

Analisis Numerik Sambungan *Bolted Extended End Plate* (BEEP) Menggunakan Program Bantu ANSYS

Dinda Almirah Hariadi^{1*}, Budi Suswanto¹, Yuyun Tajunnisa², Heppy Kristijanto¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹, Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya²

Koresponden*, Email: dindaalmirah68@gmail.com

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	18 Juni 2024	<p><i>The 1994 Northridge earthquake caused significant damage to steel structure buildings, particularly at connections, with cracks frequently appearing in welded areas and, in severe cases, propagating to flanges and column webs. This study evaluates the behavior of Bolted Extended End-Plate (BEEP) connections under cyclic loading, comparing them to the experimental results of Shi et al. using ANSYS software. The evaluation focuses on moment capacity, rotational capacity, and failure modes. The result from Shi et al. showed moment and rotation capacities of 320.10 kN-m and 3.5%, respectively. Numerical results showed the moment and rotation capacity of 327.86 kN-m and 4.3%, with a margin of error of 2.37%. The failure modes in the numerical model are almost similar to the experimental results. Therefore, the assumption is that the parameters used are close to the values applied in the experimental testing. As a result, the numerical model has been validated by the experimental result.</i></p>
Diperbaiki	26 Juli 2024	
Disetujui	07 Agustus 2025	

Keywords: *bolted extended end-plate, steel connection, numerical analysis, ANSYS*

Abstrak

Gempa bumi Northridge tahun 1994 menyebabkan kerusakan signifikan pada bangunan struktur baja, khususnya pada sambungan, dengan retakan yang sering muncul pada area las, dalam kasus yang parah, menjalar ke sayap dan badan kolom. Studi ini mengevaluasi perilaku sambungan *Bolted Extended End-Plate* (BEEP) di bawah pembebanan siklik, dibandingkan dengan hasil eksperimen Shi dkk. dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS. Evaluasi berfokus pada kapasitas momen, kapasitas rotasi, dan mode kegagalan. Hasil dari Shi dkk. menunjukkan kapasitas momen dan rotasi masing-masing sebesar 320,10 kN-m dan 3,5%. Hasil numerik menunjukkan kapasitas momen dan rotasi sebesar 327,86 kN-m dan 4,3%, dengan tingkat akurasi sebesar 2,37%. Pola kegagalan dalam model numerik hampir sama dengan hasil eksperimen. Maka, asumsi parameter yang digunakan mendekati dengan nilai yang digunakan pada pengujian eksperimental. Oleh karena itu, model numerik telah tervalidasi dari hasil eksperimen.

Kata kunci: *bolted extended end-plate, sambungan baja, analisis numerik, ANSYS*

1. Pendahuluan

Gempa bumi Northridge tahun 1994 menyebabkan kerusakan pada bangunan baja rangka pemikul momen yang menunjukkan konsep *strong column weak beam* tidak bekerja seperti yang diharapkan. Sendi plastis tidak terbentuk sebagaimana mestinya dikarenakan terjadinya kerusakan lebih dulu pada sambungan *rigid* balok-kolom. Hal ini ditunjukkan dari pengamatan Sutjipto dkk. [1], sekitar 2000 rangka momen dengan 8600 pengamatan visual dan 7800 uji ultrasonik terhadap sambungan balok kolom. Umumnya, kerusakan berupa sambungan las yang mengalami keretakan, sejumlah 50% terjadi pada sambungan sayap bawah balok ke sayap kolom dan 18% terjadi pada sambungan sayap atas balok ke sayap kolom. Selain itu, banyak dijumpai pelat geser yang menghubungkan badan balok ke sayap kolom mengalami sobekan vertikal, dan terjadinya sobekan pada sayap dan badan kolom merupakan kerusakan yang paling ekstrem yang diakibatkan oleh gempa Northridge 1994 [1].

Banyak penelitian telah dilakukan untuk meninjau desain dan perilaku rangka momen penahan gempa, penelitian ini dimulai sejak terjadinya kegagalan tak terduga oleh banyak sambungan saat gempa Northridge 1994. Sambungan *extended end-plate* merupakan salah satu alternatif sambungan yang diteliti untuk digunakan pada rangka momen baja penahan gempa, penelitian yang dilakukan berupa pengujian secara eksperimental dan numerik [2].

