

## Evaluasi Kekuatan dan Daktilitas Sambungan BEEP pada Struktur Baja SRPMK dengan Variasi Sudut Pengaku

Taufik Ramlan Wijaya<sup>\*1</sup>, Randy Yonathan Rurut<sup>2</sup>

Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta Selatan

e-mail: <sup>\*1</sup>taufik\_ramlan@istn.ac.id, <sup>2</sup>rurutrandy@gmail.com.

### Abstract

*This study evaluates the ultimate strength and ductility of the type 8ES of the bolted extended end-plate (BEEP) connections in steel building structures designed as Special Moment Resisting Frame Systems (SRPMK). Numerical simulations of six three-dimensional finite element models were performed by varying two stiffener angles and three end-plate connection locations. All models were found to meet the strength criteria for static and dynamic loading. The BEEP with 30° stiffener angle had higher ultimate moments ( $M_u$ ) compared to those with 45° angles. For all connection locations, the numerical models with 30° stiffener angle performed better. This finding proved sufficient strength against seismic loads. The maximum stress (367.34 MPa) is still below the design yield strength (369 MPa). Meanwhile, connection's stiffener with 45° angle were found to have a better and more consistent ductility ( $\mu = 3-4$ ) despite their lower capacity. It was overall concluded that the 30° angle connection was more suitable for SRPMK applications in seismic areas due to its better capacity and material efficiency.*

**Keywords:** bolted end-plate connection, special moment frame, ductility, finite element method, seismic load

### Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kekuatan ultimit dan daktilitas sambungan bolted extended end-plate (BEEP) tipe 8ES pada struktur gedung baja yang dirancang sebagai Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Simulasi numerik terhadap 6 model elemen hingga tiga dimensi telah dilakukan dengan memvariasikan dua sudut pengaku dan tiga lokasi sambungan end-plate. Semua model didapatkan memenuhi kriteria kekuatan akibat pembebanan statik dan dinamik. Sambungan BEEP bersudut pengaku 30° memiliki momen ultimit ( $M_u$ ) lebih tinggi dibandingkan dengan yang 45°. Untuk semua lokasi sambungan, semua model numerik

dengan sambungan bersudut pengaku 30° lebih unggul. Hal tersebut membuktikan kecukupan kekuatan terhadap beban seismik. Tegangan maksimumnya (367,34 MPa) pun masih di bawah kuat leleh desain (369 MPa). Sementara, sambungan dengan sudut pengaku 45° memiliki daktilitas lebih baik dan konsisten ( $\mu = 3-4$ ) meskipun kapasitasnya lebih rendah. Dengan demikian, sambungan bersudut pengaku 30° lebih layak untuk aplikasi SRPMK di daerah seismik karena kecukupan kapasitas dan efisiensi materialnya.

**Kata Kunci:** sambungan end-plate, rangka momen khusus, daktilitas, metode elemen hingga, beban seismik.

### PENDAHULUAN

Struktur baja Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) banyak digunakan di wilayah dengan tingkat risiko gempa tinggi. Hal tersebut karena karakteristik daktilitas yang sangat baik dan kemampuannya menyerap energi gempa melalui deformasi inelastis (Prabowo, *et al.*, 2020; Pourzeynali & Shakeri, 2015). Penggunaan SRPMK menuntut pemahaman mendalam terhadap respons dinamis dari elemen-elemen struktural, khususnya sambungan balok-kolom, yang merupakan komponen krusial dan harus memenuhi standar prakualifikasi sesuai regulasi SRPMK (Abdurrahman, 2022). Kinerja SRPMK sangat bergantung pada sambungan balok-kolom, yang harus memiliki kekuatan dan daktilitas memadai.

Sambungan antara balok dan kolom seringkali menjadi titik krusial dalam mencegah terjadinya kegagalan kolom sebelum keruntuhan balok dan pelat lantai. Kegagalan pada kolom dapat dipicu oleh munculnya momen dan deformasi lokal pada sambungan tersebut ketika struktur mengalami pembebanan berulang, termasuk eksitasi seismik (Jabłońska-krysiewicz, 2015; Bahaz, *et al.*, 2018; dan Savaliya, 2024).

Untuk mencegah hal tersebut, dan

memperkuatnya, sambungan balok-kolom ditambahkan kombinasi ujung pelat (*end-plate*), diperpanjang (*extended*), ditambahkan jumlah bautnya (dari 4 menjadi 8 baut) dan diberikan pengaku (*stiffener*). Sehingga, kini dikenal sejumlah istilah *Bolted Extended End-Plate* (BEEP) connections banyak digunakan untuk struktur bangunan baja. Sambungan tersebut telah menunjukkan kinerja yang baik terhadap beban siklik (Yehezkiel, 2020).

