaluasi kekakuan, kapasitas momen, dan daktilitas sambungan selama proses pembebanan. Berdasarkan hasil analisis numerik, kurva momen-rotasi menunjukkan bahwa kapasitas momen meningkat seiring bertambahnya rotasi, namun peningkatan tersebut mulai melandai setelah baut mengalami plastisasi.

Pada rotasi 4%, sambungan menghasilkan kapasitas momen sebesar 90,7035 kN.m, sedangkan pada rotasi 6% kapasitas momennya meningkat menjadi 112,7372 kN.m. Nilai tersebut masih jauh lebih kecil dibandingkan persyaratan minimum kapasitas sambungan sebesar 0,8Mpb = 245,52 kN.m. Rendahnya kapasitas momen ini menunjukkan bahwa sambungan kehilangan kemampuan dalam menahan beban akibat plastisasi baut yang terjadi lebih awal.

Bentuk kurva momen-rotasi memperlihatkan kecenderungan penurunan kekakuan setelah memasuki daerah plastis. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa sambungan masih memiliki perilaku semi-kaku (*semi-rigid*) dengan kemampuan rotasi yang terbatas. Oleh karena itu, berdasarkan distribusi tegangan dan hubungan momen-rotasi dapat disimpulkan bahwa model *benchmark* belum memenuhi persyaratan kinerja seismik sesuai AISC 341-22, sehingga diperlukan pengembangan konfigurasi sambungan untuk meningkatkan kapasitas momen, daktilitas, dan kemampuan rotasi.



Gambar 12. Kurva Histeresis

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) pada sambungan balok-kolom tipe *extended stiffened end-plate* arah sumbu lemah kolom, dapat disimpulkan bahwa distribusi tegangan menunjukkan mekanisme keruntuhan diawali oleh baut dan badan kolom. Pada kondisi leleh awal, konsentrasi tegangan mulai terjadi pada kedua komponen tersebut akibat transfer gaya tarik dan momen pada daerah sambungan. Seiring bertambahnya rotasi hingga 4% dan 6%, tegangan pada baut terus meningkat hingga mencapai 807,641 MPa dan 827 MPa, sedangkan tegangan mulai menyebar ke badan kolom dan sayap balok. Hal ini menunjukkan bahwa baut merupakan komponen yang mengalami plastisasi lebih dahulu dan menjadi elemen yang mengendalikan mekanisme keruntuhan sambungan.

Kurva momen-rotasi menunjukkan bahwa kapasitas momen meningkat seiring bertambahnya rotasi, namun belum mampu memenuhi persyaratan sambungan momen khusus sesuai AISC 341-22. Pada rotasi 4% diperoleh kapasitas momen sebesar 90,7035 kN·m, sedangkan pada rotasi 6% meningkat menjadi 112,7372 kN·m. Nilai tersebut masih lebih kecil dibandingkan persyaratan minimum 0,8Mpb sebesar 245,52 kN·m, sehingga sambungan belum memenuhi persyaratan rotasi minimum 4%. Kondisi ini

.

menunjukkan bahwa sambungan belum memiliki kapasitas momen dan kemampuan rotasi yang memadai untuk memenuhi kinerja seismik yang dipersyaratkan.

Meskipun hasil perhitungan manual menunjukkan bahwa rasio *Strong Column-Weak Beam* (SCWB) telah memenuhi ketentuan desain sesuai AISC 341-22, hasil analisis numerik memperlihatkan bahwa mekanisme plastisasi tidak berkembang sesuai konsep tersebut. Pelelehan justru terjadi lebih dahulu pada baut dan badan kolom sebelum terbentuk sendi plastis pada balok, sehingga perilaku sambungan belum mencerminkan mekanisme keruntuhan yang diharapkan pada sistem rangka pemikul momen khusus. Oleh karena itu, analisis numerik menunjukkan bahwa pemenuhan rasio SCWB secara manual belum menjamin tercapainya kinerja seismik sambungan secara aktual. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa evaluasi menggunakan metode elemen hingga diperlukan sebagai pelengkap perencanaan konvensional untuk mengidentifikasi mekanisme keruntuhan dan menilai kinerja sambungan secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

ABAQUS Documentation. (2024). *Finite Element Analysis User's Guide. Dassault Systèmes Simulia Corp.*

AISC. (2022a). *AISC 341-22: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. American Institute of Steel Construction.*

AISC. (2022b). *AISC 358-22: Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. American Institute of Steel Construction.*

AISC. (2022c). *AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction*.

Aouiche, D., Lahbari, N., & Belhadj, M. (2024). Numerical analysis of extended end-plate connections under dynamic loading. *Electronic Journal of Structural Engineering , 24*(3), 34–38. https://doi.org/10.56748/ejse.24610

ASTM. (2019). *ASTM A325 – Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength. ASTM International.*

BSN. (2020a). *SNI 1729-2020 - Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural. Badan Standardisasi Nasional.*

BSN. (2020b). *SNI 7860:2020 - Ketentuan seismik untuk bangunan gedung baja struktural. Badan Standardisasi Nasional.*

De'nan, F., Hashim, S., & Wahab, A. N. A. (2024). Optimizing Structural Connections: Finite Element Analysis of Extended End Plates and Bolt Dynamics. *Electronic Journal of Structural Engineering*. https://doi.org/10.56748/ejse.25665

FEMA. (2000a). *FEMA 350 - Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. Federal Emergency Management Agency.*

FEMA. (2000b). *FEMA 355D - State of the Art Report on Connection Performance. Federal Emergency Management Agency.*

Haghollahi, A., & Jannesar, R. (2018). Cyclic Behavior of Bolted Extended End-Plate Moment Connections with Different Sizes of End Plate and Bolt Stiffened by a Rib Plate. *Civil Engineering Journal*, *4*(1), 200–211. https://doi.org/10.28991/cej-030979