Sumner & Murray [3] melakukan penelitian pada jenis sambungan *bolted extended end-plate* yang dikenai beban siklik, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan jenis sambungan *bolted extended end-plate* yang sesuai dan dapat dijadikan sebagai salah satu alternatif sambungan tahan gempa.

Sumner & Murray [3] melakukan pengujian skala penuh di bawah beban gempa terhadap sambungan *extended end-plate tipe 4E* dan *tipe 8ES* dengan variasi ketebalan *end-plate*, jumlah baut dan penggunaan *stiffener*. Hasil pengujian

menunjukkan sambungan dengan pelat yang relatif tebal mampu memberikan kekakuan, kekuatan, dan daktilitas yang sesuai jika diterapkan dalam sistem struktur baja tahan gempa. Sambungan tipe *4E* mampu menahan momen desain paling kecil $1,05M_p$ dan tipe *8ES* mampu menahan momen desain paling kecil $1,04 M_p$ yaitu dengan menggunakan variasi pelat yang relatif tebal, serta menghasilkan kapasitas rotasi bervariasi dari 0,05 – 0,06 rad sesuai pada **Tabel 1**. Pelat yang relatif tebal juga memberikan keuntungan yaitu dapat mencegah efek *prying force*, ketika terjadi rotasi inelastik besar, pelat masih berperilaku sebagai elemen yang elastis. Sehingga pelat tidak akan mengalami unkit akibat adanya efek *prying force*.

Tabel 1. Hasil uji sambungan *extended end-plate* [3]

<i>Specimen identification</i>	M_{max}/M_{design}	θ_{max} <i>sustained</i>	θ_p <i>sustained</i>
4E-1.25-1.5-24 (<i>Strong plate</i>)	1.05	0.052	0.038
4E-1.25-1.375-24 (<i>Strong plate</i>)			
<i>North beam</i>	1.34	0.005	0.025
<i>South beam</i>	1.33	0.060	0.035
8E-1.25-1.75-30 (<i>Strong plate</i>)	1.04	0.050	0.036
8E-1.25-1.75-30 (<i>Strong plate</i>)	1.11	0.050	0.028

Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan sambungan tipe *bolted extended end-plate* dinilai efektif saat diaplikasikan pada sistem rangka momen tahan gempa, dengan rasio momen pada sambungan harus didesain lebih kuat dari sambungan pada balok untuk memastikan sayap dan badan balok mengalami tekuk lokal.

Selain pengujian secara eksperimental yang dapat dilakukan pada sambungan, pengujian secara numerik dengan metode elemen hingga yang berbasis komputer juga menjadi alternatif yang sudah banyak digunakan untuk meninjau perilaku sambungan. Selain tidak memakan waktu yang lama, juga lebih ekonomis, menghemat waktu dan memudahkan dalam membuat variasi tipe sambungan untuk dianalisis perilakunya pada keadaan batas. Penggunaan dengan metode elemen hingga dapat memperluas interpretasi untuk membandingkan hasil dan observasi penelitian eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya [4].

Analisis numerik pada sambungan *extended end-plate* yang dilakukan oleh Ozkiligil [5] menunjukkan bahwa *end-plate* dengan ketebalan relatif besar menghasilkan daktilitas dan kapasitas yang signifikan selama baut memiliki kapasitas yang cukup, dan hasil analisis juga membuktikan bahwa meningkatkan diameter baut dan ketebalan las juga meningkatkan kapasitas momen plastis pada sambungan.

Eladly & Schafer [6] juga melakukan analisis numerik pada tipe sambungan *extended end-plate* yang hasilnya menunjukkan bahwa *end-plate* dengan *stiffener* mampu mengurangi tegangan pada kolom sehingga meningkatkan kapasitas momen dan energi disipasi masing-masing 24% dan 19%. Penelitian pada 180 konfigurasi *end-plate* menunjukkan angka daktilitas yang bervariasi dari 3,04 hingga 6,9.