Pemberian pengaku (*stiffener*) pada sambungan jenis ini dapat lebih meningkatkan kekakuan dan daktilitasnya, khususnya untuk struktur gedung baja yang dirancang sebagai SRPMK (Hayati, 2016). Yoganata, *et al.* (2020) turut menegaskan bahwa diantara keunggulan *extended end-plate* adalah kemampuannya dalam mengurangi *displacement*. Diantara jenis yang sering digunakan adalah tipe 8ES (*Eight-Bolt Extended Stiffened End-Plate*) yang merupakan salah satu tipe terpraktualifikasi menurut SNI 7972:2020 (BSN, 2020c).

Namun demikian, kajian komprehensif mengenai pengaruh sudut pengaku terhadap daktilitas sambungan 8ES pada struktur SRPMK berlantai banyak masih terbatas.

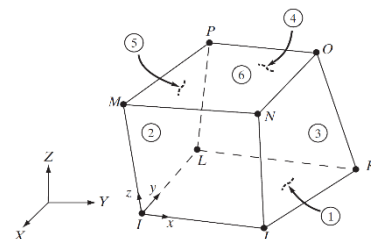
## METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kekuatan ultimit dan perilaku daktilitas sambungan end-plate 8ES dengan variasi sudut pengaku  $30^\circ$  dan  $45^\circ$ . Tinjauan dilakukan pada tiga lokasi berbeda di Lantai 8 (teratas), yaitu: tengah-tengah bangunan; tepi bangunan; dan pojok bangunan. Parameter yang ditinjau meliputi kapasitas momen ultimit, tegangan maksimum, dan indeks daktilitas.

Simulasi numerik berbasiskan formulasi elemen hingga (*finite element analysis*) sebagai tertuang di dalam perangkat ANSYS (ANSYS Inc., 2020) telah dilakukan. Silalahi, *et al.* (2020) dan Hariadi, *et al.* (2025) telah mendemonstrasikan bahwa model elemen hingga 3 dimensi (*solid finite elements*) valid untuk analisis sambungan end-plate struktur baja. Hasil analisis yang mereka lakukan mendekati hasil eksperimen dengan tingkat kesalahan yang dapat ditolerir. Namun, tidak ditemukan catatan mengenai jenis elemen hingga solid yang digunakan oleh kedua makalah di atas, termasuk juga jumlah simpul (node) per-elemen dan jumlah serta jenis translasi yang terjadi di setiap simpulnya.

Sebuah struktur gedung milik Pemerintah Provinsi DKI Jakarta berlantai delapan dan terbuat dari bahan baja telah dijadikan sebagai obyek penelitian. Gedung tersebut memiliki luas denah  $30 \text{ m} \times 44 \text{ m}$ , tinggi total 33.6 m, serta tinggi antar lantai rerata sebesar 4.2 m. Dalam tahap perancangannya struktur gedung tersebut dirancang sebagai SRPMK pada kedua arah utama. Model elemen hingga dari struktur tersebut dibangun dengan ketentuan-ketentuan sebagai berikut:

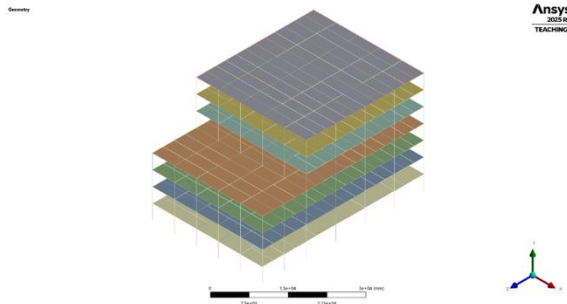
- *Elemen Struktur*: Balok induk menggunakan profil IWF  $350 \times 175$ , sedangkan kolom menggunakan profil H  $400 \times 400$ . Pelat lantai beton dimodelkan sebagai *diaphragm* kaku untuk menjamin kerja sama struktur dalam mendistribusikan beban lateral.
- *Material Struktur*: Mutu baja BJ-37 ( $f_y = 240 \text{ MPa}$ ,  $f_u = 370 \text{ MPa}$ ,  $E = 200.000 \text{ MPa}$ ) digunakan untuk elemen balok dan kolom. Modulus geser ( $G$ ) ditetapkan  $80.000 \text{ MPa}$  dan angka Poisson ( $\nu$ ) 0.3.
- *Material Sambungan*: End-plate dan pengaku menggunakan mutu baja HSS BJ 55 yang lebih tinggi ( $f_y = 410 \text{ MPa}$ ,  $f_u = 550 \text{ MPa}$ ) untuk mencegah kegagalan prematur. Baut yang digunakan adalah mutu 8.8 ( $f_y = 640 \text{ MPa}$ ) dengan pretension yang diterapkan untuk mensimulasikan kondisi sambungan tipe slip-critical.
- *Pilihan Elemen Hingga dan Meshing*: Seluruh elemen struktural dan sambungan end-plate dimodelkan menggunakan elemen padat 8 simpul (*8-noded brick elements*) yang memiliki tiga derajat kebebasan translasi di tiap simpulnya, yaitu masing-masing pada arah  $-x$ ,  $-y$ , dan  $-z$ . Dalam perangkat lunak ANSYS elemen tersebut disebut sebagai Solid185 (Lihat Gambar 1).



