

STUDI NUMERIK PERILAKU SAMBUNGAN HAUNCHED BOLTED EXTENDED END PLATE AKIBAT BEBAN SIKLIK BERDASARKAN VARIASI SUDUT

Syarifah Nur'ain Ananda Fersanti¹, Budi Suswanto²

Fakultas Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh November^{1,2}

E-mail : syarifahfersanti99@gmail.com¹, budi_suswanto@ce.its.ac.id²

ABSTRAK

Sambungan merupakan komponen penting dalam struktur baja, memainkan peran signifikan dalam menentukan kinerja struktural secara keseluruhan, terutama di bawah beban siklik akibat efek seismik. Studi ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut haunch pada perilaku sambungan pelat ujung yang diperpanjang dengan baut dan haunch di bawah beban siklik menggunakan metode elemen hingga. Analisis dilakukan dengan memodelkan tiga variasi sudut haunch, yaitu 25°, 35°, dan 45°, menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Pemodelan mencakup elemen padat tiga dimensi, perilaku material elastis-plastik, dan interaksi kontak dengan kendala pengikat di dalam sambungan. Hasil validasi terhadap data eksperimental menunjukkan bahwa model numerik menunjukkan kesesuaian yang baik dalam merepresentasikan respons struktural. Hasil menunjukkan bahwa semua spesimen menunjukkan perilaku nonlinier yang stabil dengan respons histeresis yang relatif simetris dan tidak ada degradasi kekuatan yang signifikan. Variasi sudut haunch secara signifikan memengaruhi kapasitas, kekakuan, dan daktilitas sambungan. Spesimen dengan sudut penopang 35° menunjukkan kinerja paling optimal, mencapai kapasitas beban maksimum 758,48 kN, momen maksimum 586,24 kN·m, dan kekakuan awal tertinggi 184,26 kN/mm, serta kapasitas deformasi yang baik yang ditunjukkan oleh rotasi maksimum 0,0051 rad. Spesimen dengan sudut penopang 45° menunjukkan kekakuan awal yang relatif tinggi sebesar 178,34 kN/mm; namun, memiliki kapasitas yang lebih rendah dan kemampuan deformasi yang lebih terbatas. Sementara itu, spesimen dengan sudut penopang 25° menunjukkan kekakuan dan kapasitas terendah, meskipun menunjukkan kecenderungan yang lebih besar untuk deformasi plastis. Distribusi tegangan maksimum terkonsentrasi di daerah penopang, pelat ujung, dan di sekitar lubang baut, menunjukkan peran dominan komponen-komponen ini dalam mekanisme transfer gaya. Secara keseluruhan, sudut penopang 35° memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan, kekakuan, dan daktilitas, dan mampu mempertahankan kinerja struktural optimal di bawah beban siklik

Kata Kunci : *Bolted Extended End Plate (BEEP); Haunch; Steel Connection; Cyclic Load; ABAQUS*

PENDAHULUAN

Baja memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemudahan dalam fabrikasi dan pemasangan, serta fleksibilitas dalam desain (Herdiansah et al., 2025). Sifat-sifat yang dimiliki baja

dapat menciptakan struktur yang lebih ringan, tahan terhadap beban gempa dan lebih mudah untuk dirakit serta dibongkar dibandingkan beton bertulang (Al Ahmad et al., 2025). Salah satu elemen kunci dalam struktur baja adalah sambungan antar komponen seperti balok dan kolom

(Agustina et al., 2024). Sambungan struktur baja memainkan peran vital dalam memastikan integritas dan stabilitas bangunan, khususnya pada sistem moment resisting frame (MRF), yang merupakan salah satu sistem struktur utama untuk menahan gaya lateral akibat gempa (Amrullah & Kuspranoto, 2025).

Pengalaman dari gempa Northridge 1994 di California menunjukkan bahwa banyak sambungan las pada sistem MRF mengalami kerusakan serius, seperti retak pada sambungan balok-kolom di daerah sekitar pelat alas (weld access holes) dan daerah flens balok (Basuki & Rejeki, 2021). Kegagalan ini memicu evaluasi ulang terhadap praktik desain sambungan momen, dan mendorong pengembangan sambungan momen baru yang lebih kuat dan dapat diandalkan (Tolan et al., 2026). Salah satu jenis sambungan yang sering digunakan adalah sambungan penahan momen ujung-plat memanjang atau bolted extended end plate (BEEP), di mana pelat ujung (end plate) yang diperpanjang dan dihubungkan ke kolom menggunakan baut berkekuatan tinggi (Mahmud et al., 2024). Sambungan BEEP dapat meningkatkan kapasitas momen secara signifikan melalui distribusi tegangan yang lebih merata pada baut dan pelat (Halim & Leman, 2024). Sambungan BEEP memenuhi kriteria ketahanan seismik yang disyaratkan dalam ANSI/AISC 358-10, sehingga cocok diterapkan dalam struktur tahan gempa (Siregar, 2025).