Ghifari dkk. [7] melakukan perbandingan pengujian eksperimental dan analisis numerik tipe sambungan *bolted flange plate* (BFP), hasil kapasitas momen pengujian eksperimental dan numerik masing-masing sebesar 257,40 kN-m dan 247,36 kN-m, selisih kapasitas dari eksperimental dan numerik sebesar 4,05%, yang artinya selisih kedua pengujian tersebut masih berada di bawah *margin of error* yaitu sebesar 5%, maka pengujian secara numerik telah tervalidasi oleh pengujian eksperimental.

Studi dari Shi dkk. [8] melakukan pengujian skala penuh di bawah beban gempa menggunakan delapan spesimen yaitu sambungan balok-kolom tipe *flush* dan *extended end-plate* dengan variasi ketebalan *end-plate*, diameter baut, jumlah baut dan penggunaan *stiffener*. Hasil pengujian menunjukkan sambungan tipe *extended end-plate* yang diperpanjang pada kedua sisi memberikan kekuatan, kekakuan rotasi, daktilitas, dan kapasitas disipasi energi yang sesuai jika diterapkan pada sistem struktur baja tahan gempa, sedangkan pada sambungan tipe *flush end-plate* kekakuannya menurun secara signifikan ditinjau dari *loop* kurva histeresis yang menunjukkan bahwa kapasitas disipasi energi tidak memadai dan tidak direkomendasikan untuk digunakan sebagai sambungan momen pada sistem struktur baja tahan gempa.

2. Metode

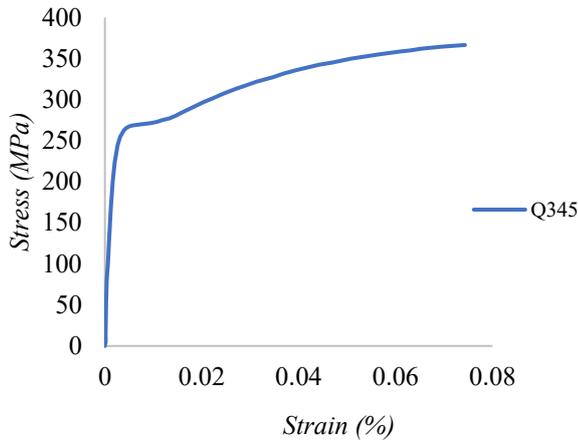
Analisis numerik ini bertujuan untuk membandingkan dengan hasil pengujian spesimen *bolted extended end-plate* yang telah dilakukan oleh Shi dkk. [8] secara eksperimental.

a. Melakukan pendefinisian *material properties* dan konfigurasi sambungan model JD-02.

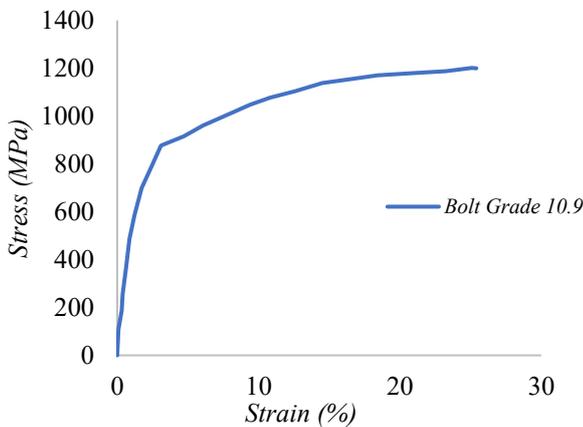
Material properties disesuaikan dengan pengujian eksperimental oleh Shi dkk. [8] menggunakan mutu Q345 untuk balok, kolom, pelat, dan *high strength bolts grade* 10,9. Kurva *stress-strain* untuk profil dan baut dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**, sedangkan untuk modulus elastisitas baja menggunakan 200 GPa, setiap *material properties* dijabarkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. *Material properties* JD-02

Material	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Profil balok, kolom dan pelat	351,33	497,43 [9]
Baut	1051	1169 [10]



Gambar 1. Kurva tegangan-regangan baja mutu Q345 [9]



