

## Analisis Numerik Sambungan Rigid Balok-Kolom *Bolted Flange Plate* (BFP) menggunakan Program Bantu ANSYS

Fikri Ghifari<sup>1,\*</sup>, Budi Suswanto<sup>1</sup>, Yuyun Tajunnisa<sup>2</sup>,

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>, Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>2</sup>

Koresponden\*, Email: [fghifari21@gmail.com](mailto:fghifari21@gmail.com)

Info Artikel		Abstract
Diajukan	01 Desember 2021	<i>The failure of the steel moment frame structure in America in 1994 due to the Northridge earthquake provided knowledge that steel materials with high ductility properties can become brittle if not properly detailed. The failures made AISC form a task force of the AISC Connection Prequalification Review Panel (CPRP) to conduct evaluation and research related to connections. One of the connections being evaluated was Bolted Flange Plate (BFP) Connections. This study discusses the numerical analysis of the BFP connection model using the ANSYS program. These analysis results are compared to experimental tests conducted by Yilmaz et al. Numerical analysis was carried out to verify the experimental results which included moment capacity, rotational capacity, and condition of the panel zone as well as to see the stress contours that occur. The numerical analysis and experimental results showed that the panel zone experienced yielding at the end of loading. The moment and rotation capacities produced by the numerical model are 247.36 kN-m and 4.83%, with a difference between the numerical and experimental models of 4.05%.</i>
Diperbaiki	11 Februari 2022	
Disetujui	11 Februari 2022	

Keywords: Steel connection, bolted flange plate, numerical analysis, ANSYS

### Abstrak

Kegagalan struktur rangka momen baja di Amerika pada tahun 1994 akibat gempa Northridge memberikan pengetahuan bahwa material baja yang memiliki sifat daktilitas tinggi dapat menjadi getas jika tidak didetailkan dengan baik. Kegagalan-kegagalan yang terjadi membuat AISC membentuk satuan tugas *the AISC Connection Prequalification Review Panel* (CPRP) untuk melakukan evaluasi dan penelitian terkait sambungan. Salah satu sambungan yang dievaluasi adalah sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP). Penelitian ini membahas tentang analisis numerik model sambungan BFP dengan menggunakan program bantu ANSYS kemudian hasil analisis dibandingkan hasil pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Yilmaz dkk. Analisis numerik dilakukan untuk memverifikasi hasil eksperimen yang meliputi kapasitas momen, kapasitas rotasi dan kondisi *panel zone* serta melihat kontur-kontur tegangan yang terjadi. Hasil analisis numerik dan hasil eksperimental menunjukkan *panel zone* mengalami pelelehan di akhir pembebanan. Kapasitas momen dan rotasi yang dihasilkan oleh model numerik adalah 247,36 kN-m dan 4,83% dengan selisih antara model numerik dan eksperimental sebesar 4,05%.

Kata kunci: Sambungan baja, *bolted flange plate*, analisis numerik, ANSYS

### 1. Pendahuluan

Kegagalan struktur rangka momen baja di Amerika pada tahun 1994 akibat gempa Northridge memberikan pengetahuan bahwa material baja yang memiliki sifat daktilitas tinggi dapat menjadi getas jika tidak didetailkan dengan baik. Kegagalan diakibatkan oleh performa sambungan *welded flange-bolted web* tidak baik dalam menyerap energi gempa [1]. Beberapa kerusakan yang telah teridentifikasi antara lain [2]:

- Keretakan sambungan las kemudian menyebar ke sayap kolom.
- Keretakan akibat fenomena *heat affected-zone* (HAZ).
- Aksi komposit plat beton dengan balok menyebabkan adanya perbedaan antara posisi garis netral pada momen positif (struktur komposit) dengan posisi garis netral

pada momen negatif (struktur *non*-komposit) sehingga terjadi deformasi aksial pada sayap balok serat bawah dan terjadi *fracture*.

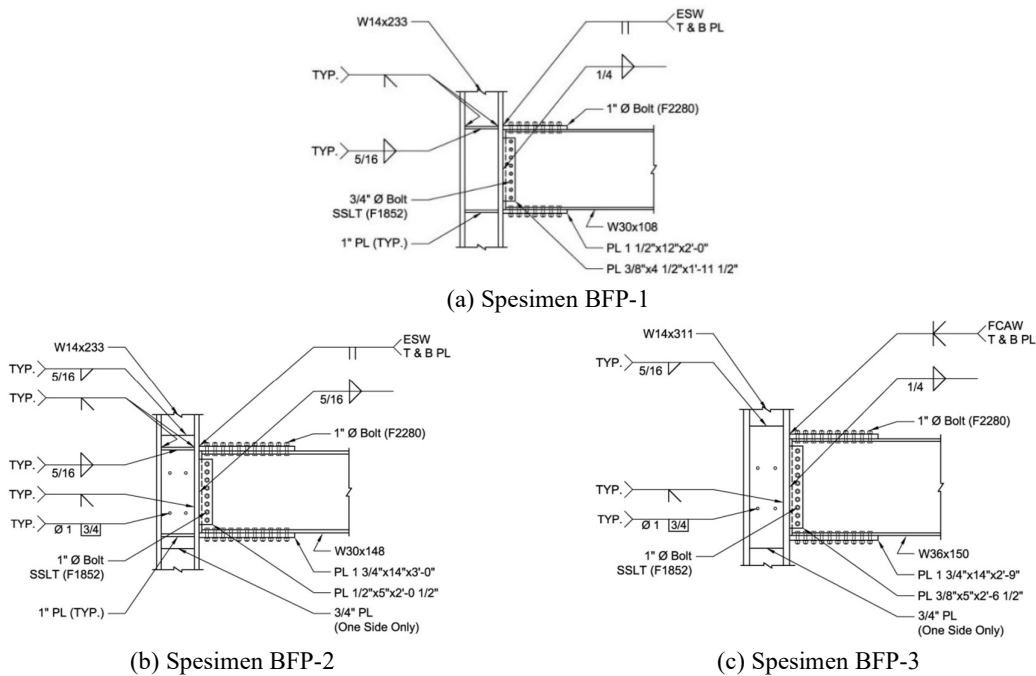
- Tidak adanya plat menerus (*continuity plate*) yang menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada kolom bagian sayap yang dekat dengan badan.