Sambungan haunched bolted extended end-plate adalah elemen penting dalam struktur rangka baja, terutama dalam konteks beban seismik (Mahmud et al., 2024). Penambahan haunch pada area sambungan telah menjadi solusi efektif untuk meningkatkan kapasitas momen dan kekakuan sambungan, mengurangi tegangan pada sambungan serta mengarahkan pembentukan sendi plastis menjauh dari kolom, biasanya di luar zona sambungan, sehingga dapat menghindari kerusakan pada elemen kritis dan

meningkatkan kinerja seismik struktur (Chayadi et al., 2026). Di Indonesia, sambungan tipe haunch belum termasuk dalam kategori sambungan yang direkomendasikan oleh standar seperti AISC 358 atau SNI 7972 untuk bangunan tahan gempa (Syarifudin et al., 2024). Sambungan haunched bolted extended end plate dalam berbagai kondisi pembebanan dan memastikan kesesuaiannya dengan standar desain yang berlaku (Mahmud et al., 2024).

Salah satu tantangan utama dalam desain sambungan baja adalah memastikan sambungan memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan kombinasi beban yang terjadi (Akbar et al., 2024). Beban siklik merupakan tantangan utama dalam desain sambungan baja, terutama karena dapat menyebabkan kelelahan material (fatigue failure) dan deformasi plastis yang signifikan (Anwar & Rahmadani, 2025). Siklus pembebanan yang berulang dapat menyebabkan terjadinya retak mikro pada baut dan pelat ujung yang berkembang menjadi kegagalan struktural (Hariadi, 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku sambungan haunched bolted extended end plate di bawah beban siklik menggunakan metode elemen hingga hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi desain yang lebih baik untuk meningkatkan ketahanan sambungan terhadap beban dinamis serta memperpanjang umur layan struktur baja dalam aplikasi nyata.

TINJAUAN PUSTAKA

Sambungan Bolted Extended End Plate

Sambungan bolted extended end plate merupakan salah satu tipe sambungan balok-kolom baja yang banyak digunakan karena memiliki kapasitas momen yang tinggi serta kemudahan dalam proses fabrikasi dan pemasangan. Sambungan ini bekerja dengan mekanisme transfer gaya melalui

pelat ujung (end plate) dan baut tarik, sehingga mampu menahan momen lentur secara efektif. Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*) yaitu perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikatnya. Lapisan-lapisan perkerasan bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar (Sukirman, 1999).

Haunch (*Haunched Connection*)

Penambahan haunch pada sambungan bertujuan untuk meningkatkan kekakuan dan kapasitas momen sambungan, serta mengurangi konsentrasi tegangan di daerah kritis. Haunch biasanya ditempatkan pada bagian bawah balok dekat sambungan dengan kolom.

Menurut Lee et al. (2023), penggunaan haunch dapat meningkatkan kapasitas lentur sambungan secara signifikan serta menggeser lokasi plastis dari daerah sambungan ke balok, sehingga meningkatkan kinerja seismik. Penelitian lain oleh Celik dan Ellingwood (2010) menunjukkan bahwa *haunched connection* memiliki daktilitas yang lebih baik dibandingkan sambungan tanpa haunch.

Beban Siklik

Beban siklik merupakan pembebanan berulang yang umumnya digunakan untuk mensimulasikan pengaruh gempa terhadap struktur. Perilaku sambungan di bawah beban siklik sangat penting karena menentukan kemampuan disipasi energi, daktilitas, serta degradasi kekuatan.

Menurut FEMA 350 (2000), sambungan baja harus mampu mempertahankan kapasitasnya di bawah deformasi siklik besar tanpa mengalami kegagalan getas. Beban siklik dapat menyebabkan fenomena seperti *low-cycle fatigue*, degradasi kekakuan, serta penurunan kekuatan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan studi numerik menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) untuk menganalisis perilaku sambungan *haunched bolted extended end plate* akibat pembebanan siklik berdasarkan variasi sudut haunch. Penelitian dilaksanakan pada tahun 2025 di Program Studi Struktur, Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, dengan seluruh proses dilakukan secara komputasional menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Target penelitian ini adalah memperoleh gambaran kinerja sambungan baja dalam hal kekuatan, kekakuan, daktilitas, rotasi, dan kemampuan disipasi energi, serta mengetahui pengaruh variasi sudut haunch terhadap respons sambungan. Subjek penelitian berupa model numerik sambungan balok–kolom baja tipe *haunched bolted extended end plate* dengan variasi sudut haunch 25°, 35°, dan 45°.

Prosedur penelitian meliputi studi literatur, penentuan geometri dan properti material, pemodelan tiga dimensi sambungan, pendefinisian interaksi dan kondisi batas, penerapan beban siklik sesuai standar ANSI/AISC 341, validasi model, serta analisis parametris terhadap variasi sudut *haunch*. Data penelitian diperoleh dari hasil simulasi berupa kurva histeresis beban–perpindahan, kurva momen–rotasi, *envelope* dan *backbone curve*, serta parameter kinerja sambungan seperti kapasitas beban maksimum, momen maksimum, kekakuan awal, rotasi, daktilitas, dan energi disipasi. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui ekstraksi keluaran hasil simulasi pada ABAQUS, sedangkan analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan respons antar spesimen, menghitung parameter kinerja, melakukan analisis komparatif pengaruh sudut *haunch*, serta mengevaluasi akurasi model

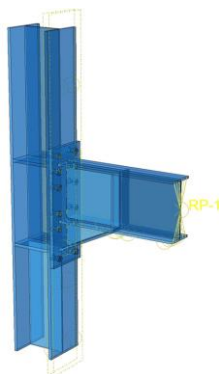
melalui validasi terhadap data eksperimen, sehingga diperoleh konfigurasi sudut *haunch* yang paling optimal untuk sambungan baja tahan gempa.