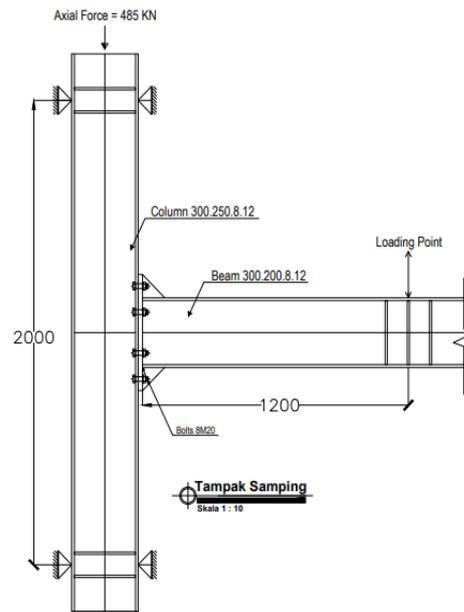
Gambar 2. Kurva tegangan-regangan baut mutu tinggi grade 10.9 [10]

Model yang digunakan mengacu pada spesimen penelitian Shi dkk. [8] dengan konfigurasi dan spesifikasi sambungan dapat dilihat pada Gambar 3.

Boundary condition pada pemodelan ini berupa perletakan rol pada ujung atas dan pada ujung bawah kolom menggunakan perletakan sendi. Input beban aksial pada kolom sebesar 485 kN dan displacement pada ujung balok berupa beban siklik berdasarkan FEMA [11] dengan ketentuan pembebanan siklik dapat dilihat pada Tabel 3.

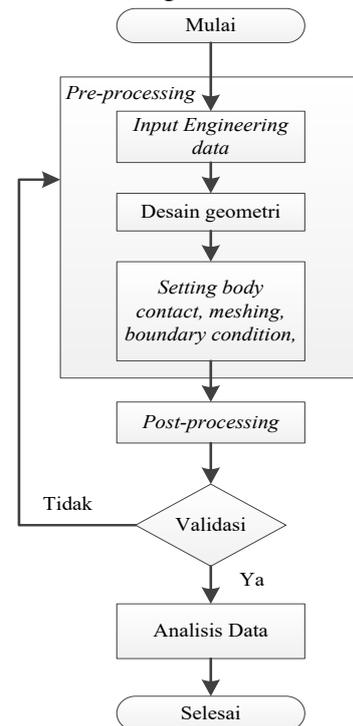
Tabel 3. Ketentuan cycle test oleh FEMA 2002 [11]

Load Step	Peak deformation, q	Number of Cycles, n
1	0.00375	6
2	0.005	6
3	0.0075	6
4	0.01	4
5	0.015	2
6	0.02	2
7	0.03	2



Gambar 3. Model JD-02 [8]

a. Pemodelan JD-02 dengan ANSYS



Gambar 4. Flowchart modelling dengan ANSYS

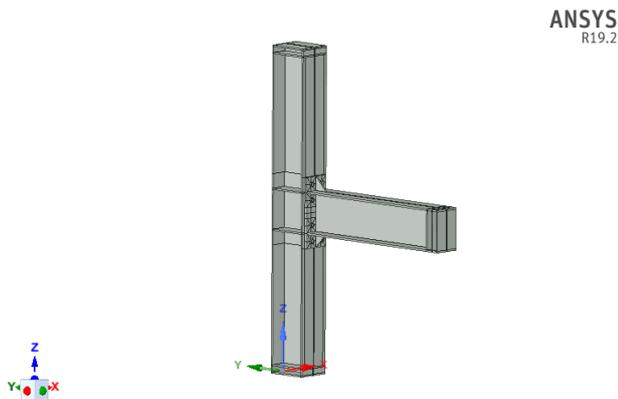
ANSYS merupakan perangkat lunak engineering yang didalamnya terdapat berbagai jenis solusi untuk mensimulasikan model yang akan dianalisis. Main toolbox yang digunakan pada analisis ini adalah static structural [12]. Adapun langkah pemodelan pada ANSYS ditunjukkan pada Gambar 4.

A	B	C
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	2E+05	MPa
Poisson's Ratio	0.3	
Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
Multilinear Kinematic Hardening	Tabular	
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	351.33	MPa
Compressive Yield Strength	351.33	MPa
Tensile Ultimate Strength	497.43	MPa
Compressive Ultimate Strength	497.43	MPa

Gambar 5. Engineering data pada ANSYS

Langkah awal pemodelan sambungan pada ANSYS adalah mendefinisikan *material properties* berupa modulus elastisitas, *poisson's ratio*, tegangan leleh, tegangan *ultimate* dan *multilinear kinematic hardening*. *Multilinear kinematic hardening* didapatkan dari grafik tegangan-regangan saat awal terjadi *strain hardening*. *Material properties* dimasukkan pada bagian *engineering data* seperti pada Gambar 5.