Kegagalan-kegagalan yang terjadi di atas membuat AISC membentuk satuan tugas *the AISC Connection Prequalification Review Panel* (CPRP) untuk melakukan evaluasi dan penelitian terkait sambungan [3], salah satunya adalah melakukan evaluasi usulan model sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP) yang disempurnakan oleh Sato dkk [4]. Sambungan ini memiliki hirarki keruntuhan supaya tidak terjadi keruntuhan getas antara lain: terjadinya slip baut, kemudian akan terjadi pelelehan pada balok di ujung plat sambung, dan yang

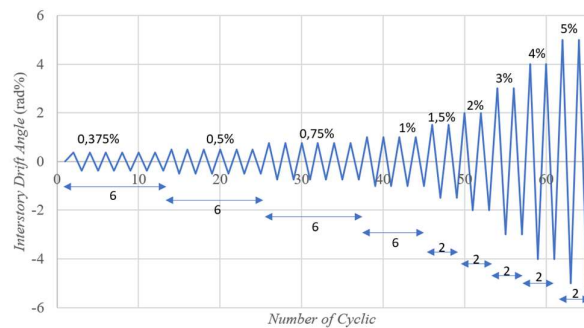
terakhir adalah plat sambung akan mengalami pelehan [5]. Secara model mekanik, sambungan BFP memiliki kesamaan dengan model sambungan *T-Stub*. Yang membedakan hanyalah pada sisi sayap kolom sambungan BFP menggunakan las untuk menyambungkan plat sambung ke sayap kolom. Sehingga perilaku *tension elongation* pada baut dan leleh pada sayap sambungan *T-Stub* digantikan sepenuhnya oleh las [6].

Sato dkk [4] menguji tiga model sambungan BFP secara eksperimental, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Spesimen diuji dengan protokol beban siklik sesuai dengan *AISC Seismic Provision* yang dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Ketika spesimen diuji dan dilakukan pengamatan secara visual, ketiga spesimen tersebut memiliki perilaku yang relatif sama. Saat terjadi rotasi 0,375% atau rotasi 0,5%, ketiga spesimen menghasilkan suara yang sangat keras di daerah plat sambung. Suara keras terjadi akibat baut pada plat sambung mengalami fenomena *slip*. Kemudian *flaking* atau timbulnya bercak-bercak pada daerah sambungan terjadi saat rotasi 2%. Timbulnya bercak-bercak adalah tanda bahwa pelehan telah terjadi pada sambungan tersebut. Saat spesimen mengalami rotasi 4%, terjadi tekuk lokal pada sayap dan badan balok kemudian balok mengalami tekuk torsi lateral (LTB) saat rotasi 5%.



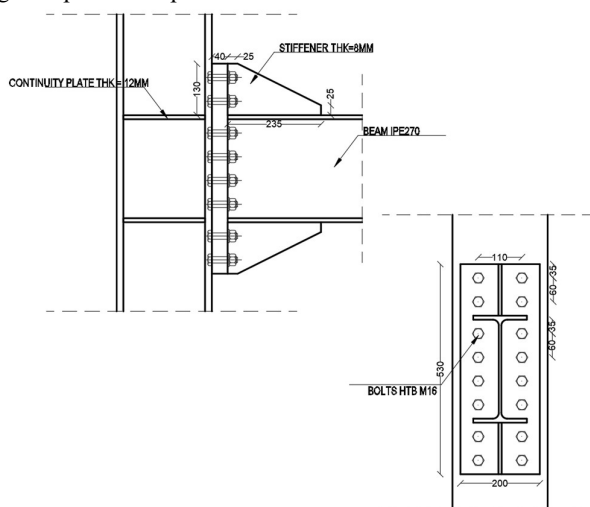
**Gambar 1.** Detail spesimen sambungan BFP [4]



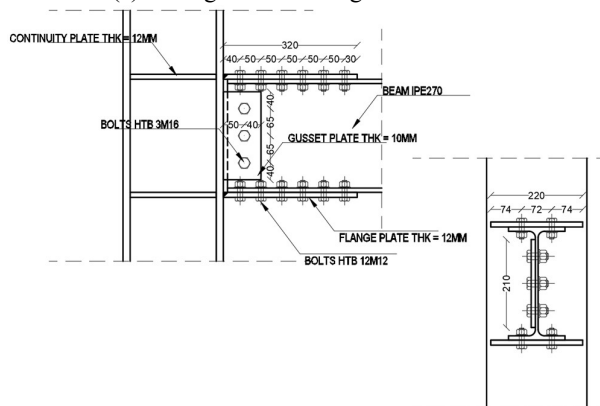
**Gambar 2.** Protokol pembebanan yang digunakan dalam pengujian spesimen sambungan [4, 7]