Gambar 1 Elemen Solid185 dalam ANSYS

Meshing yang halus (*fine mesh*) diterapkan pada area kritis di sekitar lubang baut, daerah las, dan ujung pengaku untuk menangkap konsentrasi tegangan dengan

baik. Konvergensi *mesh* telah diuji untuk memastikan hasil yang independen dari ukuran elemen. Struktur bangunan gedung dibangun menggunakan perangkat lunak ANSYS APDL (ANSYS Inc., 2020) sebagaimana terlihat dalam Gambar 3.



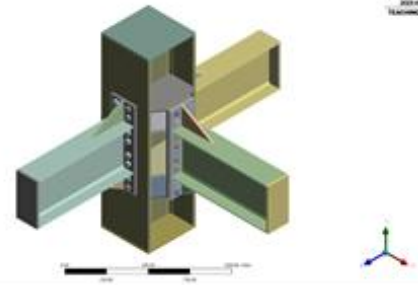
Gambar 2 Model 3D Struktur Gedung

- **Kondisi Batas:** Sambungan BEEP 8ES dalam kajian ini diasumsikan dapat memenuhi kondisi *fully-rigid*, yakni tidak ada peralihan lokal apapun pada sambungan balok-kolom. Model sambungan dibebani dengan menerapkan gaya-gaya dalam (momen, geser, aksial) yang diperoleh dari analisis struktur global pada ujung-ujung balok dan kolom yang dipotong. Tumpuan sendi dan rol diterapkan pada ujung kolom yang terpotong sesuai dengan kondisi deformasi dari model global.
- **Geometri dan Variasi:** Model sambungan mengacu pada SNI 7972:2020 untuk tipe 8ES. Sementara, dua variabel utama yang dikaji adalah (1) sudut pengaku ( $30^\circ$  dan  $45^\circ$ ), dan (2) tiga lokasi posisi sambungan pada lantai 8 bangunan tersebut, yaitu pada: (a) Tengah-tengah bangunan (MD); (b) Sisi Tepi (ED); dan (c) Sudut pojok tempat pertemuan dua sisi bangunan (CR). Sehingga kombinasi semua variabel menghasilkan 6 model simulasi yang kode untuk masing-masing model dapat dilihat dalam Tabel 1. Adapun Visualisasi model sambungan untuk semua model dapat dilihat dalam Gambar 3 – 8.

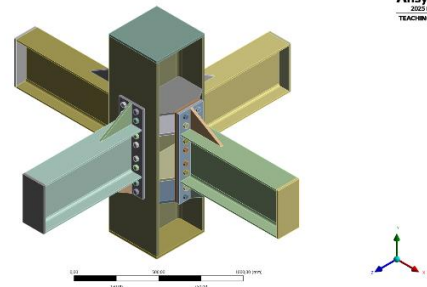
Tabel 1 Kode model untuk simulasi numerik

| No | Kodel Model | Sudut Pengaku | Lokasi Sambungan |
|----|-------------|---------------|------------------|
| 1  | R.8ES.30.MD | $30^\circ$    | Tengah-Tengah    |
| 2  | R.8ES.30.ED | $30^\circ$    | Sisi Tepi        |
| 3  | R.8ES.30.CR | $30^\circ$    | Pojok            |
| 4  | R.8ES.45.MD | $45^\circ$    | Tengah-Tengah    |
| 5  | R.8ES.45.ED | $45^\circ$    | Sisi Tepi        |
| 6  | R.8ES.45.CR | $45^\circ$    | Pojok            |

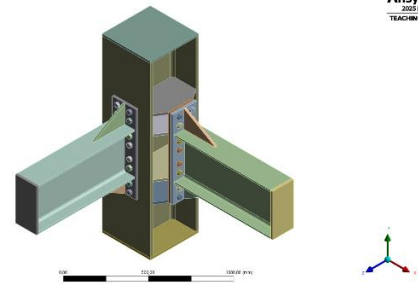
## Evaluasi Numerik Kekuatan Struktur ....