Selanjutnya memodelkan elemen balok, kolom, sambungan dan *stiffener* pada bagian *geometry* seperti pada Gambar 6.

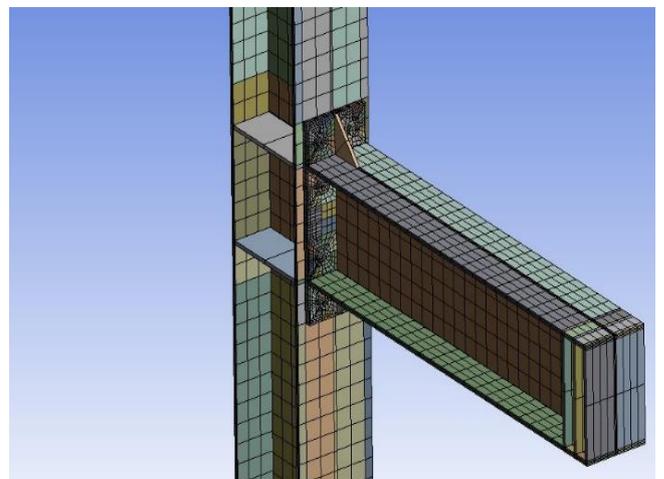


Gambar 6. Geometri sambungan pada ANSYS

Kemudian mendefinisikan *body contact*, ditujukan untuk mendefinisikan perilaku antar elemen struktur. Terdapat dua jenis *body contact* yang digunakan pada analisis ini yaitu *bonded* dan *frictional*. *Bonded* merupakan hubungan antar elemen yang tersambung secara utuh tanpa adanya slip seperti contoh yaitu hubungan antara *stiffener* dengan sayap balok. Sedangkan *frictional* merupakan hubungan antar elemen yang tersambung saling kontak dengan friksi yaitu hubungan

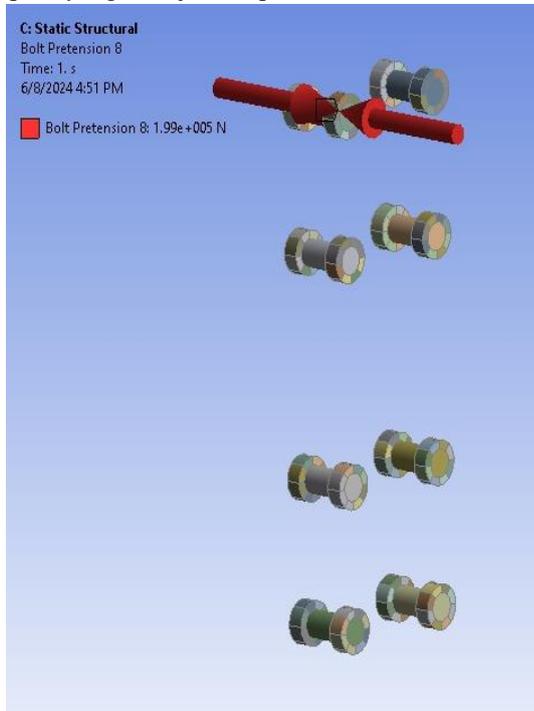
antara baut dengan *end plate* dengan menggunakan koefisien friksi sebesar 0,3.

Jika *body contact* sudah terdefiniskan kemudian dilanjutkan dengan membuat *meshing* pada masing-masing elemen, model *meshing* yang digunakan pada analisis ini yaitu *multizone*, *body sizing* dan *edge sizing*. *Multizone* di aplikasikan pada seluruh elemen, fitur *meshing multizone* ini berfungsi membentuk *meshing* menjadi persegi atau *hexahedral* [12]. *Body sizing* berfungsi membentuk *meshing* sesuai dengan ukuran yang direncanakan, daerah sambungan dan *end plate* masing-masing menggunakan *meshing* dengan ukuran 20 dan 10 mm, di luar daerah tersebut menggunakan *meshing* dengan ukuran 50 mm. *Edge Sizing* berfungsi membentuk potongan *meshing* menjadi beberapa bagian: sayap, badan balok, dan kolom dibagi menjadi tiga bagian. Hasil *meshing* ditunjukkan pada Gambar 7.