Hasil pengujian spesimen menunjukkan bahwa spesimen sambungan mampu mempertahankan sudut rotasi sebesar 6% sebelum mengalami kegagalan *fracture* pada sayap balok akibat luas efektif serta spesimen mampu menahan 80% momen plastis balok. Walaupun sudut rotasi dan momen yang dihasilkan sangat baik, kurva yang dihasilkan oleh spesimen tidak mengembang membentuk *pinching*. Hal ini diakibatkan oleh baut yang mengalami *slip* saat terjadi rotasi 0,375% dan rotasi 0,5%.

Yilmaz dkk [8] melakukan analisis perbandingan sambungan *extended end-plate* (BSEP-01) dengan sambungan *bolted flange plate* (BFP-01) menggunakan profil baja eropa secara eksperimental. Detail konfigurasi spesimen sambungan dapat dilihat pada **Gambar 3**.



(a) Konfigurasi sambungan BSEP-01



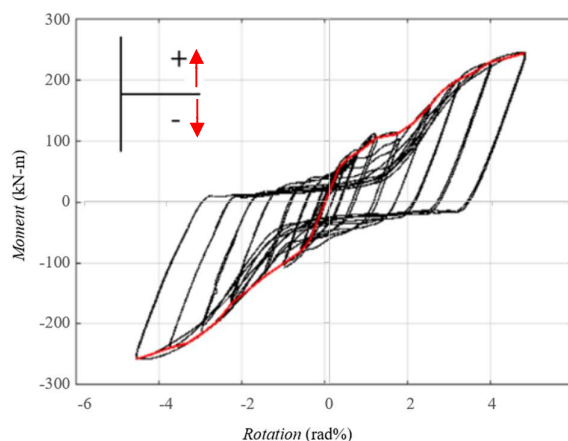
(b) Konfigurasi sambungan BFP-01

**Gambar 3.** Detail konfigurasi spesimen sambungan Yilmaz dkk [8]

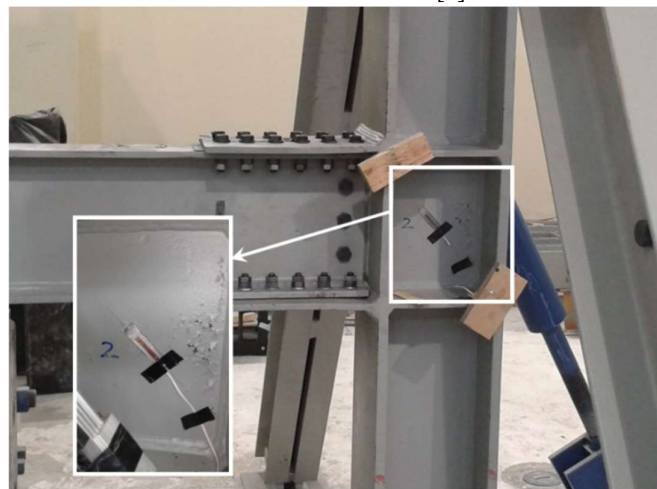
Spesimen diuji dengan protokol beban siklik sesuai dengan AISC *Seismic Provision* yang dapat dilihat pada **Gambar 2**. Hasil pengujian yang akan dianalisis atau dievaluasi adalah

membandingkan kapasitas momen dan membandingkan kurva histerisis masing-masing spesimen sambungan.

Hasil yang didapatkan adalah bahwa spesimen BSEP-01 memiliki kapasitas momen yang lebih tinggi daripada spesimen BFP-01 dengan masing-masing kapasitas momen yang dihasilkan sebesar 281,8 kN-m dan 257,4 kN-m [8]. Spesimen BFP-01, saat terjadi rotasi 1%, mengalami fenomena *slip* sehingga kapasitas momen hampir konstan di rentang rotasi 1% hingga 1,85%, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Di akhir pengujian terlihat bahwa *panel zone* mengalami pelelehan seperti pada **Gambar 5**.



**Gambar 4.** Kurva histerisis model BFP-01 [8]



**Gambar 5.** Pelelehan pada *panel zone* spesimen BFP-01 [8]

## 2. Metode

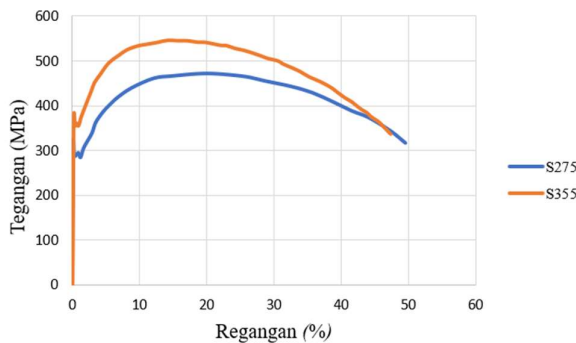
Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi sambungan BFP-01 yang diuji oleh Yilmaz dkk [8] dengan menggunakan pendekatan analisis numerik.