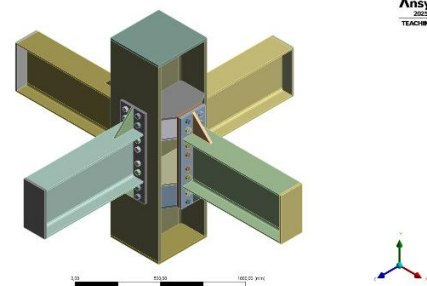
Gambar 3 Sambungan tipe R.8ES.30.MD



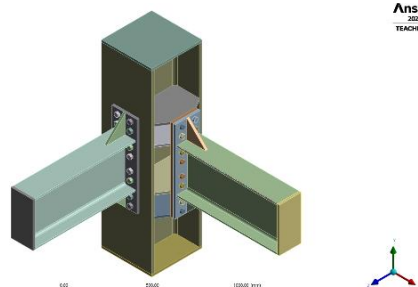
Gambar 4 Sambungan tipe R.8ES.30.ED



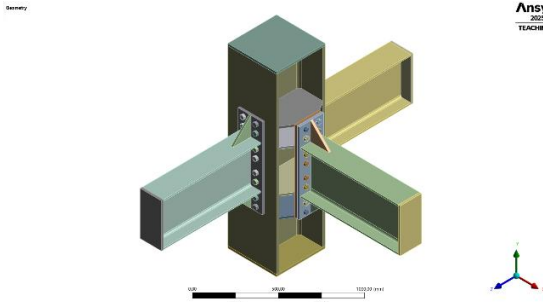
Gambar 5 Sambungan tipe R.8ES.30.CR



Gambar 6 Sambungan tipe R.8ES.45.MD



Gambar 7 Sambungan tipe R.8ES.45.ED



Gambar 8 Sambungan tipe R.8ES.45.CR

- Pembebanan:** Berdasarkan arahan ketentuan pembebanan untuk struktur baja yang tertuang dalam SNI 1729: 2020 (BSN, 2020b), pembebanan dan kombinasi pembebanan ditentukan berdasarkan SNI 1727:2020 (BSN, 2020a). Khusus untuk beban gempa dimodelkan menggunakan analisis respons spektrum sesuai SNI 1726:2019 (BSN, 2019).
- Analisis yang dilakukan:**

  - Analisis Statik Non-Linier:** Untuk menentukan kapasitas momen ultimit ( $M_u$ ), kurva momen-rotasi, dan mengidentifikasi pola keruntuhan.
  - Analisis Dinamik (Respons Spektrum):** Untuk mengevaluasi kinerja sambungan under beban gempa rencana dan menghitung rasio  $M_u/M_{n\_din}$ , di mana  $M_{n\_din}$  adalah momen akibat beban dinamik.
  - Evaluasi Daktilitas:** Indeks daktilitas ( $\mu$ ) dihitung sebagai rasio antara rotasi ultimit ( $\theta_u$ ) dan rotasi leleh ( $\theta_y$ ) dari kurva momen-rotasi. Rotasi leleh ditentukan menggunakan metode bujursangkar (*equal area method*).
- Parameter kinerja yang dievaluasi:**

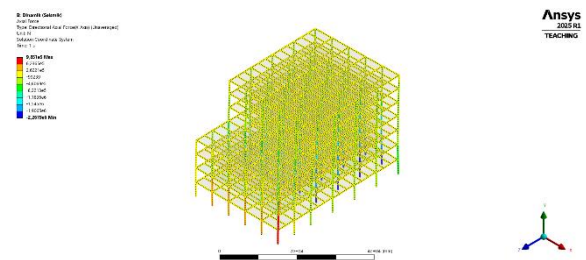
  - Kapasitas Momen Ultimit ( $M_u$ )
  - Distribusi dan besar Tegangan Maksimum (von Mises)
  - Indeks Daktilitas ( $\mu$ )
  - Rasio Kekuatan ( $M_u/M_{n\_din}$ )
  - Pola dan lokasi terjadinya leleh pertama serta mekanisme keruntuhan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

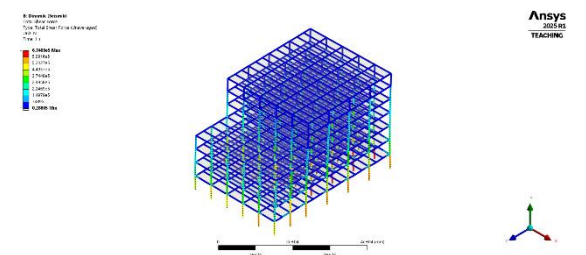
### Karakteristik Struktur Global dan Gaya Dalam Sasaran

Analisis modal struktur global menghasilkan periode fundamental 2.654 detik untuk arah-X dan 2.794 detik untuk arah-Y, yang sesuai untuk bangunan 8 lantai dengan sistem SRPMK. Gaya dalam yang diekstraksi