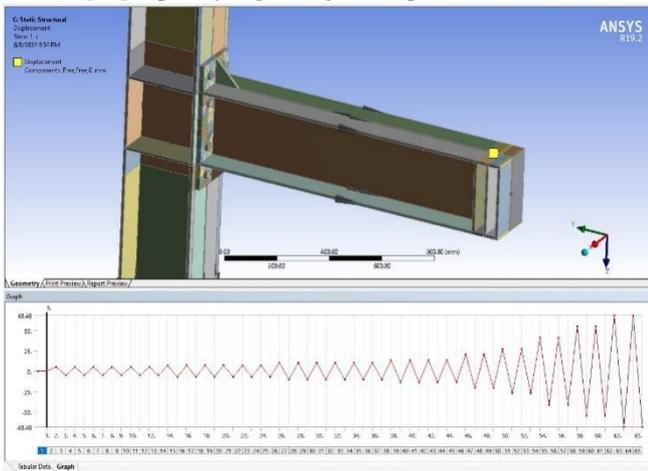
Gambar 7. Hasil *meshing* pada model

Gaya *pretension* diaplikasikan pada baut untuk mendefinisikan tahanan friksi baut, gaya *pretension* yang diberikan disesuaikan dengan penelitian Shi dkk. [8] yaitu sebesar 199 kN seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Gaya *Pretension* baut pada ANSYS

Mengacu pada penelitian Shi dkk. [8] pembebanan yang digunakan adalah beban aksial yang diberikan pada ujung atas kolom sebesar 485 kN dan beban siklik (P, Δ) yang diberikan pada ujung balok, pengaplikasian beban siklik sesuai FEMA [11] seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 9**.

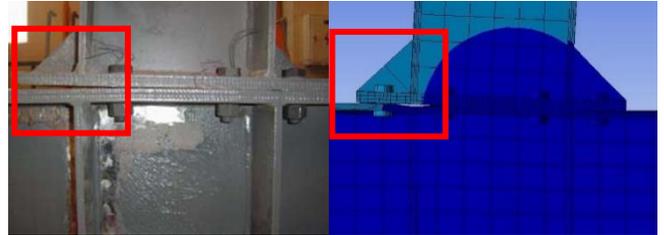


Gambar 9. Input beban siklik pada model

3. Hasil dan Pembahasan

Verifikasi hasil analisis numerik dengan hasil pengujian eksperimental untuk memvalidasi keakuratan parameter-parameter pemodelan yang telah dimasukkan ke dalam program

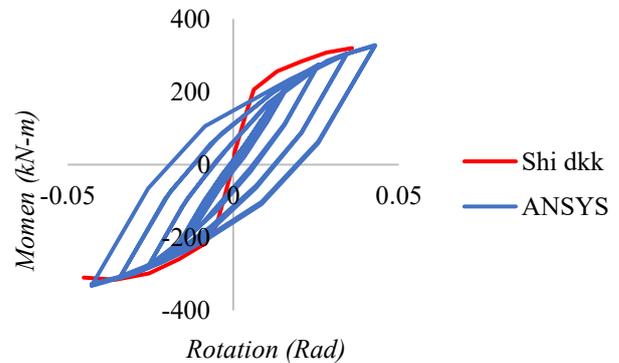
bantu ANSYS. Verifikasi hasil berupa perbandingan pola kegagalan, kapasitas momen, dan kapasitas rotasi antara hasil pemodelan numerik dengan pengujian eksperimental dari Shi dkk. [8].



Gambar 10. Pola kegagalan pengujian eksperimental dengan numerik

Pola kegagalan pada model eksperimental dan numerik ditinjau, pada eksperimental Shi dkk. [8] yang ditunjukkan pada **Gambar 10** dua baut pada bagian *extended end-plate* mengalami kegagalan, diameter baut yang digunakan relatif kecil maka kapasitas baut rendah dan baut tidak mampu menahan beban yang terjadi mengakibatkan baut terlepas dan muncul *gap* antara *extended end-plate* dengan sayap kolom, begitu pula dengan pemodelan numerik dengan kegagalan yang hampir sama yaitu adanya *gap* antara *extended end-plate* dengan sayap kolom yang mengakibatkan mulai terjadinya pelelehan pada bagian *extended end-plate* dengan ditandai warna biru muda.