- a. Konfigurasi, Material, dan Metode pengujian analisis numerik BFP-01

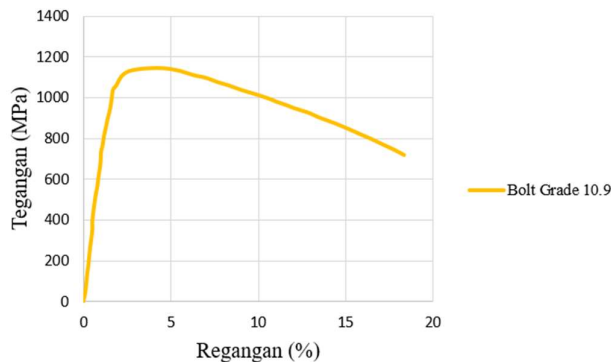
Detail konfigurasi sambungan yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 4(b)**. Dalam pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Yilmaz dkk [8] menggunakan baja mutu S275 untuk elemen balok dan kolom, baja mutu S355 untuk plat sambung, dan baut mutu tinggi *grade* 10,9. Modulus elastisitas yang diambil untuk analisis numerik adalah 200.000 MPa. Spesifikasi material dapat dilihat pada **Tabel 1** dan kurva tegangan-regangan dapat dilihat pada **Gambar 6** dan **Gambar 7**.

**Tabel 1.** Material model BFP-01

Material	Properties baja		
	Yield, $f_y$ (MPa)	Ultimate, $f_u$ (MPa)	Ultimate elongation, $\epsilon_u$ (%)
Profil balok dan kolom	284,54	471,34	49,55 [9]
Plat sambung	355,68	546,61	47,29 [9]
Baut	924,96	1145,31	18,35 [10]

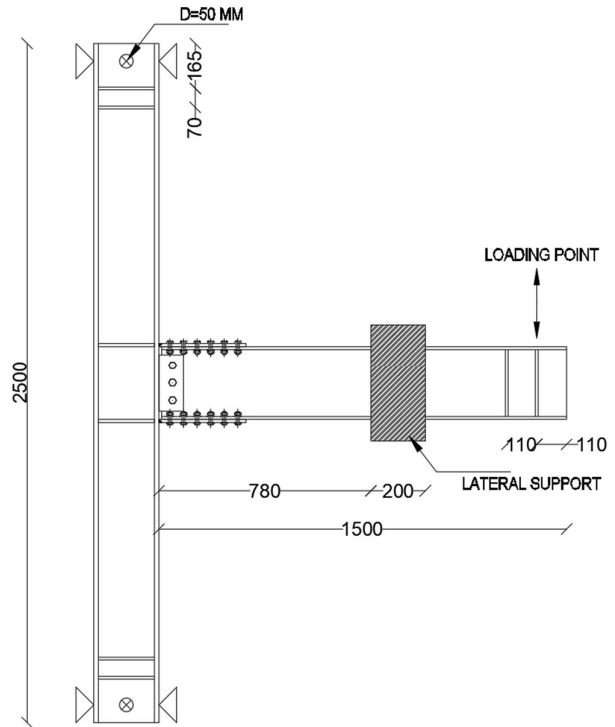


**Gambar 6.** Kurva tegangan-regangan baja mutu S275 dan S355 [9]



**Gambar 7.** Kurva tegangan-regangan baut mutu tinggi *grade* 10,9 [10]

Pemodelan menggunakan sistem *sub-assembly* atau hanya memodelkan balok-kolom dan tidak memodelkan gedung secara menyeluruh dengan perletakan sendi-sendi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**. Model akan dibebani beban siklik, seperti pada **Gambar 2**, yang dibebani di ujung balok seperti pada **Gambar 8**.



**Gambar 8.** Model *sub-assembly*

b. Pemodelan model BFP-01 dengan program bantu ANSYS

Tahap awal dalam melakukan pemodelan menggunakan program ANSYS adalah mendefinisikan material yang akan digunakan pada *engineering data*, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 9**. Data-data yang harus dimasukkan antara lain: Berat jenis baja ( $7.850 \text{ kg/m}^3$ ); Modulus elastisitas baja (200.000 MPa); *Tensile* dan *compression yield strength*; *Tensile* dan *compression ultimate strength*; serta *plasticity* dari material tersebut. Pada penelitian ini menggunakan model *multilinear kinematic hardening* untuk mendefinisikan sifat *non-linear* dari material baja yang digunakan.