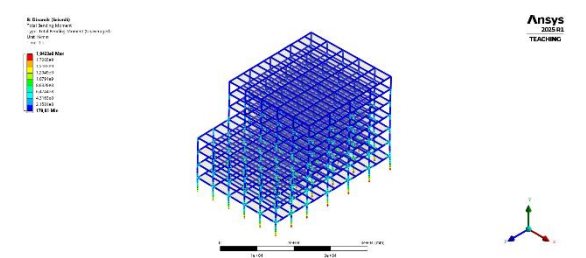
dari sambungan Lantai 8 menunjukkan variasi signifikan berdasarkan lokasi. Momen maksimum dari analisis statik berkisar antara 44.85 kN.m hingga 95.35 kN.m, sementara dari analisis dinamik (respons spektrum) berkisar antara 120.09 kN.m hingga 165.86 kN.m. Hal ini mengkonfirmasi amplifikasi beban gempa yang substantial, dengan faktor amplifikasi momen mencapai 2.68 kali pada lokasi tepi, yang harus diakomodasi oleh desain sambungan. Berikut ini ditampilkan beberapa diagram gaya-gaya dalam akibat pembebanan dinamis (Gambar 8 – Gambar 10).



Gambar 9 Diagram Gaya-Gaya Aksial



Gambar 10 Diagram Gaya-Gaya Geser



Gambar 11 Diagram Momen Lentur

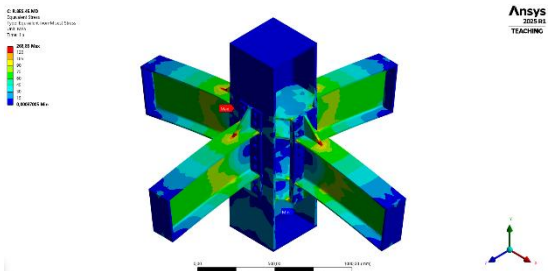
### Kinerja Sambungan akibat Beban Statik

#### a. Kapasitas dan distribusi tegangan

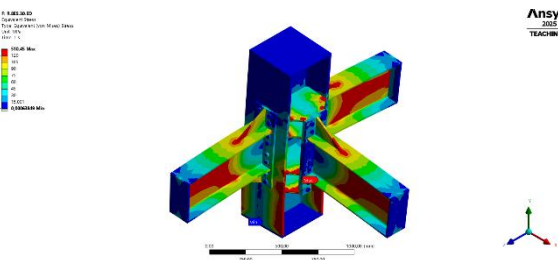
Semua enam model sambungan memenuhi kriteria kekuatan akibat beban statik, di mana tegangan kerja pada semua komponen (balok, end-plate, pengaku, baut) berada di bawah kapasitas izin material ( $\phi f_y$ ).

- Model R.8ES.30 (Pengaku dengan sudut 30°):** Model ini menunjukkan kapasitas momen ultimit ( $M_u$ ) yang lebih tinggi, yaitu

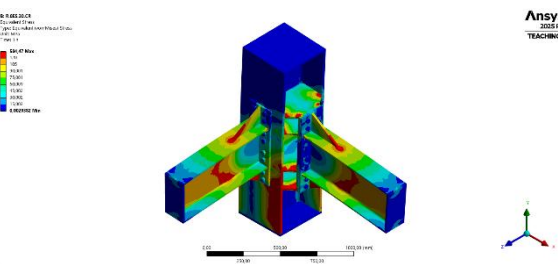
171 kN.m (tengah), 192 kN.m (tepi), dan 192 kN.m (sudut). Pola ini menunjukkan bahwa sambungan dengan pengaku 30° lebih efektif dalam memobilisasi kapasitas material, terutama pada lokasi dengan restraint yang lebih kompleks (tepi dan sudut). Namun, keunggulan kapasitas ini diiringi dengan tingkat utilisasi material yang lebih tinggi. Tegangan maksimumnya mencapai 367.34 MPa pada model R.8ES.30.ED, yang telah sangat mendekati kuat leleh material end-plate ( $\sigma_{fy} = 369$  MPa). Konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada daerah tarik di sekitar baris baut terluar dan pada pertemuan antara pengaku dengan end-plate, sebagaimana diantisipasi dalam teori. Visualisasi grafis variasi tegangan pada model R.8ES.30 untuk ketiga lokasi sambungan dapat dilihat dalam Gambar 12 – 14.