HASIL PENELITIAN

Tahap *assembly* dengan merealisasikan model sambungan secara utuh pada perangkat lunak ABAQUS yang terdiri dari elemen material, yaitu kolom, balok, end-plate, haunch, dan baut yang dapat dilihat pada Gambar 1.

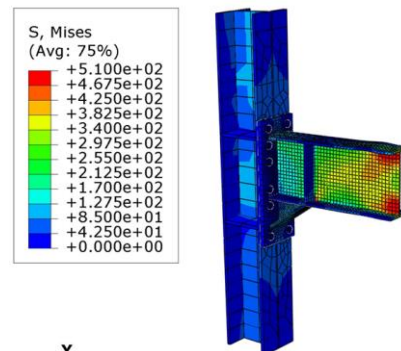


Figure 1. Hasil Assembly Sambungan Kontak antar komponen pada model, yang meliputi interaksi antara kolom, *balok*, *end-plate*, *haunch*, dan baut ditunjukkan pada Gambar 2. Kontak antar komponen didefinisikan untuk memastikan terjadinya transfer gaya dan momen secara realistis, sehingga perilaku sambungan dapat direpresentasikan sesuai dengan kondisi aktual. Selain itu, penggunaan reference point (RP-1) bertujuan untuk mengontrol dan memonitor respons struktur pada lokasi pembebanan.



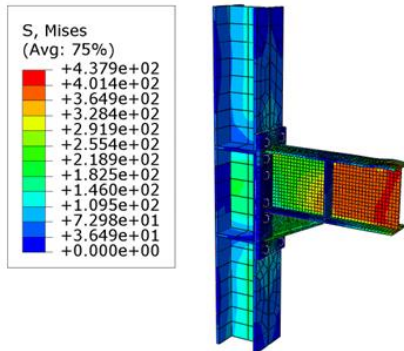
Gambar 2. Kontak Antar Komponen Dengan penerapan kendali perpindahan (*displacement control*), pengujian dan pemodelan numerik mampu

merepresentasikan respons struktur baja tahan gempa secara lebih realistis, khususnya dalam kondisi simpangan besar akibat beban gempa. Keselarasan antara model numerik dan pengujian laboratorium dicapai melalui adopsi konfigurasi eksperimen, mulai dari posisi spesimen, sistem pembebanan siklik berbasis protokol ANSI/AISC 341-10, hingga kondisi batas dan tumpuan. Asumsi tanpa beban aksial, pemodelan tumpuan sendi rol, pembatasan rotasi pada ujung balok, serta pengekangan deformasi luar bidang memastikan konsistensi antara kondisi uji dan simulasi. Dengan pendekatan ini, hasil pemodelan diharapkan mampu menggambarkan perilaku struktur secara akurat, valid, dan representatif terhadap respons aktual bangunan baja saat mengalami beban gempa.



Gambar 3. Hasil S-Mises EH1-TS35 Berdasarkan Gambar 3, distribusi tegangan von Mises pada spesimen EH1-TS35 menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan terbesar terletak pada daerah sambungan balok-kolom, khususnya di sekitar pelat sambung dan ujung haunch yang berdekatan dengan muka kolom. Hal ini menegaskan bahwa area tersebut merupakan zona kritis yang menerima kombinasi tegangan lentur dan geser akibat pembebanan siklik. Nilai tegangan maksimum yang mencapai sekitar $5,10 \times 10^2$ MPa serta pola gradasi tegangan yang menurun ke arah ujung balok dan badan kolom memperlihatkan mekanisme transfer gaya yang efektif melalui elemen haunch dan pelat sambung. Distribusi tegangan yang relatif merata pada balok

juga mengindikasikan tidak terjadinya kegagalan lokal secara prematur, sehingga model EH1-TS35 mampu merepresentasikan perilaku sambungan secara akurat dan konsisten dengan penelitian acuan yang digunakan sebagai validasi.



Gambar 4. Hasil S-MISES EH2-TS25
Distribusi tegangan von Mises pada spesimen EH2-TS25 dengan sudut *haunch* 25° masih terkonsentrasi di area sambungan balok–kolom, khususnya pada pelat sambung dan pertemuan *haunch* dengan balok. Namun, dibandingkan model EH1-TS35, nilai tegangan maksimum lebih rendah yaitu $4,38 \times 10^2$ MPa, yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur tegangan. Sebaran tegangan kemudian berangsur menurun ke arah ujung balok dan badan kolom, yang ditunjukkan oleh gradasi warna dari kuning hingga biru. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa mekanisme transfer gaya dari balok ke kolom berlangsung melalui elemen balok, end plate, dan haunch. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan dan leleh awal pada daerah sambungan karena distribusi tegangan cenderung terlokalisasi di sekitar sambungan.