Selanjutnya adalah membuat *geometry* model yang akan dianalisis. Hasil pembuatan model dapat dilihat pada **Gambar 10**. Di dalam proses pembuatan *geometry*, model yang memiliki lubang, model berbentuk lingkaran, dan model yang saling bertumpuan perlu dipartisi supaya menghasilkan *meshing* yang lebih baik. Hasil partisi dapat dilihat pada **Gambar 11** dan **Gambar 12**. ANSYS tidak melakukan tahap

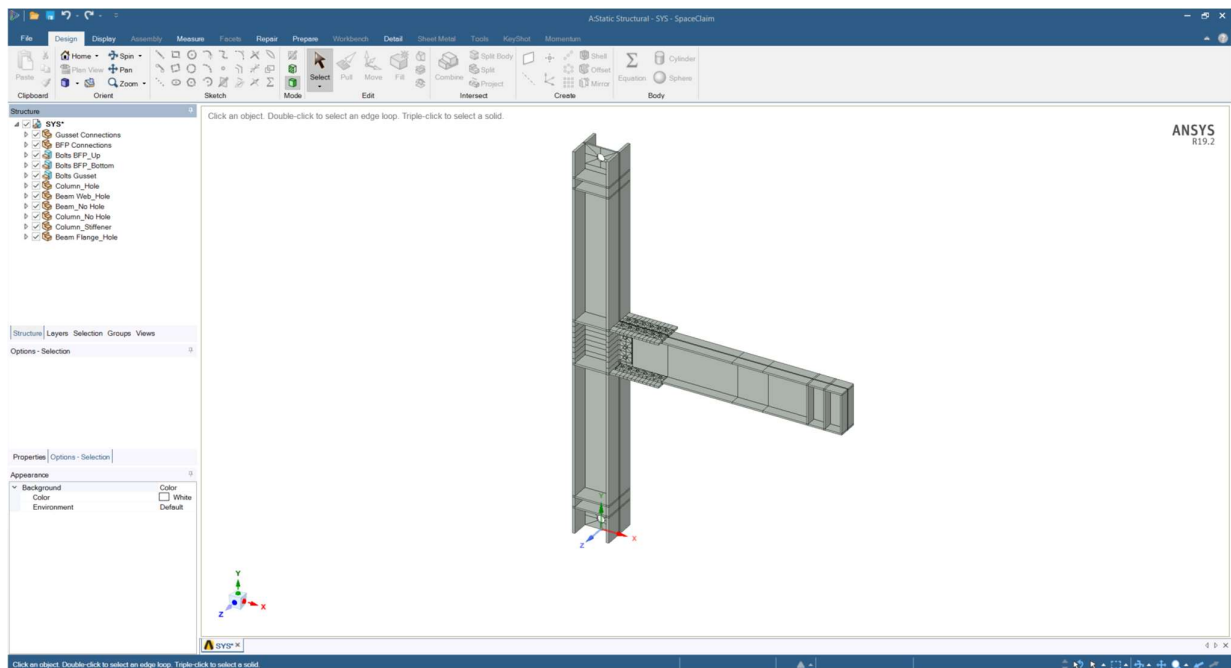
assembly karena proses tersebut dilakukan saat pembuatan geometry.

Outline of Schematic A2, B2, C2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source Description
2	Material			
3	Baut		General_Materials	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Profil		General_Materials	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	Stiffener, Plat Sambung		General_Materials	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

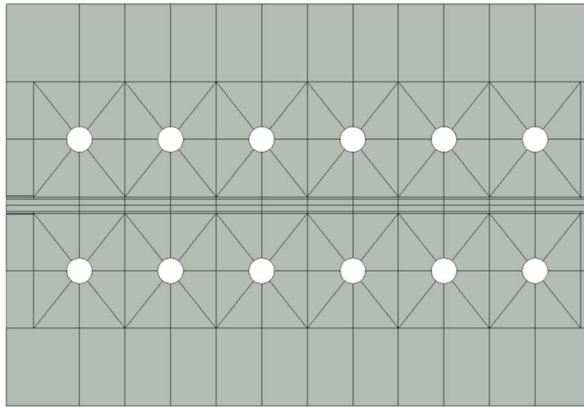
  

Properties of Outline Row 4: Profil				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus a...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0.3		
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa	
12	Multilinear Kinematic Hardening	Tabular		
15	Strain-Life Parameters			
23	S-N Curve	Tabular		
27	Tensile Yield Strength	369.9	MPa	
28	Compressive Yield Strength	369.9	MPa	
29	Tensile Ultimate Strength	612.74	MPa	
30	Compressive Ultimate Strength	612.74	MPa	

