



TESIS - RC185401

**STUDI ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN *EXTENDED*  
*END-PLATE* AKIBAT BEBAN SIKLIK MENGGUNAKAN  
METODE ELEMEN HINGGA**

YEHEZKIEL SEPTIAN YOGANATA  
NRP. 03111650020011

Dosen Pembimbing  
Budi Suswanto, S.T.,M.T.,Ph.D.

Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, Dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020



TESIS - RC185401

**STUDI ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN *EXTENDED  
END-PLATE* AKIBAT BEBAN SIKLIK MENGGUNAKAN  
METODE ELEMEN HINGGA**

YEHEZKIEL SEPTIAN YOGANATA  
NRP. 03111650020011

Dosen Pembimbing  
Budi Suswanto, S.T.,M.T.,Ph.D.

Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, Dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020



**TESIS - RC185401**

**ANALYSIS STUDY OF EXTENDED END-PLATE  
CONNECTION DUE TO CYCLIC LOAD USING FINITE  
ELEMENT METHOD**

**YEHEZKIEL SEPTIAN YOGANATA  
NRP. 03111650020011**

Supervisor  
Budi Suswanto, S.T.,M.T.,Ph.D.

Civil Engineering Department  
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (M.T.)**

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**YEHEZKIEL SEPTIAN YOGANATA**

**NRP. 03111650020011**

Tanggal Ujian : 22 Juni 2020

Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh :

**Pembimbing:**

1. Budi Suswanto, S.T.,M.T.,Ph.D.  
NIP. 19730128 199802 1 002



Penguji:

1. Data Iranata, S.T.,M.T.,Ph.D.  
NIP. 19800430 200501 1 002



2. Dr. Wahyuniarsih Sutrisno, S.T.,M.T.  
NIP. 1990201912076



*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

**Tesis** yang berjudul: “**Studi Analisis Perilaku Sambungan *Extended End-Plate* Akibat Beban Siklik Menggunakan Metode Elemen Hingga**” ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tuliskan untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tuliskan yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tuliskan orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka.

Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiasi di dalam naskah **tesis** ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2020



**Yehezkiel Septian Yoganata**

**NRP: 03111650020011**

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

# STUDI ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN *EXTENDED END-PLATE* AKIBAT BEBAN SIKLIK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Yehezkiel Septian Yoganata  
NRP : 03111650020011  
Pembimbing : Budi Suswanto, S.T.,M.T.,Ph.D.

## ABSTRAK

Pada struktur rangka baja, sambungan menjadi elemen yang sangat penting untuk diperhitungkan terutama untuk struktur tahan gempa. Pemilihan sambungan sangat berpengaruh terhadap kegagalan struktur pasca gempa. Pemilihan sambungan yang tepat digunakan untuk mendesain terjadinya sendi plastis pada daerah balok. Saat ini, penggunaan sambungan menggunakan *extended end-plate* telah menjadi populer karena kemudahannya dalam fabrikasi, ereksi, dan kinerja seismik yang tepat. Sambungan ini digunakan untuk menghubungkan balok ke kolom atau menyambungkan dua balok bersamaan.

Sebagai bahan studi akan dilakukan pemodelan sambungan balok – kolom baja menggunakan program bantu Abaqus 2017. Pada Tesis ini akan dilakukan percobaan pemodelan ulang terhadap model dari penelitian sebelumnya serta membuat pemodelan dengan sedikit modifikasi pada sambungan rangka baja menggunakan metode elemen hingga.

Dimensi yang digunakan pada balok ialah profil I – 360 x 170 x 12 x 8 dan kolom ialah profil I – 213 x 222 x 10 x 7 dengan ketebalan *end-plate* 15 mm dan menggunakan baut Grade 8.8. Variasi spesimen dibuat sebanyak 3 macam, yaitu PS-1 untuk verifikasi penelitian sebelumnya, dan dua lainnya merupakan sambungan modifikasi dengan nama spesimen PS-2 dan PS-3.

Hasil dari studi yang telah dilakukan bahwa *Extended End-Plate* mempengaruhi besarnya nilai *displacement* yang terjadi. Sambungan yang memakai *Extended End-Plate* akan menghasilkan *displacement* yang lebih kecil sehingga lebih mampu menahan beban yang dapat mengakibatkan keruntuhan. *Extended End-Plate* juga mempengaruhi besarnya beban lateral yang dapat dipikul. Sambungan yang menggunakan *Extended End-Plate* dapat memikul beban lateral yang lebih besar sehingga lebih stabil dan kuat dalam menahan beban yang bekerja. Dari ketiga spesimen yang dianalisa, specimen PS-1 mempunyai performa yang paling baik dalam kinerjanya dimana terdapat *extended end-plate* pada kedua sisinya.

**Kata kunci:** *end-plate*, *extended end-plate*, sambungan, metode elemen hingga.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# ANALYSIS STUDY OF EXTENDED END-PLATE CONNECTION DUE TO CYCLIC LOAD USING FINITE ELEMENT METHOD

Name : Yehezkiel Septian Yoganata  
Student Identity Number : 03111650020011  
Supervisor : Budi Suswanto, S.T.,M.T.,Ph.D.