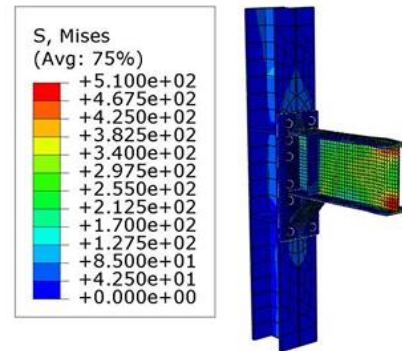


Figure 2. Hasil S-Mises EH3-TS45
Distribusi tegangan von Mises pada spesimen EH3-TS45 dengan sudut haunch 45° menunjukkan konsentrasi tegangan utama pada sambungan balok–kolom, khususnya di pertemuan haunch dengan balok serta di sekitar pelat sambung dan baut. Nilai tegangan maksimum mencapai sekitar $5,10 \times 10^2$ MPa, lebih tinggi dibandingkan model EH2-TS25 dan sebanding dengan EH1-TS35, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan sambungan akibat sudut haunch yang lebih besar. Meskipun konsentrasi tegangan tinggi terjadi di zona sambungan, distribusi tegangan pada balok relatif lebih merata, menunjukkan efektivitas haunch 45° dalam menyalurkan gaya. Pola tegangan ini mengindikasikan kecenderungan plastifikasi terkontrol di area sambungan, sesuai dengan prinsip desain sambungan tahan gempa untuk meningkatkan disipasi energi struktur.

Selanjutnya dilakukan analisis pada spesimen EH1-TS35 menggunakan ABAQUS. Parameter yang dianalisis meliputi beban maksimum, kekakuan awal, dan perpindahan maksimum. Hasil ABAQUS menunjukkan beban maksimum rata-rata sebesar 750,38 kN, kekakuan awal 184.26 kN/mm, serta perpindahan maksimum 7.244 mm dengan respons yang relatif simetris pada pembebanan positif dan negatif. Sementara itu, penelitian (Arthaya, *et al.*, 2020) melaporkan momen maksimum dan kekakuan awal rotasi dalam satuan yang berbeda, sehingga diperlukan konversi ke kurva momen–rotasi untuk perbandingan

yang setara. Rekapitulasi hasil perbandingan disajikan pada Tabel 1. Table 1. Beban Maksimum, Momen Maksimum, Perpindahan Maksimum, dan Kekakuan Awal Spesimen EH1-TS35

Parameter	Hasil ABAQUS		
	Positif	Negatif	Rata-Rata
Beban Maksimum Pmax(kN)	758.48	742.27	750.38
Beban Maksimum Mmax (kN.m)	592.13	580.35	586.24
Perpindahan Maksimum (mm)	7.324	7.164	7.244
Kekakuan Awal	184.26 kN/m	-	-

Kurva histeresis beban–perpindahan pada Gambar 6 digunakan untuk mengevaluasi perilaku nonlinier struktur akibat pembebanan siklik, khususnya terkait kekakuan, daktilitas, dan degradasi kekuatan. Pada spesimen dengan sudut 35°, kurva histeresis menunjukkan loop yang relatif stabil pada siklus awal, menandakan kemampuan struktur menahan deformasi berulang tanpa kehilangan kapasitas yang signifikan. Seiring meningkatnya siklus pembebanan, terjadi degradasi kekakuan akibat akumulasi deformasi plastis dan kerusakan material. Meskipun demikian, luas loop histeresis yang masih besar mengindikasikan kemampuan disipasi energi struktur yang tetap baik.

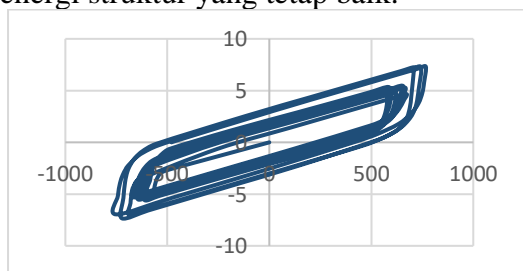


Figure 6. Kurva Histeresis Beban-Perpindahan EH1-TS35

Kurva momen–rotasi pada Gambar 7 menunjukkan bahwa momen maksimum hasil pemodelan ABAQUS yaitu 586,24 kN·m. Kedekatan nilai dan kesamaan tren kurva menunjukkan bahwa model numerik mampu merepresentasikan perilaku rotasi sambungan dengan baik dan mendekati hasil eksperimen. Perbedaan kecil pada momen ultimit dipengaruhi oleh asumsi dan idealisasi dalam pemodelan numerik, namun kesesuaian bentuk kurva menegaskan bahwa model ABAQUS layak digunakan untuk analisis spesimen selanjutnya.

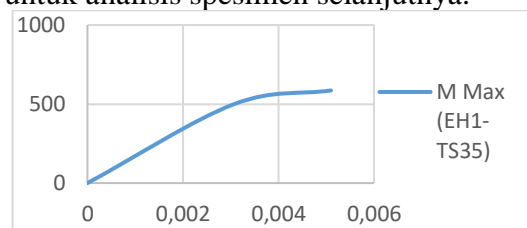


Figure 7. Kurva Momen-Rotasi EH1-TS35

Data energi internal (ALLIE) dan energi disipasi plastis (ALLPD) untuk spesimen EH1-TS35 ditampilkan pada Tabel 2.

Table 2. Energi Disipasi EH1-TS35

Parameter	Nilai
Energi Internal Maksimum (ALLIE)	49 MJ
Disipasi Energi Maksimum (ALLPD)	47 MJ
Rasio Disipasi Plastis	95.9%
Energi Elastis Tertahan	2 MJ

Parameter energi pada spesimen EH1-TS35 menunjukkan kemampuan disipasi energi yang sangat baik selama pembebanan nonlinier. Nilai Internal Energy (ALLIE) maksimum sebesar 49 MJ menandakan kapasitas energi total yang dapat diserap sebelum kondisi ultimit. Sebagian besar energi tersebut terdisipasi melalui deformasi plastis, ditunjukkan oleh nilai Plastic Dissipation (ALLPD) sebesar 47 MJ atau sekitar 95,8% dari total energi. Sementara itu, energi elastis yang tersisa relatif kecil,

yaitu 2 MJ, yang mengindikasikan bahwa respons struktur didominasi oleh perilaku plastis. Kondisi ini mencerminkan karakteristik sambungan baja yang efektif dalam menyerap dan mendisipasikan energi gempa.