Gambar 12 Tegangan pada Sambungan Model R.8ES.30.MD



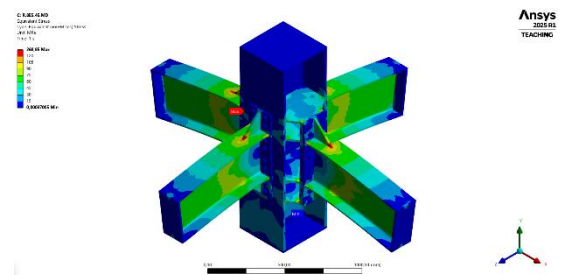
Gambar 13 Tegangan pada Sambungan Model R.8ES.30.ED



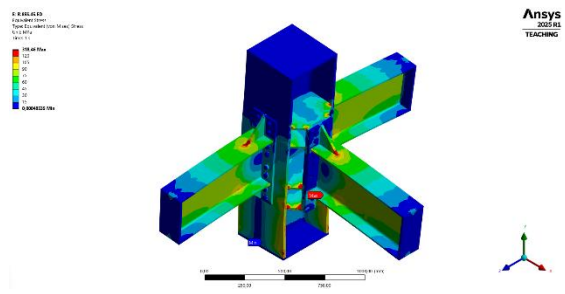
Gambar 14 Tegangan pada Sambungan Model R.8ES.30.CR

- **Model R.8ES.45 (Pengaku dengan sudut 45°):** Model ini memiliki kapasitas momen ultimit ( $M_u$ ) yang lebih rendah namun lebih

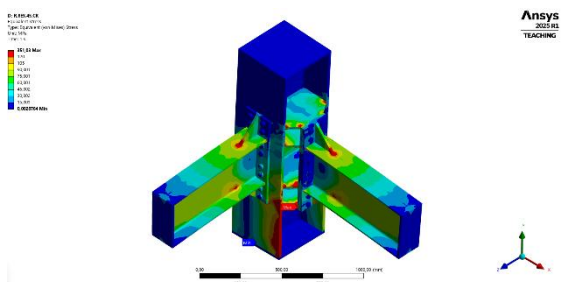
*Evaluasi Numerik Kekuatan Struktur ....* konsisten: 119 kN.m (tengah), 126 kN.m (tepi), dan 137 kN.m (sudut). Penurunan kapasitas sekitar 30-40% dibandingkan model 30° ini diduga karena perubahan sudut pengaku mengubah mekanisme transfer beban dan lengan momen internal dalam sambungan. Keunggulan utama model 45° terletak pada profil tegangan yang lebih aman. Tegangan maksimumnya lebih rendah, yaitu 270.40 MPa (tengah), 323.81 MPa (tepi), dan 351.28 MPa (sudut). Hal ini menunjukkan distribusi beban yang lebih merata dan mengurangi risiko konsentrasi tegangan berlebihan. Adapun, visualisasi grafis variasi tegangan pada model R.8ES.45 untuk lokasi sambungan di tengah-tengah (MD), Sisi Tepi (ED) dan pojok (CR) bangunan dapat dilihat dalam Gambar 15 – 17.



Gambar 15 Tegangan pada Sambungan Model R.8ES.45.MD



Gambar 16 Tegangan pada Sambungan Model R.8ES.45.ED



Gambar 17 Tegangan pada Sambungan Model R.8ES.45.CR

- Pola leleh dan mekanisme keruntuhan*  
Simulasi non-linier terhadap beban statik mengungkap mekanisme keruntuhan yang

diinginkan untuk kedua tipe sambungan. Leleh pertama umumnya terjadi pada daerah tarik balok di dekat sambungan (pada "radius block" dari end-plate), yang konsisten dengan prinsip "Strong Column Weak Beam" yang dianjurkan untuk SRPMK. Hal ini diikuti oleh leleh pada end-plate di sekitar baut tarik dan pada badan pengaku. Tidak terjadi tekuk lokal prematur pada end-plate atau pengaku, yang membuktikan bahwa desain sesuai SNI 7972:2020 telah memadai. Semua model R.8ES.30 cenderung menunjukkan deformasi yang lebih besar pada end-plate sebelum keruntuhan, sementara rata-rata model R.8ES.45 menunjukkan deformasi yang lebih terkonsentrasi pada daerah leher balok.

### Kinerja Sambungan Akibat Beban Dinamik (Seismik)

#### a. Kecukupan Kekuatan

Evaluasi kinerja akibat beban dinamik merupakan inti dari penelitian ini. Parameter rasio  $M_u/M_{n\_din}$  digunakan, di mana nilai di atas 1.0 menunjukkan sambungan memiliki kapasitas cadangan untuk menahan beban gempa maksimum.

- Model R.8ES.30: Model ini menunjukkan kinerja yang sangat unggul. Rasio  $M_u/M_{n\_din}$  untuk semua lokasi adalah 1.06 (tengah), 1.51 (tepi), dan 1.16 (sudut). Nilai-nilai di atas 1.0 ini membuktikan bahwa sambungan R.8ES.30 tidak hanya mampu menahan beban gempa rencana tetapi juga memiliki kelebihan kapasitas (*overstrength*) yang signifikan, terutama pada lokasi tepi. *Overstrength* ini adalah karakteristik yang diinginkan dalam desain seismik untuk mengakomodasi ketidakpastian dan beban di atas yang direncanakan.
- Model R.8ES.45: Sebaliknya, model ini menunjukkan kekurangan kapasitas under beban dinamik. Rasio  $M_u/M_{n\_din}$  untuk semua lokasi berada di bawah 1.0, yaitu 0.74 (tengah), 0.99 (tepi yang hampir tepat 1.0), dan 0.83 (sudut). Hal ini menunjukkan bahwa sambungan dengan pengaku 45° mungkin akan mengalami kegagalan atau deformasi inelastis yang sangat besar under beban gempa tingkat desain, sehingga tidak memenuhi kriteria kekuatan *immediate occupancy* atau *life safety*.

