

**PERILAKU SAMBUNGAN BOUT FLUSH END-PLATE BALOK KOLOM
MENGUNAKAN ANSYS WORK BENCH**

**Muhammad Firdaus*, Agus Setiobudi*, Syahril Alzahri*, R.M. Fadel Satria
Albimanzura****

**Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Jln. Jend. A. Yani
Lr Gotong Royong 9/10 Ulu, Palembang, Sumatera Selatan, Indonesia*

***Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Nama Universitas Sriwijaya, Jln. Raya
Palembang-Prabumulih KM32, Indralaya, Sumatera Selatan, Indonesia*

**Email: firdaus@univpgri-palembang.ac.id*

ABSTRAK

Sambungan merupakan komponen bangunan yang sangat penting, karena berperan sebagai penyalur beban antara balok dan kolom. Untuk mengetahui kapasitas sambungan, metode eksperimental adalah cara yang paling mendekati kondisi aktual. Akan tetapi waktu, biaya, peralatan dan sumber daya manusia harus menjadi pertimbangan. Dalam paper ini digunakan metode elemen hingga menggunakan Ansys Workbench sebagai cara alternatif dari eksperimental. Jenis sambungan yang dipelajari adalah sambungan flush end plate tebal 20mm, baut diameter 20mm, balok IWF 300x200x8x12 dan kolom IWF 300x250x8x12. Ukuran mesh pada elemen diatur untuk mendapatkan hasil yang optimal dengan tetap mempertimbangkan lamanya proses perhitungan, dimana untuk diarea titik kumpul ukuran mesh 5mm sedangkan pada balok kolom ukuran mesh 10mm. Untuk kontak antar elemen digunakan dua jenis kontak yaitu *bonded* dan *frictional*. Adapun *fixed* dan *rolled constraint*, digunakan sebagai perletakan di dalam simulasi. Output yang dikeluarkan dari ANSYS *workbench* antara lain kontur deformasi, kontur tegangan, dan nilai momen-rotasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi terbesar terjadi sebesar 153 mm. Tegangan yang terbesar terjadi pada bagian baut, sehingga diprediksi terjadi kegagalan tarik pada baut. Perbandingan momen rotasi hasil simulasi dan eksperimen memberikan hasil yang cukup memuaskan dengan selisih sebesar 4.8% untuk momen dan 11.4% untuk kekakuan sambungan.

Kata kunci : Sambungan baja, metode elemen hingga, *flush end-plate*, ANSYS *workbench*.

1. PENDAHULUAN

Baja merupakan material yang sering digunakan dalam konstruksi. Material baja ini memiliki keunggulan dibandingkan dengan material beton yaitu sifatnya yang lebih daktail, dimana material ini masih mampu mengalami regangan yang sangat signifikan meskipun dalam kondisi plastis. Penggunaan material baja sebagai balok dan kolom memerlukan media sambungan untuk mengintegrasikan kedua komponen tersebut. Sambungan baja merupakan bagian struktur yang sangat penting, karena kegagalan bangunan pada umumnya didominasi oleh kegagalan diarea sambungan dimana konsentrasi tegangan berada. Di dalam perancangannya, sambungan harus didesain mampu memikul beban ultimit dengan penggunaan material yang ekonomis, dan efisien dalam pelaksanaannya.

Pada umumnya, sambungan balok-kolom diasumsikan sebagai sambungan kaku (*rigid*) atau sendi (*pinned*). Dimana pada kondisi kaku sempurna tidak terjadi putaran sudut di ujung balok dan besarnya momen transfer dari balok ke kolom adalah sama. Sebaliknya untuk sambungan sendi tak ada momen yang diterima di sambungan tapi konsekuensinya akan terjadi rotasi maksimum pada ujung balok.

Pada kenyataannya, perilaku sambungan biasanya memiliki sifat diantara kedua kondisi ideal tersebut, dan dinamakan dengan *semi rigid* atau *partially restrained*. Perilaku sambungan ini memiliki karakteristik yang berbeda, dimana rotasi di area sambungan masih memungkinkan terjadi dengan besaran momen yang lebih rendah dibandingkan sambungan kaku. Dengan nilai kekakuan rotasi sambungan yang berada diantara 0 dan ∞ , maka analisa untuk sambungan semi

rigid lebih sulit dibandingkan sambungan kaku atau sederhana, hal ini yang memotivasi peneliti untuk mempelajari jenis sambungan ini secara mendalam.