Hasil analisis numerik spesimen EH2-TS25 dirangkum pada Tabel 3 yang meliputi beban maksimum, momen maksimum, perpindahan maksimum, serta kekakuan awal sambungan.

Table 3. Beban Maksimum, Momen Maksimum, Perpindahan Maksimum dan Kekakuan Awal Spesimen EH-2-TS25

Parameter	Nilai
Beban Maksimum Positif F+max (kN)	626,44
Beban Maksimum Negatif F-max (kN)	635,45
Momen Maksimum Positif F+max (kN.m)	489,87
Momen Maksimum Negatif F-max (kN.m)	496,92
Perpindahan Maksimum Positif (mm)	5,62
Perpindahan Maksimum Negatif (mm)	5,63
Kekakuan Awal, K_0 (kN/mm)	130,44

Spesimen EH2-TS25 menunjukkan kapasitas beban maksimum sebesar 626,44 kN pada arah positif dan 635,46 kN pada arah negatif, dengan perbedaan yang masih dalam batas wajar akibat pengaruh nonlinieritas pembebanan siklik. Konversi gaya lateral menghasilkan momen maksimum sambungan sebesar 489,87 kN·m arah positif dan 496,92 kN·m arah negatif, yang menandakan kapasitas sambungan hasil modifikasi yang memadai. Perpindahan maksimum yang terjadi pada kondisi positif dan negatif masing-masing sebesar 5.62 mm dan 5.63 mm, menunjukkan bahwa sambungan

mengalami deformasi yang cukup besar sebelum mencapai kondisi beban puncak, sementara nilai kekakuan awal sebesar 130,44 kN/mm menggambarkan respons elastis awal sambungan sebelum memasuki fase nonlinier.

Kurva histeresis beban-perpindahan sambungan EH2-TS25 dapat dilihat pada Gambar 8. menunjukkan pola respons yang mirip dengan spesimen validasi EH1-TS35, dengan nilai beban maksimum yang relatif identik. Hal ini menunjukkan bahwa variasi sudut haunch dari 35° menjadi 25° tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap kapasitas beban sambungan pada konfigurasi geometri yang ditinjau.

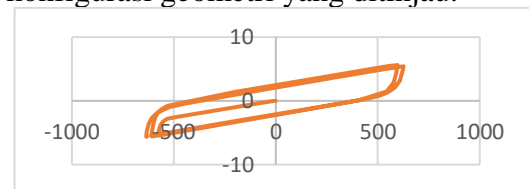


Figure 8. Kurva Histeresis Beban-Perpindahan EH2-TS25

Kurva momen-rotasi pada Gambar 9 menunjukkan hubungan yang hampir linear pada tahap awal pembebanan, yang mencerminkan respons elastis sambungan. Seiring meningkatnya rotasi, kemiringan kurva mulai menurun, menandakan transisi menuju perilaku nonlinier akibat terjadinya deformasi plastis pada elemen sambungan.

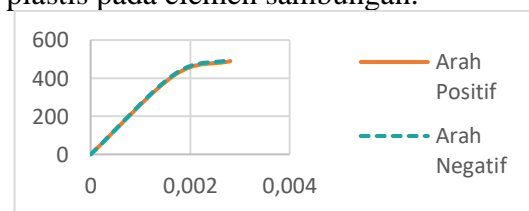


Figure 9. Kurva Momen-Rotasi Spesimen EH2-TS25

Hasil analisis energi pada spesimen EH2-TS25 pada Tabel 4 menunjukkan energi internal maksimum sebesar 50 MJ yang seluruhnya terdisipasi melalui deformasi plastis, ditunjukkan oleh rasio disipasi plastis sebesar 100%. Tidak adanya energi elastis tertahan mengindikasikan bahwa sambungan dengan sudut haunch 25° memiliki kemampuan disipasi energi yang

sangat baik dan lebih efektif dalam menyerap energi pembebanan siklik dibandingkan konfigurasi dengan sudut haunch 35°.

Table 4. Energi Disipasi EH2-TS25

Parameter	Nilai
Energi Internal Maksimum (ALLIE)	50 MJ
Disipasi Energi Maksimum (ALLPD)	50 MJ
Rasio Disipasi Plastis Energi Tertahan	100%
Energi Elastis	0 MJ

Hasil analisis numerik spesimen EH2-TS25 dirangkum pada Tabel 3 yang meliputi beban maksimum, momen maksimum, perpindahan maksimum, serta kekakuan awal sambungan.