## ABSTRACT

In steel frame structures, the connection becomes a very important element to design, especially for earthquake resistant structures. The determination of connection is very influential in the post-earthquake structural failure. Choosing the right connection is used to design the occurrence of plastic joints in the beam area. At present, the use of joints using extended end-plates has become popular because of their ease of fabrication, erection, and precise seismic performance. This connection is used to connect the beam to column or connect the two beams.

As a study material a steel beam-column joint modeling will be carried out using the Abaqus 2017 assist program. In this thesis, it will be done to remodel from previous research with a slight modification in the connection using finite element method.

The dimension of beam is I - 360 x 170 x 12 x 8 and the column is I - 213 x 222 x 10 x 7 with the thickness of end plate is 15 mm and using Grade 8.8 bolts. Were made 3 types variation, PS-1 for verification of previous research, and the other two were modified connections with specimen names are PS-2 and PS-3.

The result of the study is Extended End-Plate can affect the value of the displacement. Connection using Extended End-Plate has smaller displacements, so its better to withstand the loads that can cause the collapse. Extended End-Plate also affects the value of lateral load that can be borne. Connection using Extended End-Plate can withstand the greater lateral loads, so its more stable and stronger to holding the loads. From the three specimens analyzed, the PS-1 model has the best performance where there are extended end plates on both sides.

**Keywords:** end-plate, extended end-plate, connection, finite element method.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Segala pujian, hormat, dan syukur kepada Tuhan Yesus Kristus karena kebaikan dan kasih-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul **“Studi Analisis Perilaku Sambungan *Extended End-Plate* Akibat Beban Siklik Menggunakan Metode Elemen Hingga”** sebagai bentuk pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar magister (M.T). Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam menyelesaikan Tesis ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus atas segala kasih-Nya yang memberi berkat sehingga penulis dapat memulai studi magister, melewati proses studi di Indonesia dan menyelesaikan Tesis ini sebagai tanda penulis telah mencapai tahap akhir dari seluruh proses studi tahap magister ini.
2. Kedua orangtua yang tidak putus-putusnya memberikan dukungan moral dalam berbagai doa dan kata-kata motivasi juga dukungan materi.
3. Budi Suswanto, ST, MT, PhD. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan serta bimbingannya dalam proses penyusunan proposal Tesis ini.
4. Ir. Faimun M.Sc, Ph.D selaku dosen wali selama masa perkuliahan.
5. Dosen-Dosen bidang Struktur yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan mengenai struktur sehingga menunjang penyusunan proposal Tesis ini.
6. Kakak dan Adik, Anggy Yoga Hanggara dan Gabriel Odelio Yoga Immanuel serta Agnis Febiaswari dan Marcello Timothy Ganiswara yang selalu mendoakan dan memberi dukungan.
7. Teman-teman PPS Struktur angkatan 2016 yang memberi dukungan dalam proses perkuliahan selama studi magister dan pengerjaan Tesis ini.
8. Keluarga besar "Parman's Family" yang selalu memberi dukungan dan doanya untuk menyelesaikan Tesis ini.
9. Seluruh pihak yang turut membantu dalam penyelesaian Tesis ini.

Dalam penyelesaian Tesis ini, penulis menyadari bahwa Tesis yang penulis buat masih sangat jauh dari kesempurnaan. Jadi dengan rasa hormat mohon petunjuk, saran, dan kritik terhadap Tesis ini, sehingga kedepannya diharapkan ada perbaikan terhadap Tesis ini serta dapat menambah pengetahuan bagi penulis.

Surabaya, Juni 2020

( Penulis )

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan .....	5
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Manfaat.....	6
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1. Umum.....	7
2.2 Sambungan Struktur Baja.....	10
2.3. Bolted <i>Extended End-Plate</i> ( <i>BEEP</i> ) .....	11
2.4 Hubungan Sambungan Balok-Kolom .....	13
2.4.1 Desain Kapasitas .....	13
2.4.2 Daktilitas .....	14
2.4.3 Kekakuan .....	15
2.4.4 Pola Keruntuhan .....	15
2.4.5 <i>Drift Ratio</i> .....	16
2.5 Sambungan Baut Mutu Tinggi (HTB) .....	16
2.5.1 Perincian Baut Mutu Tinggi (HTB) .....	19
2.5.2 Beban Leleh dan Penarikan Baut .....	21
2.5.3 Teknik Pemasangan Baut Mutu Tinggi .....	21
2.6 Sambungan Las .....	24
2.7 Pemodelan Sambungan Balok-Kolom Baja .....	26
28 Metode Elemen Hingga .....	28