#### b. Amplifikasi tegangan

Di bawah pembebanan dinamik, tegangan pada komponen kritis meningkat

secara signifikan. Pada model R.8ES.30.ED, tegangan maksimum pada end-plate tetap berada pada 367.34 MPa, yang masih persis di bawah kuat leleh desain (369 MPa). Ini menunjukkan bahwa sambungan ini beroperasi pada batas tertinggi kapasitasnya under beban gempa namun masih dalam fase elastis. Pada model R.8ES.45, meskipun tegangan maksimumnya lebih rendah secara absolut, rasio kapasitas yang kurang dari 1.0 berarti sambungan telah memasuki fase inelastis, di mana tegangan mungkin telah melampaui titik leleh di beberapa lokal area meskipun tidak tercatat sebagai "maksimum" dalam kontur tegangan.

### Evaluasi Daktilitas dan Kemampuan Disipasi Energi

Daktilitas adalah parameter kunci untuk kinerja seismik, yang mengindikasikan kemampuan sambungan untuk berdeformasi secara plastis tanpa kehilangan kekuatan secara drastis.

- Model R.8ES.30: Menunjukkan variasi daktilitas yang lebar ( $\mu = 2$  hingga 4). Lokasi tepi (ED) memiliki daktilitas terendah ( $\mu=2$ ), yang konsisten dengan tingginya tegangan dan utilisasi material di lokasi tersebut. Nilai  $\mu=2$  masih memadai tetapi mendekati batas bawah untuk sambungan seismik, yang mengindikasikan perilaku yang lebih "getas" dibandingkan lokasi lain. Lokasi sudut (CR) justru menunjukkan daktilitas sangat tinggi ( $\mu=4$ ), yang menjadikannya sangat efektif dalam menyerap energi gempa.
- Model R.8ES.45: Menunjukkan daktilitas yang lebih baik dan konsisten di semua lokasi ( $\mu = 3$  hingga 4). Nilai  $\mu=3-4$  ini ideal untuk sambungan SRPMK, yang menandakan kemampuan rotasi plastis yang memadai untuk disipasi energi gempa yang besar. Kekonsistenan ini menunjukkan bahwa konfigurasi pengaku 45° mungkin memberikan restraint yang lebih seragam, mengurangi variasi respons akibat perbedaan lokasi.

### Analisis Komparatif dan Rekomendasi Desain

Simulasi numerik yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pelat pengaku (*stiffener plate*) meningkatkan kekuatan dan daktilitas BEEP. Hal ini sejalan dengan temuan Haghollahi dan Jannesar (2018) terkait

penggunaan pengaku berbentuk *rib-plate* vertikal pada BEEP.

Namun demikian, perbandingan menyeluruh menghasilkan *trade-off* yang jelas antara kedua model:

- R.8ES.30 (Pengaku 30°): Kelebihan: Kapasitas momen sangat tinggi, kelebihan kapasitas under beban gempa ( $M_u/M_{n\_din} > 1.0$ ), efisiensi material yang baik. Kekurangan: Daktilitas tidak konsisten dan cenderung rendah di lokasi kritis (tepi), tegangan kerja sangat tinggi yang memerlukan kontrol kualitas material dan fabrikasi yang ketat.
- R.8ES.45 (Pengaku 45°): Kelebihan: Daktilitas tinggi dan konsisten, profil tegangan yang lebih aman dan merata. Kekurangan: Kapasitas momen lebih rendah, tidak memenuhi kriteria kekuatan under beban gempa ( $M_u/M_{n\_din} < 1.0$ ) untuk konfigurasi ini.

Berdasarkan analisis ini, Model R.8ES.30 direkomendasikan sebagai pilihan yang lebih unggul untuk aplikasi SRPMK di daerah seismik. Alasan utamanya adalah kepastiannya dalam memenuhi kriteria kekuatan under beban gempa, yang merupakan persyaratan fundamental. Kekurangan dalam konsistensi daktilitas dapat dimitigasi melalui optimasi desain lebih lanjut, seperti sedikit meningkatkan ketebalan end-plate atau menggunakan material dengan ketangguhan lebih tinggi pada daerah tarik. Sementara model R.8ES.45, meskipun sangat daktil, tidak dapat direkomendasikan dalam konfigurasi saat ini karena risiko ketidakcukupan kekuatan under beban gempa. Ia mungkin cocok untuk daerah dengan risiko seismik lebih rendah atau jika dimensi balok/kolom dapat ditingkatkan untuk menaikkan kapasitas  $M_{n\_din}$ -nya.