Table 5. Beban Maksimum, Momen Maksimum, Perpindahan Maksimum dan Kekakuan Awal Spesimen EH3-TS25

Parameter	Nilai
Beban Maksimum Positif F+max (kN)	724,33
Beban Maksimum Negatiff F-max (kN)	711,11
Momen Maksimum Positif F+max (kN.m)	566,42
Momen Maksimum Negatif F-max (kN.m)	556,09
Perpindahan Maksimum Positif (mm)	6,94
Perpindahan Maksimum Negatif (mm)	7,41
Kelakuan Awal, K_0 (kN/mm)	178,34

Spesimen EH3-TS45 menunjukkan kapasitas beban maksimum yang relatif simetris pada pembebanan positif 724,33 kN dan negatif 711,11 kN, menandakan respons sambungan yang stabil terhadap beban siklik. Konversi gaya lateral

menghasilkan momen maksimum sebesar 566,42 kN·m arah positif dan 556,09 kN·m arah negatif, yang mencerminkan kapasitas momen tinggi akibat kontribusi haunch 45° dalam meningkatkan kekakuan dan kapasitas lentur sambungan. Perpindahan maksimum yang cukup besar dan seimbang pada kedua arah menunjukkan perilaku deformasi yang daktil dan stabil. Nilai kekakuan awal sebesar 178,34 kN/mm lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan sudut haunch lebih kecil, mengindikasikan bahwa peningkatan sudut haunch menjadi 45° berpengaruh signifikan dalam meningkatkan kekakuan elastis awal sambungan tanpa mengurangi kemampuan deformasi.

Kurva histeresis beban–perpindahan pada spesimen EH3-TS45 pada Gambar 10 menunjukkan pola loop yang stabil dan simetris pada pembebanan positif dan negatif, menandakan respons sambungan yang konsisten terhadap beban siklik. Luas loop histeresis yang besar mengindikasikan kemampuan disipasi energi yang baik melalui deformasi inelastik. Seiring bertambahnya siklus pembebanan, terjadi degradasi kekakuan akibat akumulasi deformasi plastis dan kerusakan lokal.

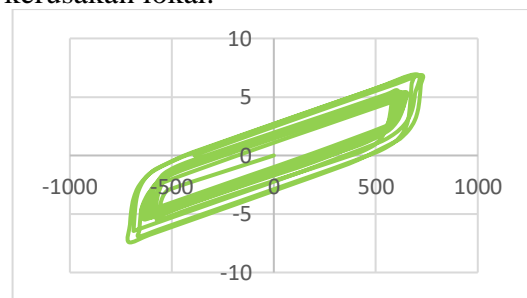


Figure 10. Kurva Histeresis Beban-Perpindahan Spesimen EH3-TS45

Kurva momen–rotasi spesimen EH3 TS45 yang disajikan pada Gambar 11 dalam bentuk kurva linear dari titik asal hingga mencapai momen maksimum. Penyajian kurva dalam bentuk linear dimaksudkan untuk merepresentasikan respons elastis global sambungan hingga kondisi puncak, serta memudahkan perbandingan antar

spesimen dengan konfigurasi sudut haunch yang berbeda.

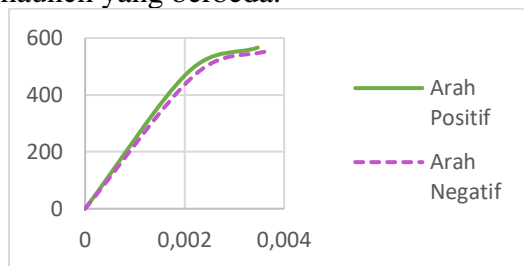


Figure 11. Kurva Momen-Rotasi EH3-TS45

Hasil analisis Spesimen EH3-TS45 pada Tabel 6 memiliki energi internal maksimum sebesar 45,5 MJ dengan energi disipasi plastis sebesar 45 MJ, sehingga rasio disipasi plastis mencapai 98,9%. Nilai ini menunjukkan bahwa respons sambungan didominasi oleh deformasi plastis, sementara energi elastis tertahan relatif kecil (0,5 MJ). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sambungan memiliki kemampuan disipasi energi yang baik serta perilaku daktil yang memadai selama pembebanan siklik.

Table 6. Energi Disipasi EH3-TS45

Parameter	Nilai
Energi Internal Maksimum (ALLIE)	45.5 MJ
Disipasi Energi Maksimum (ALLPD)	45 MJ
Rasio Disipasi Plastis	98.9%
Energi Elastis Tertahan	0.5 MJ

Pengaruh variasi sudut haunch terhadap kapasitas beban dan kekakuan awal sambungan dianalisis melalui perbandingan ketiga spesimen. Dari sisi kekakuan awal, spesimen EH1-TS35 menunjukkan nilai tertinggi, yaitu 184,26 kN/mm, sedangkan EH3-TS45 memiliki kekakuan awal sebesar 178,34 kN/mm. Spesimen EH2-TS25 menunjukkan kekakuan awal yang paling rendah, yaitu 130,44 kN/mm.

Perbandingan kurva beban-perpindahan antar spesimen ditunjukkan melalui

envelope (backbone) curve pada Gambar 12.