Riset mengenai sambungan semi kaku antara lain oleh Nawar, Elshafy, Eltaly, and Kandil (2021) yang melakukan kalibrasi pemodelan dari sambungan *Flush end plate* (FEP) menggunakan Ansys terhadap hasil eksperimen dan analitik menggunakan Eurocode 3 (EC3), dimensi balok HEB200, baut M20mm dan variasi tebal endplate 10mm, 12mm, dan 15mm. Pemodelan menunjukkan hasil yang memuaskan terhadap eksperimen, efek dari tebal endplate meningkatkan kapasitas sambungan akan tetapi mengurangi daktilitas sambungan. Pengaruh endplate terhadap sambungan juga dilakukan oleh Özkılıç (2021) untuk sambungan Extended End plate (EEP), pemodelan dilakukan dengan Abaqus dan teori menggunakan EC3. Variasi tebal endplate sambungan adalah 10, 15, 20, 25, dan 30mm. Hasil studi juga membuktikan pengaruh dari tebal endplate meningkatkan momen ultimit dari sambungan, dan mode kegagalan akan beralih dari sambungan ke balok. Hal ini menunjukkan efek dari tebal pelat tidak akan berpengaruh apabila kapasitas momen balok lebih kecil dari kapasitas sambungan. Song, Uy, Li, and Wang (2022) menyelidiki dua jenis sambungan FEP dan EEP baja stainless dengan kolom fabrikasi 200x200x16x10m dan balok 250x130x6, tebal endplate yang digunakan adalah 8mm dan 16mm. Uji eksperimental dengan beban monotonik, FEA Abaqus dan EC3 dilakukan dalam riset tersebut. Model elemen hingga yang dikembangkan menunjukkan akurasi yang memuaskan dalam memprediksi perilaku mendekati kegagalan dari koneksi yang diuji dengan rasio antara pemodelan dan eksperimen mendekati 1.

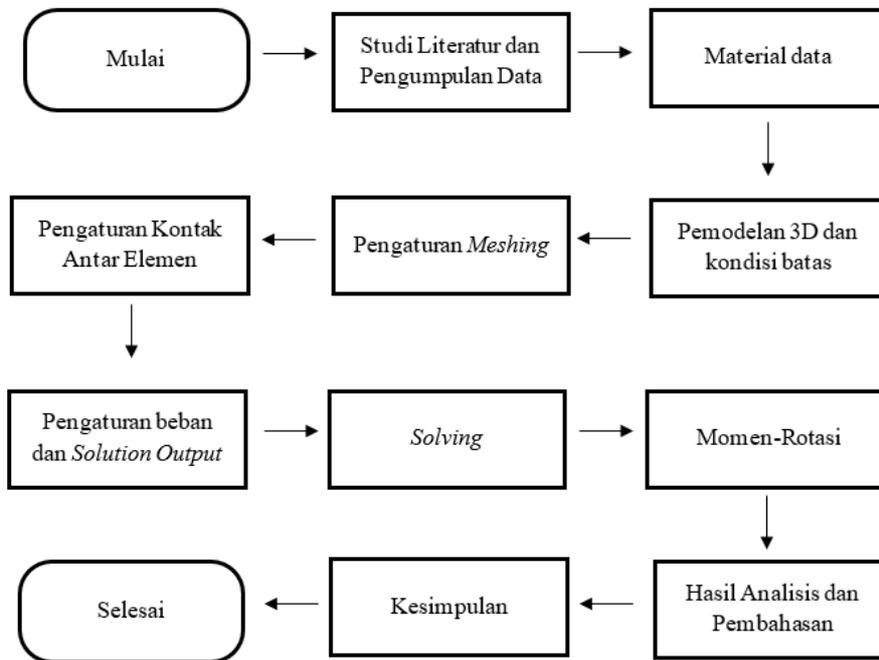
Dari uraian diatas dapat disimpulkan pada umumnya metode yang digunakan adalah eksperimental (uji skala penuh), *finite element*, dan parametrik. Uji skala penuh akan memberikan hasil yang paling mendekati kondisi nyata namun dengan konsekuensi sumber daya, alat uji, biaya dan waktu yang relatif besar. Pendekatan parameterik dilakukan dengan menggunakan rumus baku dari literatur atau persamaan empiris dari hasil eksperimen, ketepatan hasil sangat tergantung dari penggunaan persamaan yang tepat. Sedangkan metode elemen hingga (MEH) merupakan suatu pendekatan numerik menggunakan persamaan differensial pada suatu permasalahan dalam fisika maupun teknik (Pepper & Heinrich, 2017), dapat dikatakan MEH adalah eksperimental dalam bentuk simulasi dan hasilnya akan mendekati hasil uji eksperimen asalkan informasi material dan pemodelan dilakukan dengan benar. Penyelesaian metode elemen hingga ini merupakan suatu metode yang membutuhkan *computer aided engineering* (CAE) dalam penyelesaian masalahnya. Metode ini mampu menjadi alternatif dengan memangkas waktu yang dibutuhkan, peralatan laboratorium yang harus disediakan, dan tanpa membutuhkan material yang banyak. Lebih lanjut dapat memprediksi perilaku benda uji atau pola kegagalan untuk dibuktikan pada saat uji skala penuh dilakukan.

Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan riset mengenai sambungan baja *flush end plate* dengan metode elemen hingga menggunakan program Ansys APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) oleh Tayu, Handono, and Pandaleke (2017). Ansys APDL mempunyai tingkat kesulitan yang cukup tinggi sehingga sulit melakukan simulasi, walaupun pengguna mempunyai akses langsung ke pemodelan (Lee, 2021). Ansys Workbench adalah pengembangan lebih lanjut dari Ansys APDL, walaupun menggunakan solver yang sama, namun lebih mudah dalam hal pemodelan dan mengkaji hasil analisa. Karena itu, tujuan dari studi ini untuk mendapatkan kekakuan sambungan dalam bentuk grafik momen-rotasi hasil simulasi, dan dibandingkan dengan hasil eksperimental yang telah dilakukan oleh Shi et al. (2010),

2. METODE PENELITIAN

2.1. Metode yang digunakan

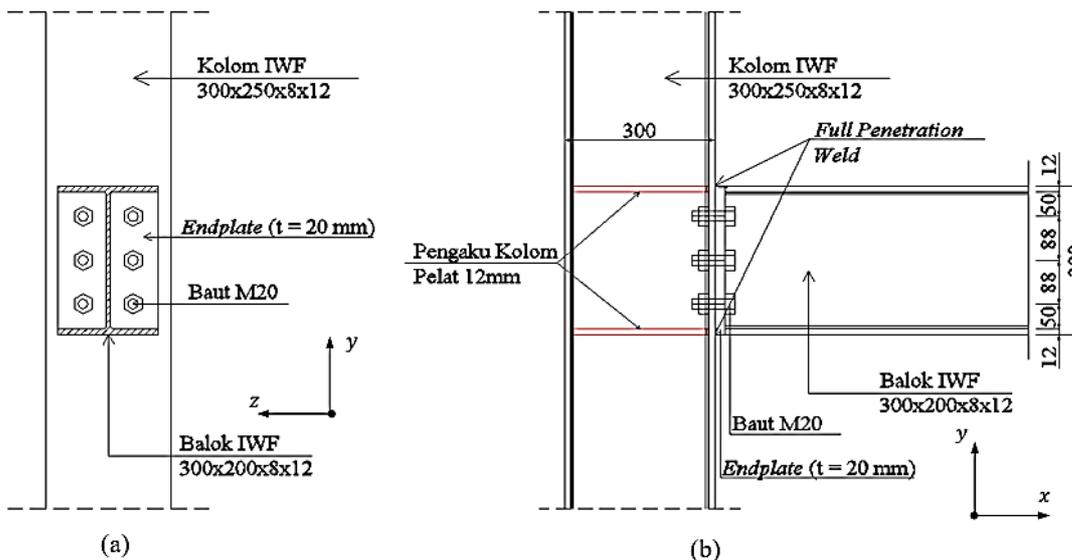
Metode yang digunakan adalah elemen hingga menggunakan program ANSYS Workbench. Proses yang dilakukan dalam studi ini adalah penentuan material yang digunakan (engineering data), pemodelan 3D (3D modelling), pendefinisian kontak antar elemen (contact analysis), *meshing*, pengaturan pembebanan, analisa momen rotasi dan pembahasan (**Gambar 1**).



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

2.2. Material data

Jenis sambungan yang diteliti mengacu pada hasil riset yang telah dilakukan oleh Shi et al. (2010), dengan kode sambungan SC-01 tipe *flush end plate*. Konfigurasi dan mutu material seperti pada Gambar 2 dan Tabel 1, dimana pengaturan material bilinear digunakan untuk seluruh komponen sambungan dan profil baja. Tebal end plate yaitu 20mm, baut diameter 20mm dengan jarak antar baut 88mm. Ukuran balok IWF 300x200x8x12, dan kolom IWF 300x250x8x12 dengan detail dimensi seperti pada Tabel 2. Pada kolom diberi pengaku (column stiffener) berupa pelat 12mm.



Gambar 2. (a) Detail Sambungan (b) Penebalan flens kolom pada daerah sambungan (Shi et al., 2010).