<b>BAB 3 METODOLOGI .....</b>	<b>29</b>
3.1. Umum .....	29
3.2. Bagan Alir Penyelesaian Tesis .....	29
3.3. Studi Literatur .....	30
3.4. Pemodelan 3D FEM Hasil Eksperimental (Doh,dkk 2019) .....	31
3.5. Pemodelan dan Analisa Struktur .....	32
3.5.1 Kontrol Desain .....	32
3.5.2 Balok .....	33
3.5.3 Kolom .....	35
3.6. Sambungan Baut .....	38
3.6.1 Kontrol Konsep <i>Strong Column Weak Beam</i> .....	40
3.6.2 Daerah Panel Pada Sambungan Balok-Kolom .....	41
3.6.3 Tebal Daerah Panel .....	42
3.7. Model-model Sambungan .....	43
3.8. Analisa Metode Elemen Hingga .....	45
3.9. Analisis Pemodelan Sambungan .....	52
3.10. Kesimpulan dari Hasil Penelitian .....	52
<b>BAB 4 PEMBAHASAN .....</b>	<b>53</b>
4.1. Data Pemodelan .....	53
4.2. Metode <i>Finite Element</i> .....	56
4.2.1 Pemodelan .....	56
4.2.2 Modul <i>Assembly</i> .....	62
4.2.3 Pembebanan .....	63
4.2.4 <i>Boundary Condition</i> .....	64
4.2.5 <i>Interaction</i> .....	66
4.2.6 <i>Mesh</i> .....	68
4.2.7 <i>Job</i> .....	69
4.3. Verifikasi Dengan Penelitian Sebelumnya .....	69
4.4. Hasil Pemodelan Sambungan Menggunakan Program Bantu Abaqus 2017 .....	72
4.4.1 Distribusi Tegangan Akibat Beban Siklik Pada Spesimen PS-1 .....	72
4.4.2 Distribusi Tegangan Akibat Beban Siklik Pada Spesimen PS-2 .....	75
4.4.3 Distribusi Tegangan Akibat Beban Siklik Pada Spesimen PS-3 .....	77

4.5	Daktilitas .....	79
4.6	<i>Envelope Curve</i> .....	79
4.7	Kekakuan Siklus (Kc) .....	81
4.8	Disipasi Energi .....	81
4.9	Metode Kegagalan / Pola Keruntuhan .....	87
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>		<b>91</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>xxi</b>



*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat-sifat Baut.....	19
Tabel 2.2	Dimensi Baut Mutu Tinggi .....	20
Tabel 2.3	Pratarik Minimum Baut (kN).....	22
Tabel 2.4	Torsi maksimum Baut Yang Dianjurkan .....	23
Tabel 2.5	Putaran Mur Dari Kondisi Kencang Tangan .....	23
Tabel 2.6	Ukuran Minimum Las Sudut .....	26
Tabel 2.7	Data Pemodelan Sambungan Tipe PS-1 .....	27
Tabel 3.1	Detail material Pemodelan Tipe PS-1 .....	32
Tabel 3.2	Jarak Tepi Minimum Dari Pusat Lubang Standar ke Tepi dari Bagian Yang Disambung.....	38
Tabel 3.3	Nilai Regangan Material .....	47
Tabel 3.4	Perhitungan Nilai <i>Pastic Strain</i> Material Baja .....	48
Tabel 3.5	Perhitungan Nilai <i>Plastic Strain</i> Material Baut.....	49
Tabel 4.1	Spesimen Pemodelan Abaqus .....	53
Tabel 4.2	Verifikasi Eksperimen dan Pemodelan PS-1 .....	70
Tabel 4.3	Faktor Daktilitas .....	79
Tabel 4.4	Nilai Kekakuan Rotasi .....	81
Tabel 4.5	Nilai Rasio Energi Disipasi .....	87

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Konfigurasi Sambungan .....	2
Gambar 2.1.	Perilaku Sambungan Momen-Rotasi.....	8
Gambar 2.2.	Kurva Momen-Rotasi (M- $\theta$ ) Tipikal Dari Sambungan Balok ke Kolom.....	8
Gambar 2.3	Perilaku Monotonik Momen-Rotasi.....	9
Gambar 2.4	Jenis Sambungan Sesuai Dengan Perilakunya, Di Mana $\Phi$ Adalah Rotasi Sudut Antara Balok Dan Kolom: (a) <i>pinned</i> ; (b) <i>rigid</i> ; dan (c) <i>semi-rigid</i> .....	10
Gambar 2.5	Jenis Rotasi Yang Terjadi Pada Sambungan .....	10
Gambar 2.6	Jenis Sambungan <i>Bolted End-Plate</i> .....	12
Gambar 2.7	Sambungan End-Plate Balok-Kolom : (a) <i>Header</i> ; (b) <i>Flush</i> ; (c) <i>Extended</i> .....	13
Gambar 2.8	Desain Struktur Mencegah Terjadinya Mekanisme Soft Story (A) Dengan Membuat Kolom Kuat Sehingga Drift Tersebar Pada Sebagian Besar Lantai (B) Atau Merata Sepanjang Lantai .....	14
Gambar 2.9	Tipe-tipe Sambungan .....	16
Gambar 2.10	Sambungan Tipe Tumpu .....	17
Gambar 2.11	Sambungan Tipe Friksi .....	17
Gambar 2.12	Detail Ukuran Baut .....	20
Gambar 2.13	Detail Ukuran Mur .....	20
Gambar 2.14	Hubungan Tipikal Untuk Beban dan Rotasi Mur Pada Baut A325 dan A490 .....	21
Gambar 2.15	Hubungan Tegangan dan Regangan Pada Baut.....	24
Gambar 2.16	Ukuran Las Sudut .....	25
Gambar 2.17	Detail Ukuran Profil dan Jarak Antar baut.....	27
Gambar 2.18	Grafik Load vs Displacement .....	28
Gambar 3.1.	Bagan Alir Penyelesaian Tesis .....	29
Gambar 3.2.	Detail Sambungan Tipe PS-1 .....	31
Gambar 3.3	Detail Sambungan Spesimen Tipe PS-2.....	43
Gambar 3.4	Detail Sambungan Spesimen Tipe PS-3.....	44
Gambar 3.5	Detail Ukuran Baut Grade 8.8 .....	44
Gambar 3.6	Detail Ukuran Mur Grade 8.8 .....	45
Gambar 3.7	Tampilan Awal Program Bantu Abaqus 2017 .....	45