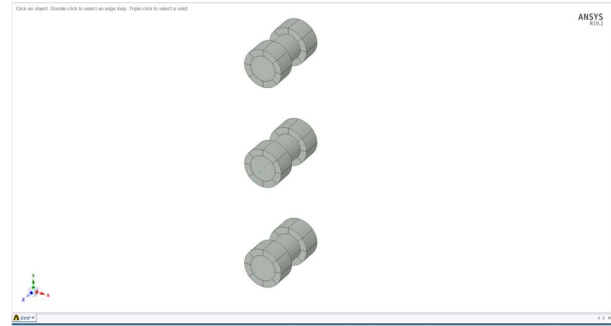
Gambar 9. Engineering data



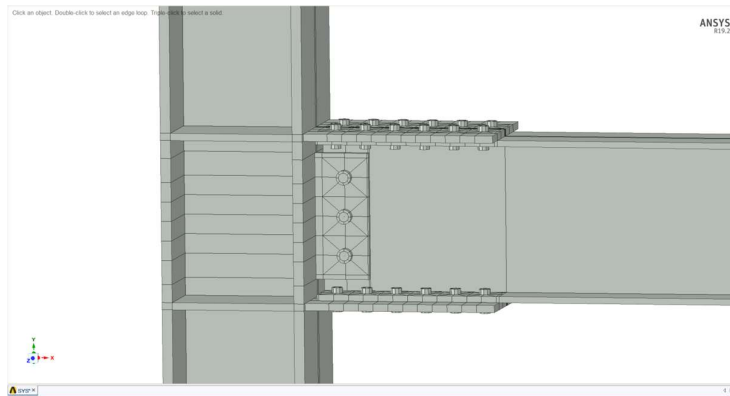
Gambar 10. Geometry model BFP-01



(a) elemen dengan lubang



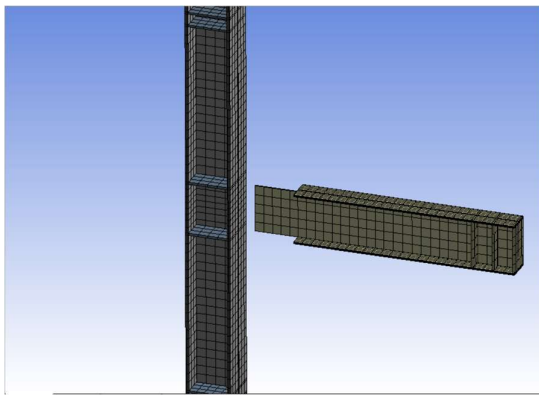
(b) elemen baut

**Gambar 11.** Hasil partisi model BFP-01**Gambar 12.** Partisi elemen yang saling menumpu

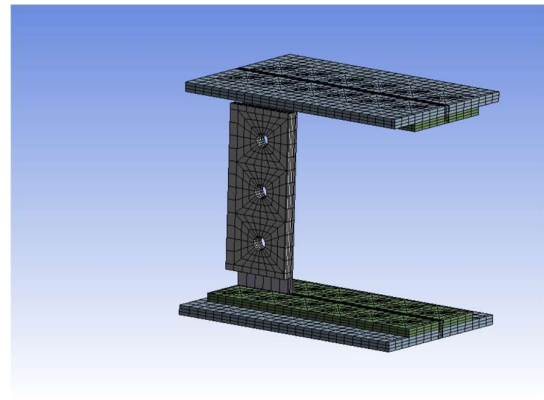
Langkah selanjutnya, setelah *geometry* dibuat, adalah mendefinisikan *body contact*. Tujuan dari *body contact* adalah untuk menentukan perilaku atau hubungan antar elemen struktur. *Body contact* yang akan digunakan antara lain: *bonded*, *frictionless*, dan *frictional*. *Bonded* digunakan pada elemen yang tersambung secara utuh atau disambung menggunakan las, contohnya adalah plat *stiffener* dengan badan dan sayap balok. *Frictionless* untuk mendefinisikan elemen saling kontak namun mengabaikan friksi, contohnya adalah plat *gusset* dengan badan balok. Sedangkan *frictional* untuk elemen yang saling kontak dan memperhitungkan friksi akibat dari *pre-tension* baut, contohnya adalah kepala baut dengan plat yang disambung. Untuk menentukan koefisien friksi dilakukan proses *trial-error* dan didapatkan nilai koefisien sebesar 0,2. Meshing yang digunakan pada model adalah *linear element* tipe *hexahedral* dengan bantuan *multizone* [11]. Jumlah *meshing* harus diatur dengan baik dan dilakukan *trial-error* supaya model tidak mengalami

*disvergence* saat proses analisis. Jumlah *nodes* pada *meshing* juga harus diatur tidak melebihi 200.000 supaya lebih efisien dalam proses *running*. Dimensi *meshing* yang digunakan adalah 50 mm untuk elemen solid tanpa lubang, 16 mm untuk elemen dengan solid lubang, dan 8 mm untuk baut. Hasil *meshing* dapat dilihat pada **Gambar 13**.

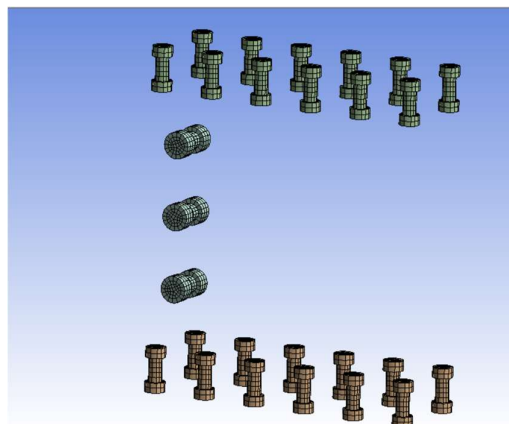
*Boundary condition* di kedua ujung kolom yang digunakan Yilmaz dkk [8] adalah jenis tumpuan sendi. Sehingga pergerakan arah lateral dan vertikal di kedua ujung kolom dibatasi namun rotasi tidak dibatasi dengan bantuan fitur *remote displacement*. Sedangkan *boundary condition* balok anak didefinisikan dengan membatasi pergerakan lateral balok induk. Pembebanan model menggunakan beban siklik seperti pada **Gambar 2** dan diaplikasikan di ujung balok seperti pada **Gambar 8**. Hasil penerapan atau pemberian beban dalam program ANSYS dapat dilihat pada **Gambar 14**. Kemudian baut diberikan *pre-tension* sebesar 70% dari tegangan tarik baut [8] untuk mendefinisikan tahanan friksi.