Tabel 1

Karakteristik Material (Shi et al., 2010)

Material	Tegangan Leleh (MPa)	Tegangan Ultimit (MPa)	Modulus Elastisitas
Baja ($t < 16$ mm)	391	559	190707
Baja ($t > 16$ mm)	363	573	204228
Baut (M20)	995	1160	204228

Tabel 2

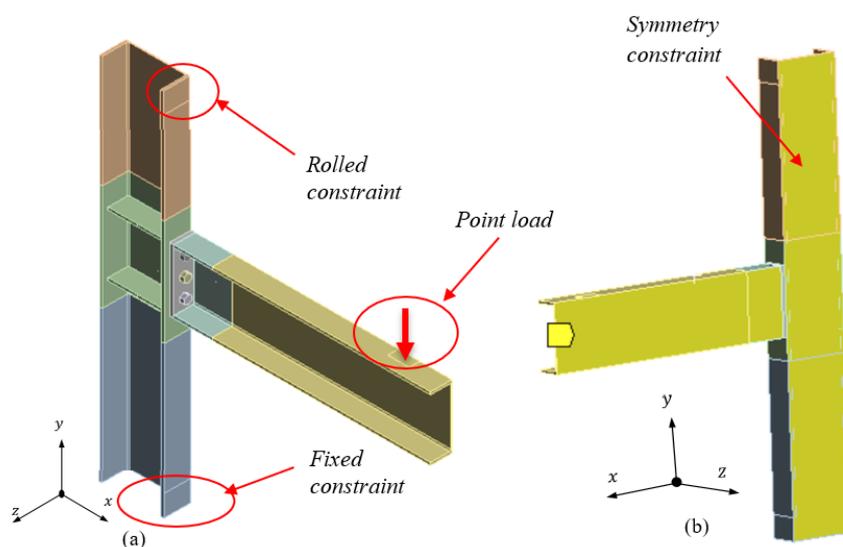
Dimensi Balok dan Kolom

Penampang	Tinggi (mm)	Tebal web (mm)	Lebar Flens (mm)	Tebal Flens (mm)
Balok IWF300x200x8x12	300	8	200	12
Kolom – IWF300x250x8x12	300	8	250	12

2.3. Pemodelan 3D dan Kondisi Batas

Ansyes Workbench digunakan untuk pemodelan sambungan, karena bersifat simetri, maka pemodelan hanya dilakukan setengahnya saja dengan tujuan untuk menghemat waktu analisa seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**. Jenis elemen yang digunakan adalah SOLID185 yang cocok untuk pemodelan 3D dengan elemen benda pejal. Elemen ini mempunyai 8 titik nodal dengan 3 derajat kebebasan translasi untuk 3 sumbu global untuk setiap titik nodal, jadi dimensi matriks kekakuan untuk satu elemen solid adalah 24. Elemen ini memungkinkan untuk digunakan dalam analisa plastisitas, hiperelastisitas, kekakuan tegangan, rangkai, defleksi dan regangan besar (ANSYS Inc., 2020a).

Untuk kondisi batas (*constraint*) yang digunakan adalah *fixed* dan *rolled*. Posisi dari *constraint* tersebut dapat dilihat pada Gambar 3(a), dimana perletakan jepit (*fixed support*) berada di bawah kolom, sementara perletakan rol (pergerakan arah y global saja yang diizinkan) berada di bagian depan atas kolom. Batas simetri dari model seperti pada Gambar 3b dengan perpindahan dalam arah x dan y global saja yang diperbolehkan, Untuk pembebanan diberikan dalam 2 step, pada step 1 sebesar 20 kN dan step 2 sebesar 40 kN, dan diletakkan sejauh 1 meter dari muka kolom. Nilai pembebanan monotonik ini harus melampaui kemampuan elastik sambungan, dengan tujuan untuk mendapatkan respon nonlinear dari struktur secara keseluruhan, dimana perilaku ini dapat dilihat dari kurva momen-rotasi hasil analisa.

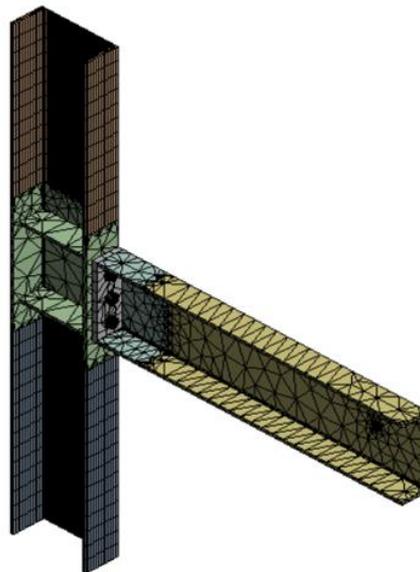


Gambar 3. (a) Pemodelan 0.5 simetri dan pembebanan (b) Batas simetri

2.4. Jejaring elemen (Meshing)

Ansys mempunyai fitur jejaring elemen (*meshing*) yang dapat digunakan sesuai keperluan. Dalam pemodelan ini digunakan 2 metode jejaring yaitu *Sweep* dan *Multizone*. Elemen dengan metode *sweep* dihasilkan dari permukaan penampang acuan yang kemudian dibentuk secara otomatis atau dengan ukuran tertentu yang diatur oleh pengguna, namun terbatas pada bentuk yang teratur pada sumbu tertentu. Sedangkan metode *multizone* secara otomatis akan membentuk jejaring elemen pada geometri yang dibatasi area yang terpetakan dalam sumbu tertentu (dimana metode *sweep* dapat digunakan) dan area yang tidak terstruktur, metode ini lebih cocok dimana metode *sweep* tidak mampu membuat jejaring elemen pada elemen tersebut (ANSYS Inc., 2020b).