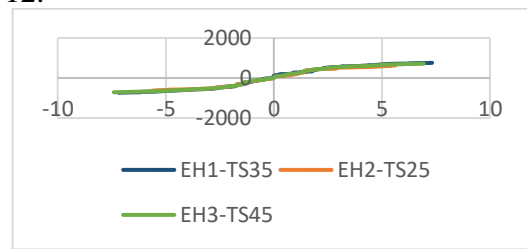


Figure 12. Perbandingan Kurva Beban-Perpindahan Antar Spesimen

Perbandingan kurva momen-rotasi antar spesimen disajikan pada Tabel 7. Spesimen EH1-TS35 menunjukkan momen maksimum tertinggi sebesar 586,24 kN·m dengan rotasi maksimum 0,0051 rad, yang menunjukkan kombinasi kapasitas momen dan kemampuan deformasi yang baik. Spesimen EH3-TS45 memiliki momen maksimum yang hampir sebanding, yaitu 561,26 kN·m, namun dengan rotasi maksimum yang lebih kecil sebesar 0,0036 rad, yang mengindikasikan respons sambungan yang lebih kaku. Sementara itu, spesimen EH2-TS25 menunjukkan momen maksimum paling rendah sebesar 561,22 kN·m dengan rotasi maksimum 0,0023 rad. Perbandingan kurva momen-rotasi antar spesimen ditunjukkan pada Gambar 13.

Table 7. Perbandingan Kapasitas Momen dan Rotasi Antar Spesimen

Spesimen	Sudut Haunch	Momen Maksimum (kN.m)	Rotasi Maksimum (rad)
EH1-TS35	35°	586.24	0.0051
EH2-TS25	25°	561,22	0.0023
EH3-TS45	45°	561.26	0.0036

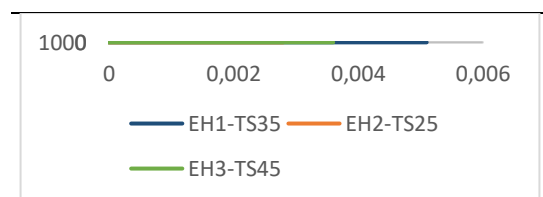


Figure 13. Perbandingan Kurva Momen-Rotasi Antar Spesimen

Kapasitas disipasi energi sambungan dievaluasi, Spesimen EH3-TS45 menunjukkan energi internal terendah yaitu 45.5 MJ tetapi masih mempertahankan rasio disipasi plastis yang tinggi (98.9%). Ini mengindikasikan bahwa meskipun total energi yang diserap lebih rendah, efisiensi disipasi energinya tetap baik. Perbedaan kapasitas energi antar spesimen mencerminkan perbedaan dalam perilaku deformasi plastis. Sudut haunch yang lebih landai (25°) cenderung memberikan kapasitas disipasi energi yang lebih baik, sementara sudut yang lebih curam (45°) memberikan kapasitas energi yang lebih rendah tetapi tetap dengan efisiensi disipasi yang tinggi.

Dalam penelitian ini drift ratio dihitung berdasarkan perpindahan ujung balok terhadap tinggi kolom yang menunjukkan hasil EH3-TS45 menunjukkan drift ratio yang sama, yaitu 0,36%, sedangkan spesimen EH2-TS25 memiliki drift ratio yang lebih kecil sebesar 0,22%. Nilai drift ratio yang lebih rendah pada EH2-TS25 menunjukkan bahwa sambungan dengan sudut haunch yang lebih kecil mengalami deformasi lateral yang lebih terbatas. Namun, seluruh nilai drift ratio yang diperoleh masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk struktur baja tahan gempa.

Daktilitas sambungan dipengaruhi secara signifikan oleh variasi sudut haunch, yang dievaluasi melalui rotasi maksimum, drift ratio, dan kapasitas disipasi energi. Spesimen EH1-TS35 menunjukkan daktilitas paling seimbang dengan rotasi maksimum dan drift ratio yang relatif besar serta kemampuan disipasi energi yang tinggi, sehingga sudut haunch 35° memberikan kombinasi optimal antara kekakuan dan deformasi plastis. Spesimen EH2-TS25 memiliki mekanisme plastis yang baik dengan rasio disipasi energi mencapai 100%, namun kemampuan deformasi lateral relatif terbatas. Sementara itu, spesimen EH3-TS45

memiliki kekakuan dan kapasitas beban tinggi, tetapi daktilitas lebih rendah akibat berkurangnya kemampuan deformasi plastis. Secara keseluruhan, sudut haunch sedang memberikan kinerja daktilitas terbaik dibandingkan sudut yang terlalu kecil atau terlalu besar.

Hasil pemodelan ABAQUS menunjukkan bahwa tegangan tertinggi pada seluruh spesimen terlokalisasi di daerah sambungan balok-kolom, khususnya pada end-plate, haunch, dan zona pertemuan balok-kolom sebagai area kritis transfer gaya. Spesimen EH2-TS25 memperlihatkan penyebaran deformasi plastis yang lebih luas, menandakan mekanisme keruntuhan bertahap dan dominasi perilaku plastis. Spesimen EH1-TS35 menunjukkan distribusi tegangan yang relatif seimbang dengan terbentuknya sendi plastis yang stabil. Sebaliknya, spesimen EH3-TS45 mengalami konsentrasi tegangan yang lebih tinggi dan terlokalisasi, sehingga mekanisme keruntuhannya cenderung lebih getas. Secara keseluruhan, sudut haunch memengaruhi pola tegangan dan mekanisme keruntuhan, di mana sudut 35° memberikan distribusi tegangan dan stabilitas keruntuhan yang paling seimbang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa sambungan haunched bolted extended end plate dengan variasi sudut haunch 25° , 35° , dan 45° memiliki perilaku nonlinier yang stabil di bawah pembebanan siklik, ditandai dengan respons histeresis yang relatif simetris tanpa degradasi kekuatan yang signifikan. Variasi sudut haunch terbukti berpengaruh terhadap kapasitas, kekakuan, dan daktilitas sambungan. Sudut haunch 35° memberikan kinerja paling optimal dengan kapasitas beban maksimum, momen maksimum, dan kekakuan awal tertinggi, serta tetap mempertahankan kemampuan deformasi