Gambar 11 menunjukkan kurva histerisis hasil pengujian eksperimental dan numerik dengan ANSYS.



Gambar 11. Kurva histerisis model JD-02

Hasil eksperimental Shi dkk. [8] menunjukkan bahwa kapasitas momen sambungan dan rotasi masing-masing sebesar 320,10 kN-m dan 3,5%. Sedangkan pada pemodelan numerik didapatkan kapasitas momen sambungan dan rotasi masing-masing sebesar 327,86 kN-m dan 4,3%. Hasil kapasitas momen dan rotasi analisis numerik mendekati pengujian eksperimental. Hasil pengujian eksperimental memiliki selisih dengan analisis numerik, hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan asumsi nilai parameter yang digunakan.

4. Simpulan

Analisis numerik dilakukan untuk memverifikasi pengujian eksperimental yang telah dilakukan. Verifikasi berupa perbandingan kurva histerisis, kapasitas momen, kapasitas rotasi, dan pola kegagalan. Kapasitas momen dan rotasi yang dihasilkan oleh model numerik masing-masing sebesar 327,86 kN-m dan 4,3%, sedangkan pada pengujian eksperimental didapatkan kapasitas momen dan rotasi masing-masing 320,10 kN-m dan 3,5%, selisih antara numerik dan eksperimental sebesar 2,37% masih berada di bawah *margin of error* yaitu sebesar 5% dan pola kegagalan dalam model numerik hampir sama dengan hasil eksperimen. Maka, asumsi parameter yang digunakan pada analisis numerik mendekati dengan nilai yang digunakan pada pengujian eksperimental. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa model numerik telah tervalidasi dari hasil eksperimen.

Daftar Pustaka

- [1] S. Sutjipto and I. Sumeru, "Sambungan Terpraktualifikasi Simpson Strong-Tie Strong Frame Dalam RSNI 7972:20xx," in *Konferensi Nasional Teknik Sipil*, Bandung, 2020.
- [2] E. A. Sumner, *Unified Design of Extended End-Plate Moment*, Blacksburg, 2003.
- [3] E. A. Sumner and T. M. Murray, "Behavior of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading," *Journal of Structural Engineering*, pp. 501-508, 2002.
- [4] R. Ismail, A. Fahmy, A. Khalifa and Y. Mohamed, "Numerical Study on Ultimate Behaviour of Bolted End-Plate Steel Connections," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, pp. 1-22, 2016.
- [5] Y. O. Ozkiloglu, "Cyclic and Monotonic Performance of Unstiffened Extended End-Plate Connections Having Thin End-Plates and Large Bolts," *Engineering Structures*, vol. 281, 2023.
- [6] M. M. Eladly and B. W. Schafer, "Numerical and Analytical Study of Stainless Steel Beam-to-Column Extended End Plate Connections," *Engineering Structures*, vol. 240, 2021.
- [7] F. Ghifari, B. Suswanto and Y. Tajunnisa, "Analisis Numerik Sambungan Rigid Balok-Kolom Bolted Flange Plate (BFP) Menggunakan Program Bantu ANSYS," *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil (JATS)*, vol. 20, 2022.
- [8] G. Shi, Y. Shi and Y. Wang, "Behaviour of End-Plate Moment Connections Under Earthquake Loading," *Engineering Structures*, vol. 29, pp. 703-716, 2007.
- [9] A. S. Daryan and H. Ketabdari, "Mechanical Properties of Steel Bolts With Different Diameters After Exposure to High Temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 10, pp. 1-11, 2019.
- [10] F. Zhu, Y. Zhang and Chuntao, "Experimental Study on Mechanical Properties of Q345 Steel After High Temperature Cooling," *World Journal of Engineering Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 257-265, 2020.
- [11] FEMA, *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, Washington, 2002.
- [12] ANSYS, *ANSYS Meshing User's Guide*, Canonsburg: ANSYS, Inc, 2020.