Gambar 4 menyajikan hasil pembentukan jejaring elemen, dimana baut dan mur digunakan metode *multizone* untuk merapikan *meshing* yang ada dengan ukuran *mesh* 5 mm. Pada bagian *end-plate* digunakan metode *sweep* dengan ukuran *mesh* 5 mm, sedangkan ukuran *mesh* pada balok dan kolom adalah 10 mm. Pemilihan ukuran elemen akan menentukan ketepatan hasil dari pemodelan, semakin kecil semakin baik. Akan tetapi faktor waktu yang dibutuhkan dalam perhitungan dan konvergen hasil analisa harus menjadi pertimbangan. Dimana ukuran elemen tidak lagi mempengaruhi hasil analisa.



Gambar 4. Hasil pembentukan jejaring elemen (*Meshing*)

2.5. Contact

Interaksi antara dua atau lebih elemen tergantung pada jenis kontak yang diberikan. Perilaku nonlinear dari struktur selain dari sifat nonlinear material, juga tergantung dari kontak nonlinear antara komponen. Semakin banyak part yang ada, maka definisi kontak juga akan bertambah. Ansys Workbench mempunyai fitur pendefinisian kontak secara otomatis (*auto-detection*), sehingga pengguna dapat mengatur jenis kontak yang dipakai,. Namun untuk posisi target dan kontak, perlu dicermati terlebih dahulu mana yang sebagai target maupun kontak. Untuk kasus ini, Tipe *CONTA173* dan *TARGE170* digunakan dalam pemodelan. *Bonded contact* digunakan antara balok terhadap *endplate*, dan baut terhadap mur, dimana antara kedua part tak dapat dipisahkan (*cannot separate*) dan tak dapat bergeser (*sliding*). Sedangkan kontak antara *endplate-kolom*, *kolom-mur*, *endplate-baut*, dan *kolom-baut* digunakan *frictional contact* dengan koefisien *sliding* 0.25 (yang umum digunakan). Jenis kontak ini untuk mensimulasikan antara kedua part memungkinkan terpisah (*can separate*) dan bergeser (*sliding*) dengan faktor koefisien geser tertentu. Tabel 3 menyajikan informasi kontak yang dipakai dalam pemodelan.