Gambar 3.8	Hubungan Tegangan – Regangan Baja .....	46
Gambar 3.9	<i>Stress-Strain</i> Material Baja .....	48
Gambar 3.10	<i>Stress-Strain</i> Material Baut .....	49
Gambar 3.11	Pola Posisi Beban Aksial .....	50
Gambar 3.12	Beban Siklik Sesuai AISC .....	51
Gambar 4.1	Detail Sambungan Spesimen PS-1 .....	54
Gambar 4.2	Detail Sambungan Spesimen PS-2 .....	55
Gambar 4.3	Detail Sambungan Spesimen PS-3 .....	56
Gambar 4.4	Pemodelan Kolom Profil I, L=1900 mm .....	57
Gambar 4.5	Pemodelan Balok Profil I, L=1500 mm .....	57
Gambar 4.6	Pemodelan <i>End-Plate</i> , t=15 mm .....	58
Gambar 4.7	Pemodelan Baut, d=20 mm .....	58
Gambar 4.8	Input Nilai <i>Density</i> .....	59
Gambar 4.9	Input Material <i>Elastic</i> .....	60
Gambar 4.10	Input Material <i>Plactic</i> .....	61
Gambar 4.11	<i>Section Manager</i> .....	61
Gambar 4.12	Input <i>Property</i> Pada <i>Part</i> .....	62
Gambar 4.13	<i>Layout</i> Sambungan Hasil <i>Assembly</i> .....	62
Gambar 4.14	<i>Step</i> Pada Pemodelan Abaqus .....	63
Gambar 4.15	Beban Siklik Pada Pemodelan Abaqus .....	63
Gambar 4.16	Input Beban Pada Pemodelan Abaqus .....	64
Gambar 4.17	Proses <i>Boundary Condition</i> Pada Program Bantu Abaqus (BC-2)65	
Gambar 4.18	Proses <i>Boundary Condition</i> Pada Program Bantu Abaqus (BC-3)65	
Gambar 4.19	<i>Tie Constraint</i> Antara Balok dan <i>End-Plate</i> .....	66
Gambar 4.20	<i>Contact Property</i> Untuk Elemen Tersambung .....	67
Gambar 4.21	Modul <i>Interaction</i> Antara Baut Dengan Kolom dan <i>End-Plate</i> ...	68
Gambar 4.22	Proses Pada Modul <i>Mesh</i> Pada Program Abaqus .....	68
Gambar 4.23	<i>Job Manager</i> Pada Pemodelan Abaqus .....	69
Gambar 4.24	Grafik Momen – Rotasi Verifikasi .....	70
Gambar 4.25	Perbandingan S-Mises Antara Eksperimen dengan PS-1 .....	71
Gambar 4.26	Perbandingan Detail Sambungan Antara Eksperimen dengan PS-1 .....	71
Gambar 4.27	Mode Kegagalan Verifikasi PS-1 .....	72

Gambar 4.28	Hasil S-Mises Step 88 Pada Spesimen PS-1 .....	73
Gambar 4.29	Hasil S-Mises Step 88 Pada Pendetailan PS-1 .....	73
Gambar 4.30	Hasil S-Mises Step 460 Pada Spesimen PS-1 .....	74
Gambar 4.31	Hasil S-Mises Step 460 Pada Pendetailan PS-1 .....	74
Gambar 4.32	Hasil S-Mises Step 130 Pada Spesimen PS-2 .....	75
Gambar 4.33	Hasil S-Mises Step 130 Pada Pendetailan PS-2 .....	75
Gambar 4.34	Hasil S-Mises Step 555 Pada Spesimen PS-2 .....	76
Gambar 4.35	Hasil S-Mises Step 555 Pada Pendetailan PS-2 .....	76
Gambar 4.36	Hasil S-Mises Step 186 Pada Spesimen PS-3 .....	77
Gambar 4.37	Hasil S-Mises Step 186 Pada Pendetailan PS-3 .....	77
Gambar 4.38	Hasil S-Mises Step 684 Pada Spesimen PS-3 .....	78
Gambar 4.39	Hasil S-Mises Step 684 Pada Pendetailan PS-3 .....	78
Gambar 4.40	<i>Envelope Curve</i> .....	80
Gambar 4.41	Grafik <i>Hysteretic Energy</i> Pemodelan PS-1 .....	82
Gambar 4.42	Grafik <i>Hysteretic Energy</i> Pemodelan PS-2 .....	83
Gambar 4.43	Grafik <i>Hysteretic Energy</i> Pemodelan PS-3 .....	84
Gambar 4.44	Grafik Momen-Rotasi Pemodelan PS-1 .....	85
Gambar 4.45	Grafik Momen-Rotasi Pemodelan PS-2 .....	85
Gambar 4.46	Grafik Momen-Rotasi Pemodelan PS-3 .....	86
Gambar 4.47	Pola Kegagalan Variasi PS-1.....	87
Gambar 4.48	Pola Kegagalan Variasi PS-2.....	88
Gambar 4.49	Pola Kegagalan Variasi PS-3.....	88