(a) meshing area solid = 50 mm

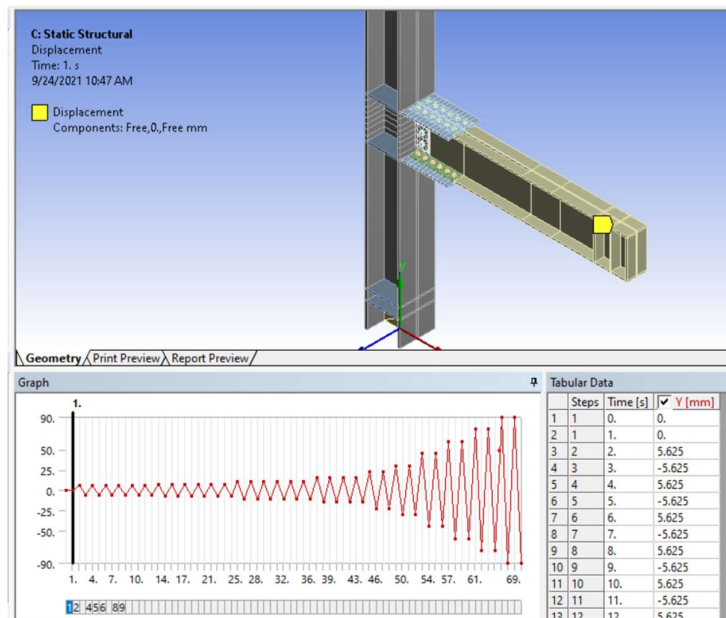


(b) meshing area lubang = 16 mm



(c) Meshing pada baut= 8 mm

**Gambar 13.** Meshing model BFP-01



**Gambar 14.** Beban siklik di ujung balok pada program ANSYS

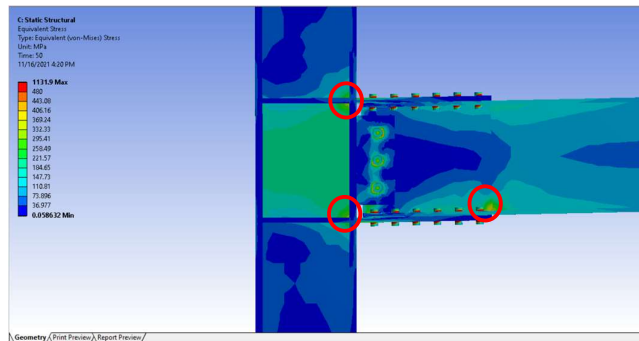
**3. Hasil dan Analisis**

Hasil yang dikeluarkan oleh program ANSYS adalah kontur tegangan *von-mises* dan kurva histerisis hubungan reaksi akibat beban dengan *displacement* yang terjadi di ujung balok. Kurva histerisis yang diperoleh akan diolah menjadi hubungan momen dengan rotasi di muka kolom.

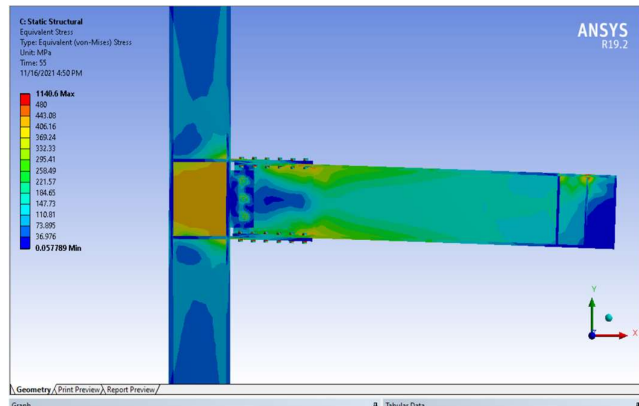
a. Distribusi tegangan model sambungan BFP-01

Distribusi tegangan saat pelepasan pertama dapat dilihat pada **Gambar 15**. Pelepasan pertama terjadi saat *step-50* dengan *displacement* balok sebesar 30,2 mm. Dapat dilihat bahwa pelepasan pertama yang terjadi terletak di tiga tempat yaitu sayap balok di ujung plat sambung, dan badan kolom di ujung *continuity plate* seperti yang ditunjukkan lingkaran merah pada **Gambar 15**. Besaran tegangan yang terjadi adalah 295,41 MPa.

Saat pembebanan memasuki *step-55* dengan *displacement* balok sebesar 44,6 mm, area *panel zone* menghasilkan tegangan yang relatif tinggi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 16**. Dapat dilihat bahwa *panel zone* memiliki ketebalan yang relatif tipis sehingga menghasilkan tegangan sebesar 443,08 MPa. Hal ini juga terjadi pada pengujian eksperimental yang dilakukan Yilmaz dkk seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5**.