Tabel 3

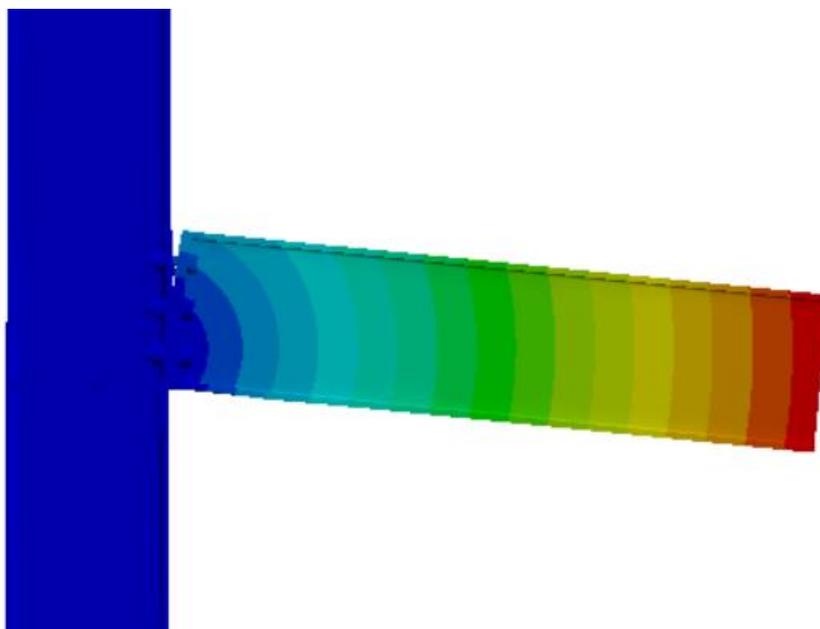
Kontak pada tiap elemen

Elemen	Target-Kontak		Tipe Kontak	Algoritma
	Target	Kontak		
<i>Endplate - Balok</i>	Balok	Endplate	<i>Bonded</i>	<i>Program Controlled</i>
<i>Endplate-Kolom</i>	Kolom	Endplate	<i>Frictional, Coefficient 0.25</i>	<i>Pure Penalty</i>
<i>Kolom-Mur</i>	Mur	Kolom	<i>Frictional, Coefficient 0.25</i>	<i>Pure Penalty</i>
<i>Baut-Mur</i>	Mur	Baut	<i>Bonded</i>	<i>Program Controlled</i>
<i>Endplate-Baut</i>	Baut	Endplate	<i>Frictional, Coefficient 0.25</i>	<i>Pure Penalty</i>
<i>Kolom-Baut</i>	Baut	Kolom	<i>Frictional, Coefficient 0.25</i>	<i>Pure Penalty</i>

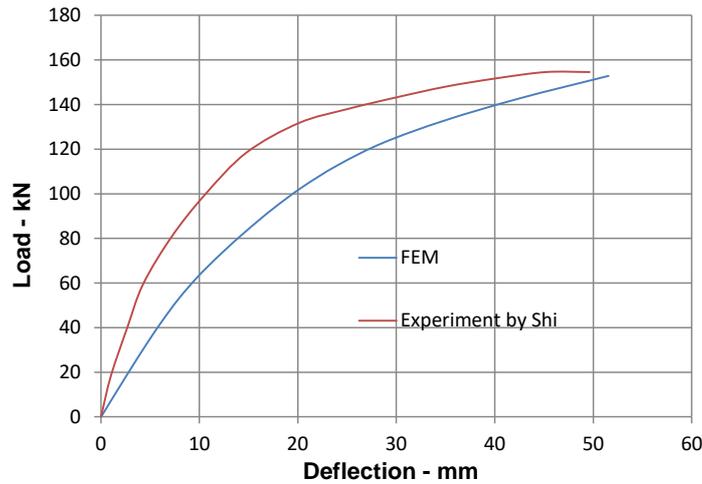
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kurva beban-defleksi (*Load deflection*)

Analisa elemen hingga dilakukan dengan menggunakan Ansys Workbench, pengaturan *large deflection* dilakukan untuk mengetahui respon non-linear dari pemodelan. Intial time step diatur sebesar 0.001s dan maximum time step 0.05s. Pengaturan ini dianggap mencukupi untuk mendapatkan hasil konvergen dari analisa non-linear, dengan menggunakan CPU AMD Ryzen 7 dengan kapasitas memory 16GB waktu yang dibutuhkan adalah 2 jam. **Gambar 5** memperlihatkan deformasi yang terjadi akibat pembebanan yang diberikan. Sedangkan **Gambar 6** menampilkan grafik beban-defleksi yang dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Deformasi paling besar terjadi pada bagian ujung balok, karena lokasi tersebut dekat dengan lokasi beban yang diberikan. Dimana dari pemodelan dengan beban 52 kN defleksi yang terjadi 153mm, sedangkan dari eksperimen beban 50 kN menghasilkan defleksi sebesar 155mm.