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pembangunan infrastruktur di Indonesia harus didesain sebagai bangunan tahan gempa karena posisi wilayahnya yang rawan terhadap gempa. Apabila terjadi suatu gempa, maka struktur di atasnya akan mengalami pergerakan secara vertikal maupun secara lateral. Menurut Mc. Cormak (2002), hal yang perlu diperhatikan adalah kekuatan bangunan yang memadai untuk memberikan kenyamanan bagi penghuninya terutama lantai atas. Semakin tinggi bangunan, defleksi lateral yang terjadi juga semakin besar pada lantai atas. Pergerakan lateral akan memberikan beban lateral kepada struktur yang dapat menyebabkan struktur runtuh. Oleh karena itu untuk mencegah terjadinya kegagalan struktur maka perlu adanya perencanaan bangunan struktur yang dapat memperhitungkan dampak dari gaya lateral yang bersifat siklik (bolak-balik) yang dialami oleh struktur selama terjadinya gempa bumi.

Bangunan yang dikatakan tahan gempa adalah bangunan yang merespon gempa dengan sifat daktilitas yang mampu bertahan dari keruntuhan dan fleksibilitas yang cukup dalam meredam getaran gempa (Hoedajanto,2005). Faktor kekakuan dan stabilitas struktur menjadi paling dominan dalam desain bangunan tinggi. Apabila kekakuan struktur berkurang, maka simpangan yang terjadi akan membesar begitu juga sebaliknya.

Secara umum baja yang mengalami gaya tarik akan tertarik hingga hancur sampai batas beban tertentu. Kehancuran dapat terjadi pada pada profil atau pada alat sambung, tergantung dari mutu bahan dan dimensi yang digunakan. Pelat bertampang dua yang disambung menggunakan alat sambung yang memiliki mutu dan ukuran yang lebih kecil dari mutu dan dimensi fisik pelat, dapat diperkirakan akan terjadi kehancuran pada alat sambungnya. (Silviana, 2017)

Banyak terjadi bencana seismik di AS dan negara-negara lain membuat peneliti melakukan beberapa penelitian dengan menggunakan sambungan baut yang fleksibel, yang memberikan kekuatan, daktilitas, dan kekakuan yang



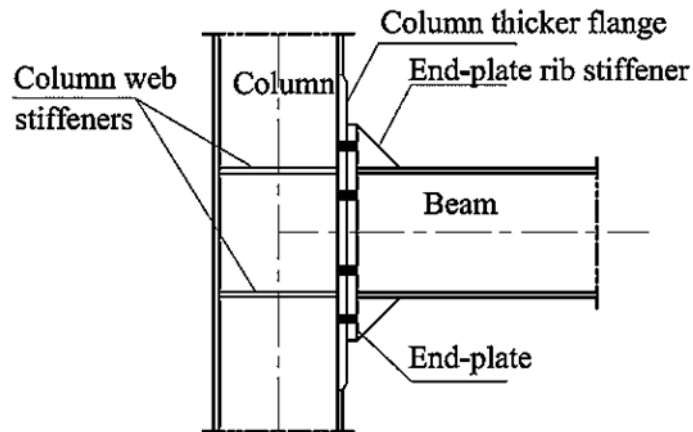
dibutuhkan untuk meningkatkan keamanan bangunan struktur baja. Penggunaan pertama sambungan baut fleksibel di Amerika Serikat yang mengembangkan model analisis elemen hingga tiga dimensi untuk menganalisis efek dari ketebalan pelat kepala pada sambungan yang dibaut baja tanpa menggunakan tongkat pelat kepala, lalu dilanjutkan menggunakan studi eksperimental dan FEM untuk menganalisis perilaku koneksi baut dengan silinder plat di bawah beban monotonik hanya untuk mendapatkan hubungan yang dapat diterima antara metode ini. Lalu ada pula yang mempresentasikan perilaku jenis sambungan ini di bawah beban siklik. Disimpulkan bahwa hasil monotonik untuk koneksi ini perlu ditinjau di zona seismik. (Elsabbagh, dkk. 2019)