yang baik. Sementara itu, sudut haunch 45° menunjukkan kekakuan tinggi namun dengan deformasi yang lebih terbatas, dan sudut haunch 25° menghasilkan kapasitas serta kekakuan terendah meskipun memiliki kecenderungan deformasi plastis yang lebih besar. Distribusi tegangan maksimum terkonsentrasi pada daerah haunch, pelat ujung, dan sekitar baut, yang menunjukkan peran dominan elemen tersebut dalam mekanisme transfer gaya. Secara keseluruhan, sudut haunch 35° memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan, kekakuan, dan daktilitas sehingga direkomendasikan sebagai konfigurasi yang paling efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, T., Tjondro, J. A., & Setiawan, D. (2024). *Uji Eksperimental Sambungan Pelat Baja Perantara dengan Sekrup Kunci pada Hubungan Balok-Kolom Kayu Meranti Merah*. 10(2), 177–188.
- Akbar, F., Depari, A. S., & Gusti, D. S. (2024). *Perencanaan Loading Frame Menggunakan Material Baja Wind Cathcer Gedung A , Institut Teknologi Kalimantan*. 8(2), 197–21.
- Al Ahmad, M. H., Artawan, I. P., Ridho, M. A., Wahyudi, E., & Harviyanti, E. (2025). *Analisis Kinerja Struktural Jembatan Gantung Berbasis Baja Ringan untuk Daerah Rawan Gempa*. 8(1), 997–1009. <https://doi.org/doi.org/10.56338/jks.v8i1.7172>
- Amrullah, R., & Kuspranoto, A. H. (2025). *Peningkatan Keamanan Struktur Bangunan Balai Kesehatan Masyarakat Melalui Penggantian H-Beam*. 2(1), 11–15.
- Anwar, & Rahmadani. (2025). *Analisis Metode Elemen Hingga Pada Kolom Komposit , Sambungan Baja dan Keruntuhan Progresif*. 330–36. <https://doi.org/doi.org/10.56208/jiectech.3.1.30-36>
- Arthaya, B., Wahab, F., Setiawan, A., Prasetyo, & Mulyadi. (2020). *Analisis Kinematik dan Statika dari Gerak Jari Prostetik dengan Mekanisme Rack and Pinion*. 137–149.
- Basuki, & Rejeki, S. (2021). *Pendekatan dan Metoda Penelitian Fenomena Gempa Bumi*. 2(2).
- Celik, O. C., & Ellingwood, B. R. (2010). *Seismic Fragilities for Non-Ductile Reinforced Concrete Frames—Role of Aleatoric and Epistemic Uncertainties*. *Structural Safety*, 32(1), 1–12.
- Chayadi, O., Manurung, E. H., & Prajoko, A. (2026). *Evaluasi Perilaku Sambungan Baja Pada Struktur Rangka Momen Tahan Gempa: Analisis Studi Literatur Dan Statistik Terhadap Sambungan Tipe Extended End-Plate*. *Sinergi: Jurnal Riset Ilmiah*, 3(1), 317–326.
- FEMA-350. (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*.
- Halim, K. T., & Leman, S. (2024). *Analisis Distribusi Tegangan Arah Horizontal Dengan Sambungan Baut Pada Pelat Tarik Menggunakan Software Autodesk Inventor*. 7(1), 123–136.
- Hariadi. (2020). *Identifikasi Unsur Paduan Dan Struktur Mikro Perpatahan Baut Standar Astm 325 Akibat Beban Pengetatan Pada System Power Train Bulldozer*. 3(1), 46–53.
- Herdiansah, Y., Syarifudin, A., Yuana, P. S., & Hakim, L. (2025). *Analisis Kinerja Seismik Sambungan Balok–Kolom Baja Sistem Haunch Pada Sumbu Minor Kolom Melalui Pendekatan Numerik*. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 8(2), 143–152.
- Mahmud, F., Merdana, I. N., & Suharto, L. (2024). *Analisa Numerik Perkuatan Sambungan Balok-Kolom Dengan Haunch , Extended*

- End Plate Dan Baut Dengan Metode Elemen Hingga Pada Bangunan SMF: Numerical Analysis of Beam-Column Connections with Haunch, Extended End Plate and Bolts Using Finite Element Method. *Spektrum Sipil*, 11(1), 9–18.
- S. Lee et al. (2023). Toxicity and Biodistribution of Fragmented Polypropylene Microplastics in ICR Mice. *Int. J. Mol. Sci*, 24.
- Siregar, A. P. (2025). *Analisis dan Optimalisasi Desain Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa di Kawasan Rawan Gempa (Studi Kasus : Kota Medan)*. 1(2), 66–73.
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya* (1st ed.). Nova.
- Syarifudin, A., Hakim, L., & Yuana, P. S. (2024). *Analisis potensi kegagalan yang mungkin terjadi pada sambungan haunched yang biasa diterapkan di indonesia dengan metode numerik*. 17(1), 37–46.
- Tolan, D. J., Prikasari, E., & Erfan, M. (2026). *Studi Numerikal Sambungan Balok–Kolom Baja dengan Tipe Pelat Ujung Diperpanjang (In Press)*.