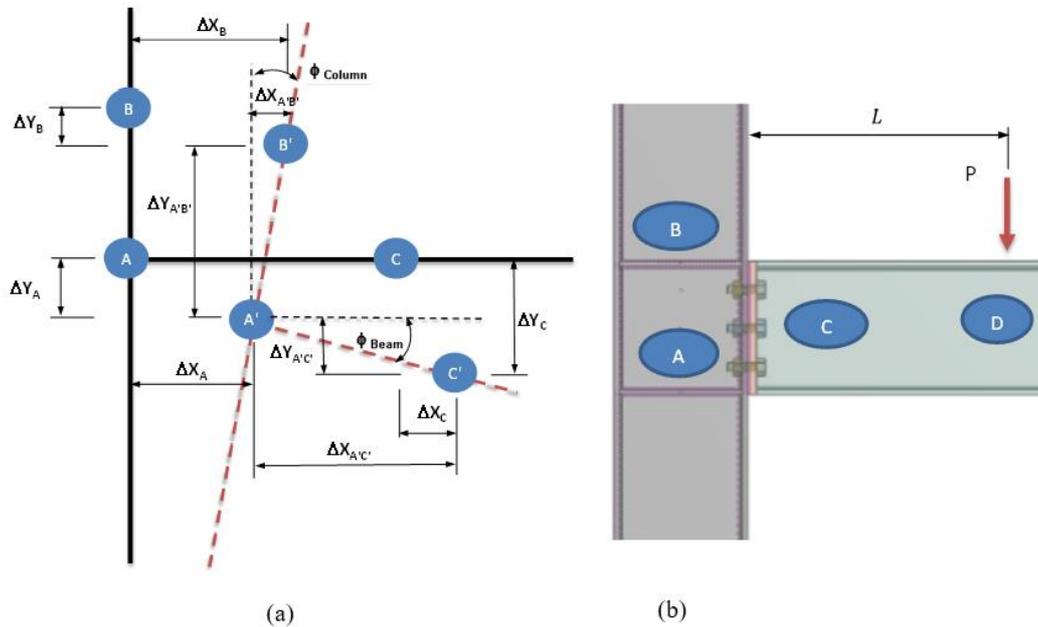
Gambar 5. Deformasi pada model



Gambar 6. Grafik Beban-defleksi

3.2. Kurva momen-rotasi (*Moment-rotation*)

Kinerja sambungan pada umumnya dinyatakan dengan kurva momen-rotasi. Karena dari pemodelan output yang dihasilkan hanya defleksi dalam arah sumbu global, maka untuk mendapatkan rotasi sambungan dengan menggunakan data perpindahan dititik A,B dan C seperti pada Gambar 7. Rotasi pada kolom (ϕ_{Column}) dan balok (ϕ_{Beam}) dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dan (2). Rotasi pada sambungan (ϕ_{Joint}) adalah selisih dari ϕ_{Column} dan ϕ_{Beam} . Momen pada sambungan (M_z) didapat dari besarnya beban P terhadap L (persamaan 4), dan pada akhirnya kekakuan sambungan didapat dari perbandingan antara M_z dan ϕ_{Joint} (persamaan 5).



Gambar 7. (a) Skema rotasi sambungan (b) Posisi beban P sejarak L

$$\phi_{Column} = \tan^{-1} \frac{\Delta X_{A'B'}}{\Delta Y_{A'B'}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 1}$$

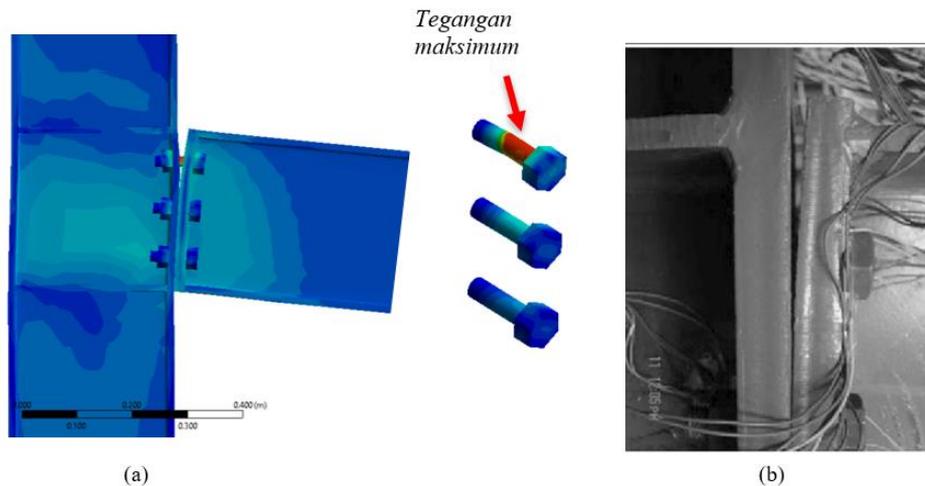
$$\phi_{Beam} = \tan^{-1} \frac{\Delta Y_{A'C'}}{\Delta X_{A'C'}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 2}$$

$$\phi_{Joint} = \phi_{Beam} - \phi_{Column} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 3}$$

$$M_z = P L \quad \dots\dots\dots \text{pers. 4}$$

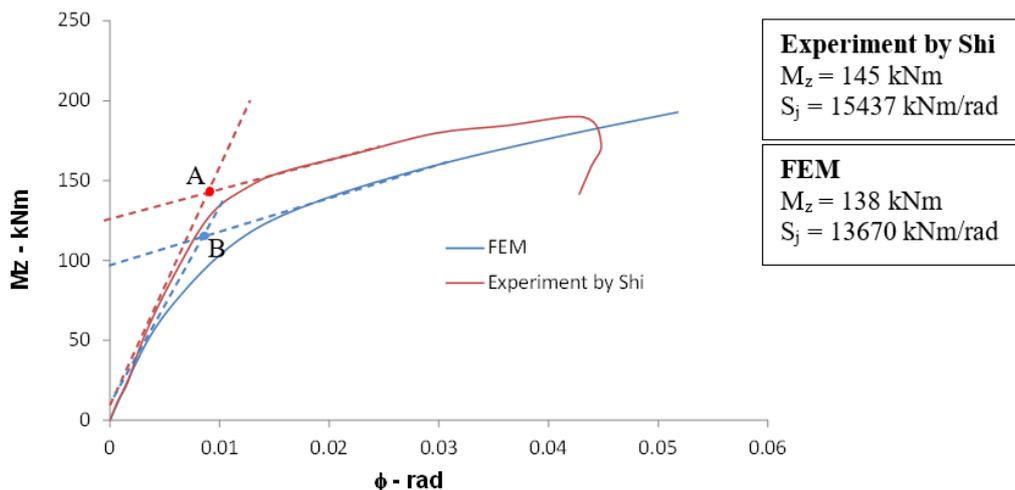
$$S_j = \frac{M_z}{\phi_{Joint}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 5}$$