Ketika sambungan kekuatan parsial digunakan dalam rangka baja penahan momen (MRF), mungkin ada pergeseran lokasi engsel plastik dari balok atau kolom ke sambungan. Ketika pergeseran ini terjadi, sangat penting untuk mempertimbangkan karakteristik sambungan balok-ke-kolom. Penggunaan sambungan kekuatan parsial (*partial-strength*) adalah solusi umum dan relatif murah untuk diterapkan dalam MRF, dibandingkan dengan jenis sambungan *full-strength*. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa, jika cukup rinci, sambungan ini juga dapat menjadi alternatif yang menarik untuk struktur yang terletak di daerah seismik, memungkinkan kontrol yang tepat dan respon dari elemen disipatif. (Augusto, 2017)

Saat ini, penggunaan sambungan penahan momen ujung-pelat memanjang/*end plate (Bolt Extended End-Plate / BEEP)* telah menjadi populer karena kemudahannya dalam fabrikasi, ereksi, dan kinerja seismik yang tepat. Sambungan ini untuk menghubungkan balok ke kolom atau menyambungkan dua balok bersamaan. Sambungan BEEP termasuk dalam ANSI 2010 / AISC 358, dan hasil tes seismik menunjukkan BEEP mampu memberikan keuletan dan ketahanan seismik yang cukup besar. (Haghollahi dan Jannesar, 2018)

Sambungan ujung-pelat memanjang (BEEP) digunakan secara luas dalam struktur baja sebagai sambungan penahan momen dan sebagai alternatif untuk sambungan yang sepenuhnya dilas dan digunakan dalam rangka baja. Sambungan ini terdiri dari ujung-pelat yang dilas ke ujung balok dan bidang yang dibaut ke sambungan kolom seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.1. Perilaku

sambungan *end-plate* secara signifikan mempengaruhi kekuatan internal dan deformasi keseluruhan struktur. Sambungan ujung-pelat umumnya diklasifikasikan sebagai sambungan semi-kaku, karena konsep sempurna kaku adalah sudut pandang teori murni. (Ismail, dkk. 2015)



Gambar 1.1 Konfigurasi Sambungan

Selanjutnya, jenis dan detail sambungan mempunyai banyak parameter, itu harus dipertanggungjawabkan secara kolektif untuk mengkarakterisasi perilaku sendi. Parameter tersebut termasuk apakah pelat ujung rata atau memanjang, baik pelat ujung memanjang melampaui satu atau kedua *flens* balok, diameter dan tingkat baut, jumlah baris baut, jarak vertikal dan horisontal baut, tebal pelat ujung, pengerasan baja dan koefisien gesekan atau kontak pada permukaan. Karena parameter yang cukup kompleks, hampir tidak mungkin untuk mempelajari perilaku ini secara komprehensif kecuali dengan tes fisik atau studi eksperimental. (Bahaz, dkk. 2018)

Namun, karena jumlah tes yang terbatas, simulasi numerik perlu digunakan saat ini. Model elemen hingga yang lebih akurat untuk analisis parametrik sangat penting. Studi pertama tentang perilaku sambungan menggunakan FEM telah dilakukan oleh Bose, dkk., yang terkait dengan sambungan balok ke kolom yang dilas, termasuk pula plastisitas, pengerasan regangan, dan tekuk. Maggi, dkk. melakukan analisis parametrik pada perilaku sambungan ujung-pelat yang diperpanjang menggunakan model 3D. Dai, dkk. membuat studi simulasi dari

sepuluh (10) tes kebakaran pada rangka balok-kolom baja tertahan menggunakan lima jenis sambungan: pelat sirip, pelat ujung fleksibel, pelat ujung rata, pelat akhir web, *cleat web* dan ujung diperpanjang.

Oleh karena beberapa hal di atas, studi lebih detail mengenai variable-variabel yang mempengaruhi kapasitas *end-plate* dibutuhkan untuk mendesain sambungan balok-kolom baja menggunakan *end-plate* yang diperpanjang. Untuk lebih detail mendapatkan gambaran perilaku BEEP maka analisa dengan menggunakan metode elemen hingga akan dilakukan. Hubungan tegangan-regangan dari tiap material, displacement terhadap beban yang terjadi, serta rotasi yang terjadi akibat momen akan didetailkan dalam studi ini. Sehingga didapatkan perilaku menyeluruh mengenai hal tersebut.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang ada maka dapat dirumuskan permasalahannya adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana pemodelan sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*) pada program numerik Abaqus 2017 ?
- b. Bagaimana mengetahui pembebanan yang terjadi pada pemodelan sambungan antara balok dengan kolom baja menggunakan software Abaqus 2017 ?
- c. Bagaimana perilaku sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*) dilihat dari distribusi tegangan, regangan, dan deformasi yang ada?
- d. Bagaimana kesimpulan dari hubungan momen vs rotasi yang menjadi output dari analisis numerik pemodelan sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*) jika diverifikasi dengan literatur yang ada?
- e. Bagaimana pengaruh *Extended End-Plate* pada pemodelan lanjutan yang dilakukan?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari penulisan studi ini adalah sebagai berikut :

- a. Mengetahui pemodelan sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*) pada program numerik Abaqus 2017.