#### KESIMPULAN DAN SARAN

1. Sambungan R.8ES.30 memiliki kapasitas momen ultimit lebih tinggi (171–192 kN.m) dibanding R.8ES.45 (119–137 kN.m).
2. Pada pembebanan dinamik, R.8ES.30 memenuhi kriteria kekuatan ( $M_u/M_{n\_din} > 1.0$ ) di semua lokasi, sedangkan R.8ES.45 tidak.
3. R.8ES.45 memiliki daktilitas lebih konsisten ( $\mu = 3-4$ ), sementara R.8ES.30 berisiko getas di lokasi tepi ( $\mu=2$ ).
4. Sambungan BEEP 8ES dengan kemiringan 30° tepat untuk aplikasi SRPMK di daerah seismik dengan optimasi detail untuk meningkatkan daktilitas.

#### Evaluasi Numerik Kekuatan Struktur ....

5. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut BEEP 8ES dengan variasi ketebalan pelat dan konfigurasi baut.
6. Verifikasi hasil melalui uji eksperimental untuk memvalidasi model numerik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, H. (2022). *Analisis Perbandingan Sambungan Baja Terpraktualifikasi SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus) Tipe 4E dengan 4ES Berdasarkan SNI 7972-2020 dan SNI 7972-2013*. Skripsi Sarjana Teknik Sipil. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- ANSYS Inc. (2020). ANSYS Mechanical APDL Documentation Release 2020 R1. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc. Diakses dari <https://www.ansys.com>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019 - Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020a). SNI 1726:2020 - Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020b). SNI 1729:2020 - Spesifikasi untuk bangunan gedung baja structural (ANSI/AISC 360-16, IDT). Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020c). SNI 7972:2020 – Sambungan Terpraktualifikasi untuk Rangka Momen Khusus. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Bahaz, A., Amara, S., Jaspert, J.P. & Demonceau, J.F. (2018). Analysis of the Behaviour of Semi Rigid Steel End Plate Connections. *MATEC Web of Conferences*, **149**. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902058>
- Ding, Z. & Elkady, A. (2023). Semirigid Bolted Endplate Moment Connections: Review and Experimental-Based Assessment of Available Predictive Models. *Journal of Structural Engineering*, **149(9)**, <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-11797>
- Haghollahi, A. and 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.  
<http://dx.doi.org/10.28991/cej-030979>
- Hariadi, D.A., Suswanto, B., Tajunnisa, Y. & Kristijanto, H. (2025). Analisis Numerik Sambungan Bolted Extended End Plate (BEEP) Menggunakan Program Bantu ANSYS. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 23(3), 237 – 242.
- Hayati, Y. (2016). Studi Kekuatan dan Perilaku Sambungan End-Plate Balok–Kolom Baja dengan Metode Elemen Hingga. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Jabłońska-krysiewicz, A. (2015). Finite Element Modelling of the Behaviour of Steel End-Plate Connections, *Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture*, 62(3/II/15), 173–184.  
<https://doi.org/10.7862/rb.2015.148>
- Pourzeynali, S. & Shakeri, A. (2015). A Comparative Study on the Ductility and Energy Dissipation Capacity of SMRF and V-EBF Systems, *Scientia Iranica*, 22(4), 1470–1480.
- Prabowo, A., Nam, J. H., & Wijaya, U. (2024). Evaluasi Kinerja Sistem Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus Pada Gedung Baja dengan Variasi Pemodelan Sendi Plastis. *Jurnal Teknik Sipil*, 32(2), 199-208.  
<https://doi.org/10.5614/jts.2025.32.2.8>
- Savaliya, Gh. M. (2024). Analysis and Design of Steel Frames with Semi-Rigid Steel Connections as per IS 800:2007. *Kronika Journal*, 24(8), 191–204.
- Silalahi, O.U.A., Suswanto, B. dan Piscesa, B. (2020). Studi Analisis Perilaku Sambungan Kaku (Rigid Connection) Balok – Kolom Baja Tipe Extended End Plate dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 18(1), 23 – 32.
- Yoganata, Y.S. (2020). Studi Analisis Perilaku Sambungan Extended End-Plate akibat Beban Siklik Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Tesis Magister Teknik Sipil*, Surabaya: Institut Teknologi Surabaya.
- Yoganata, Y.S., Suswanto, B., Iranata, D. dan Irawan, D. (2020). Analysis Study of Extended End Plate Connection due to Cyclic Load using Finite Element Method. *Proceeding of the 4<sup>th</sup> International*
- Conference on Civil Engineering Research (ICEER 2020)*, 1 – 10.