Hasil simulasi dan eksperimen disajikan pada **Gambar 8**, dapat dilihat terjadi jarak (gap) antara *end plate* dan kolom web di zona tarik karena adanya rotasi pada sambungan. Tegangan yang paling tinggi terjadi pada baut tarik dan hal ini cocok dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh Shi et al. (2010) dimana terjadi kegagalan berupa patahnya (*fracture*) baut di zona tarik.



Gambar 8. Rotasi sambungan (a) Simulasi (b)Tegangan pada baut (c) Eksperimen Shi et al. (2010)

Untuk hasil momen rotasi yang terjadi apabila dibandingkan dengan uji laboratorium oleh Shi et al. (2010) dapat dilihat pada **Gambar 9**. Titik A dan B adalah titik potong garis tangen dari kurva. Nilai M_z didapat dari proyeksi garis mendatar dari titik A dan B ke sumbu Y, dan kekakuan sambungan S_j diketahui dari besarnya gradien dari titik 0,0 ke titik A dan B.



Gambar 9. Perbandingan momen-rotasi eksperimental dan elemen hingga

Berdasarkan Tabel 4, Hasil simulasi menunjukkan prediksi nilai yang lebih rendah untuk momen terhadap eksperimen sebesar 4.8%. Untuk kekakuan sambungan, uji skala penuh menghasilkan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan pemodelan dengan perbedaan 11.4%.

Perbedaan ini dapat diminimalkan dengan cara antara lain ukuran mesh yang diperkecil, dan penggunaan data material dari uji tarik ketimbang menggunakan pendekatan material bilinear. Walaupun demikian, dengan nilai persentase yang didapat hasil simulasi dapat diterima.

Tabel 4
Perbandingan Momen Rotasi

Penelitian	Momen	Perbedaan	Sj	Perbedaan
	kN m	%	kNm/rad	%
Shi, Shi (4)	145	4.8%	15437	11.4%
ANSYS <i>Workbench</i>	138		13670	

4. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Deformasi maksimum yang terjadi dari simulasi sebesar 153mm pada beban 52 kN, mendekati hasil uji skala penuh sebesar 155mm saat beban 50 kN diberikan.
2. Tegangan maksimum terjadi pada komponen baut, sehingga sambungan berpotensi mengalami kegagalan tarik.
3. Adapun hasil metode elemen hingga dalam paper ini mempunyai perbedaan terhadap hasil uji sebesar 4.8% untuk momen dan 11.4% untuk kekakuan sambungan.

DAFTAR PUSTAKA

ANSYS Inc. (2020a). *Element Reference*: Ansys Inc.

ANSYS Inc. (2020b). *Meshing Guide*: Ansys Inc.

Lee, H. H. (2021). *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021: Theory, Applications, Case Studies*: SDC Publications.

Nawar, M., Elshafy, A., Eltaly, B., & Kandil, K. (2021). Experimental and Numerical Analysis of Steel Beam-Column Connections. *ERJ. Engineering Research Journal*, 44(1), 43-49.

Özkılıç, Y. O. (2021). Investigation of the effects of bolt diameter and end-plate thickness on the capacity and failure modes of end-plated beam-to-column connections. *Research on Engineering Structures & Material*.

Pepper, D. W., & Heinrich, J. C. (2017). *The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications with MATLAB, MAPLE, and COMSOL*: CRC Press.

Shi, G., Shi, Y., Wang, Y., & Bijlaard, F. (2010). Monotonic loading tests on semi-rigid end-plate connections with welded I-shaped columns and beams. *Advances in Structural Engineering*, 13(2), 215-229.

Song, Y., Uy, B., Li, D., & Wang, J. (2022). Ultimate behaviour and rotation capacity of stainless steel end-plate connections. *STEEL AND COMPOSITE STRUCTURES*, 42(4), 569-590.

Tayu, B., Handono, B. D., & Pandaleke, R. (2017). Perilaku Sambungan Baut Flush End-Plate Balok Kolom Baja pada Kondisi Batas. *Jurnal Sipil Statik*, 5(5).