- b. Mengetahui pembebanan yang terjadi pada pemodelan sambungan antara balok dengan kolom baja menggunakan software Abaqus 2017.
- c. Menganalisa perilaku sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*) dilihat dari distribusi tegangan, regangan, dan deformasi yang ada.
- d. Menganalisa hasil / *output* dari analisis numerik pemodelan sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*) jika diverifikasi dengan literatur yang ada.
- e. Menganalisa pengaruh *Extended End-Plate* pada pemodelan lanjutan yang dilakukan

#### **1.4 Batasan Masalah**

Untuk mencapai tujuan pembahasan, maka perlu adanya penentuan pokok bahasan masalah, identifikasi permasalahan akan diperjelas dengan batasan – batasan sebagai berikut :

- a. Hanya dilakukan pemodelan pada bagian sambungan balok – kolom baja dengan bantuan software Finite Element yaitu Abaqus 2017.
- b. Jenis sambungan yang digunakan ialah semi rigid menggunakan pelat ujung memanjang / BEEP (*Bolt Extended End-Plate*).
- c. Profil yang digunakan untuk balok ialah IPE-330 dan untuk kolom baja yaitu menggunakan profil HEA-220 .
- d. Jenis sambungan menggunakan sambungan baut mutu tinggi (HTB).
- e. Data hasil pemodelan sebelumnya didapat dari hasil literatur yang ada dan terbatas pada pengujian *end-plate*.
- f. Tidak melakukan penelitian secara eksperimental.
- g. Tidak memperhitungkan metode pelaksanaan dan harga bahan/material.

#### **1.5 Manfaat**

Adapun manfaat dari penulisan studi ini adalah sebagai berikut :

- a. Menambah wawasan dan menerapkan teori yang telah diperoleh semasa kuliah.
- b. Sebagai bahan masukan dan pertimbangan di dunia teknik sipil dalam penggunaan sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*) pada struktur bangunan rangka baja.

c. Sebagai bahan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya mengenai penggunaan sambungan BEEP (*Bolt Extended End-Plate*).

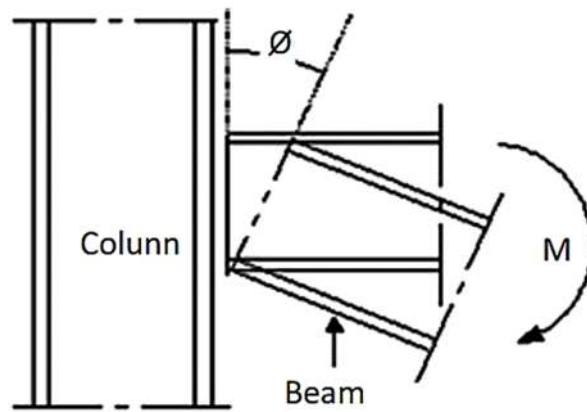
## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Umum**

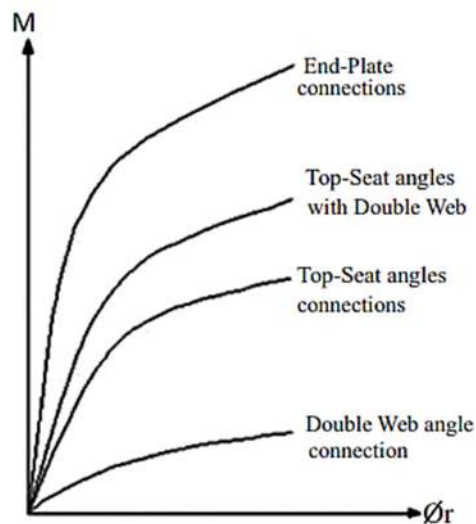
Sambungan balok-kolom menggunakan baut dapat dipasang dengan cepat di tempat. Sambungan ini memiliki kapasitas rotasi plastik yang baik dan keuletan yang sangat baik dan dapat menghilangkan energi seismik melalui *slip* dan deformasi plastis yang terjadi di daerah sambungan, yang mengurangi kerusakan struktur akibat gempa bumi. Astaneh-Asl, 1997 menyarankan bahwa sambungan balok baut dengan kekuatan tinggi harus dirancang semi rigid dan dibiarkan *slip* di bawah beban seismik yang tinggi, sehingga menghilangkan energi seismik melalui *slip* pada permukaan gesekan dan kompresi antara baut dan dinding lubang baut. Ada dua jenis sambungan baut yaitu sambungan kaku dan sambungan variabel kekakuan (*stiffness*). Perhitungan dan analisis untuk sambungan kaku sederhana, dan mereka digunakan secara luas. Namun, sambungan yang kaku membutuhkan sejumlah besar baut. Sebagai perbandingan, sambungan variabel kekakuan memiliki kapasitas disipasi energi yang lebih tinggi dan hanya membutuhkan sejumlah kecil baut dan dengan demikian lebih ekonomis. (Liu, dkk. 2017)

Menurut AISC / LRFD, efek dari fleksibilitas sambungan harus diperhitungkan dalam prosedur analisis dan desain. Sambungan balok-kolom umumnya mengalami gaya aksial, gaya geser, momen lentur, dan torsi. Namun, untuk tujuan praktis saja, efek momen lentur dipertimbangkan, karena torsi dapat dikecualikan dalam bidang studi, dan efek gaya aksial biasanya lebih kecil dibandingkan dengan efek momen lentur. (Fakih, dkk. 2018)