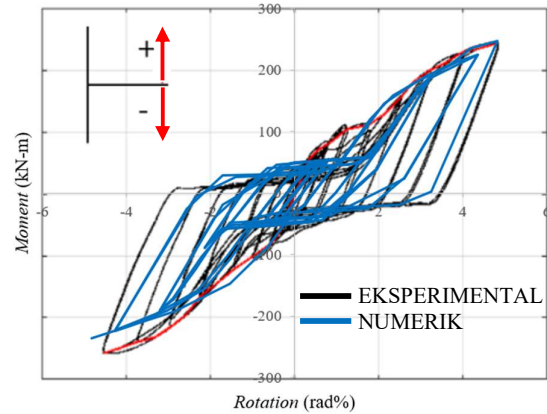
**Gambar 15.** Kontur tegangan saat pelepasan pertama



**Gambar 16.** Kontur tegangan saat *step-55*

b. Hasil kurva histerisis model numerik dengan eksperimental

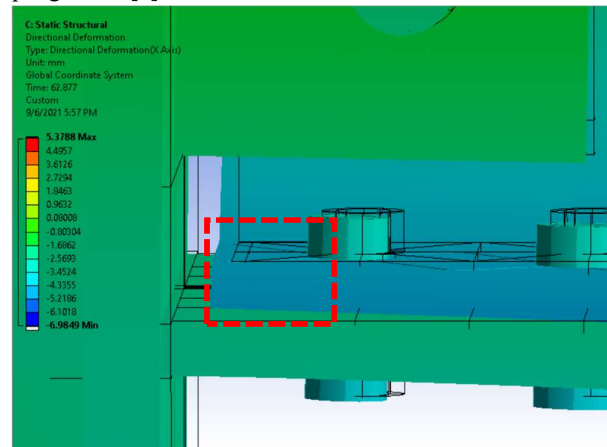
Perbandingan kurva histerisis model numerik dengan hasil eksperimental dapat dilihat pada **Gambar 17**.



**Gambar 17.** Kurva histerisis model BFP-01



(a) Pergeseran sayap balok akibat *slip* baut di akhir pengetesan [8].



(b) Pergeseran sayap balok akibat *slip* baut pada pemodelan ANSYS.

**Gambar 18.** Pergeseran sayap balok



Hasil model numerik, seperti yang ditunjukkan grafik warna biru pada **Gambar 17**, menunjukkan bahwa kapasitas momen di muka kolom mempunyai nilai konstan saat rotasi 1,08% hingga 1,63%. Hal ini dikarenakan terjadi fenomena *slip* pada baut. Sedangkan hasil dari eksperimental menunjukkan nilai momen konstan saat terjadi rotasi 1,00% hingga 1,85%. Akibat dari *slip* menyebabkan terjadinya pergeseran sayap balok, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 18**. Pergeseran sayap balok pada model numerik ditunjukkan pada kotak merah **Gambar 18(b)**.

Kapasitas momen dan rotasi yang dihasilkan oleh pemodelan numerik masing-masing sebesar 247,36 kN-m dan 4,83%. Kapasitas momen yang dihasilkan oleh pemodelan numerik memiliki selisih dengan hasil eksperimental sebesar 4,05% atau lebih kecil 10,04 kN-m daripada hasil eksperimental. Nilai momen yang dihasilkan relatif mendekati dengan hasil eksperimental.

#### 4. Simpulan

Analisis numerik dilakukan untuk memverifikasi hasil eksperimen berupa kapasitas momen, kapasitas rotasi, kondisi *panel zone*, dan melihat kontur tegangan yang terjadi. Secara numerik, model BFP-01 menghasilkan tegangan yang relatif besar pada *panel zone*. Hal ini dikarenakan tidak ada *doubler plate* atau ketebalan *panel zone* relatif tipis. Eksperimental yang dilakukan Yilmaz dkk [8] juga menunjukkan terjadinya pelelehan pada *panel zone* di akhir pengujian. Kapasitas momen dan rotasi yang dihasilkan oleh model numerik masing-masing sebesar 247,36 kN-m dan 4,83% dengan selisih antara model numerik dan eksperimental sebesar 4,05%.

#### Daftar Pustaka

- [1] S. A. Civjan dan M. D. Engelhardt, "Retrofit of Pre-Northridge Moment-Resisting Connections," *Journal of Structural Engineering*, vol. I, pp. 445-452, 2000.
- [2] M. Bruneau, C.-M. Uang dan R. Sabelli, "Ductile Design of Steel Structures", New York: McGraw-Hill, 2011.
- [3] FEMA, "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings," Federal Emergency Management Agency, Washington, 2002.
- [4] A. Sato, J. Newell dan C.-M. Uang, "Cyclic Testing of Bolted Flange Plate Steel Moment Connections For Special Moment Frames," *Structural System Research Project*, San Diego, 2007.
- [5] S. P. Schneider dan I. Teeraparbwong, "Inelastic Behavior of Bolted Flange Plate Connections," *Journal of Structural Engineering*, pp. 492-500, 2002.
- [6] A. R. Tamboli, *Handbook of Structural Steel Connection Design and Details*, New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- [7] AISC, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [8] O. Yilmaz, S. Bekiroglu, F. Alemdar, G. Arslan, B. Sevim dan Y. Ayvaz, "Experimental Investigation of Bolted Stiffened End-Plate and Bolted Flange-Plate Connections," *Latin American Journal of Solids and Structures*, pp. 1-12, 2019.
- [9] P. Krolo, D. Grandic dan Z. Smolic, "Experimental and Numerical Study of Mild Steel Behaviour under Cyclic Loading with Variable Strain Ranges," Hinda-wi Publishing Corporation, pp. 1-13, 2016.
- [10] A. S. Daryan dan 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.
- [11] ANSYS, ANSYS Meshing User's Guide, Canonsburg: ANSYS, Inc., 2020.

Halaman ini sengaja dikosongkan