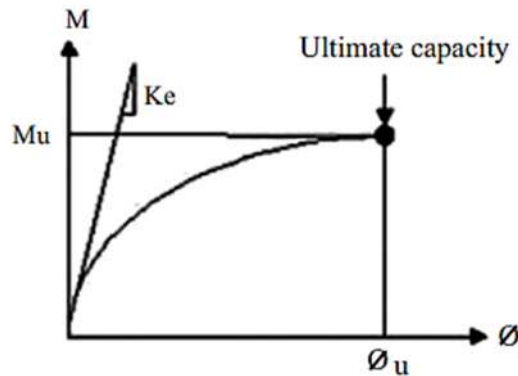
Gambar 2.1 Perilaku Sambungan Momen - Rotasi

Gambar 2.1 menunjukkan rotasi relatif dari sambungan ketika penerapan suatu momen  $M$ . Sudut  $\theta_r$  sesuai dengan rotasi relatif antara balok dan kolom. Distorsi rotasi sambungan mempengaruhi kekakuan teras, menyebabkan redistribusi momen antara kolom dan balok. Studi telah menunjukkan bahwa ketika suatu momen diterapkan pada sambungan yang fleksibel, hubungan antara momen ini dan rotasi relatif adalah non-linear.



Gambar 2.2 Kurva Momen-Rotasi ( $M-\theta_r$ ) Tipikal Dari Sambungan Balok-ke-Kolom

Gambar 2.2 menunjukkan sekelompok kurva rotasi-momen tipikal untuk berbagai jenis sambungan. Perhatikan perbedaan perilaku non-linear dari sambungan yang ditampilkan. Secara umum, fleksibilitas sambungan tergantung pada parameter geometri elemen yang digunakan dalam sambungan seperti diameter baut yang digunakan dan dimensi sudut sambungan. Sambungan semi-kaku biasanya sangat ulet jika tidak ada cacat selama pembuatan.



Gambar 2.3 Perilaku Monotonik Momen-Rotasi

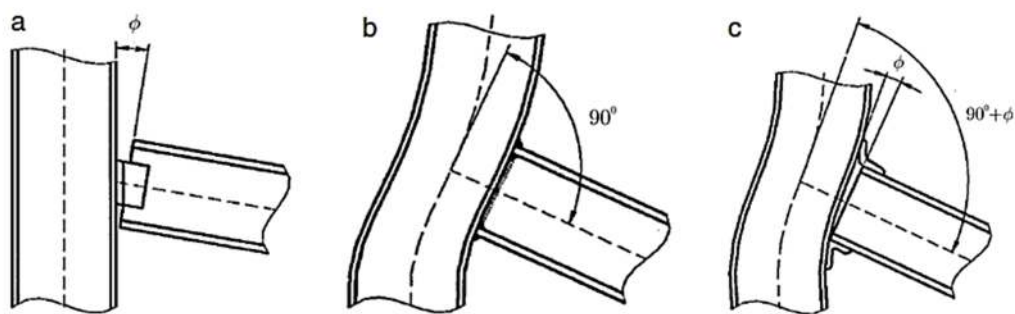
Gambar 2.3 menunjukkan kurva rotasi momen untuk sambungan yang mengalami pembebanan monotonik (statis). Seperti dapat dilihat pada gambar, parameter utama yang menentukan kurva rotasi momen adalah kekakuan awal sambungan,  $K_e$ , kapasitas pembawa momen ultimate,  $M_u$ , dan rotasi ultimate,  $\theta_u$ . Dalam penelitian ini, upaya modifikasi direkomendasikan untuk memprediksi kapasitas sambungan dengan lebih baik. (Chin, 2018)

Sambungan baut dan pelat ujung yang dilas umumnya digunakan dalam struktur baja. Menurut kekakuannya dapat dirancang secara nominal yaitu *pinned* (sambungan kedalaman parsial), semi-kaku (sambungan kedalaman penuh) atau kaku (sambungan dengan *haunch*) dan menurut resistensi sebagai kekuatan parsial atau penuh. Sambungan ini telah dipelajari dengan pengembangan struktur baja. Solusi terakhir didasarkan pada model T-stub. Pada sambungan pelat ujung yang dibaut, dimodelkan baut dengan tegangan dan pelat ujung / *flange* dalam lentur sebagai T-stubs. Panjang ekuivalen dihitung untuk memasukkan kondisi batas pelat / *flange*. (Godrich, dkk. 2019)



## 2.2 Sambungan Struktur Baja

Rangka portal baja secara tradisional dirancang dengan asumsi bahwa sambungan balok-ke-kolom idealnya *pinned* atau sepenuhnya kaku (*fully rigid*). Penggunaan kondisi yang *disematkan* secara ideal menyiratkan bahwa tidak ada momen yang dapat ditransmisikan antara balok dan kolom; ini berarti bahwa sambungan tidak memiliki kekakuan rotasi dan tidak dapat mentransmisikan momen meskipun mereka mentransmisikan gaya aksial dan geser ke anggota terpasang (Gambar 2.4-a).

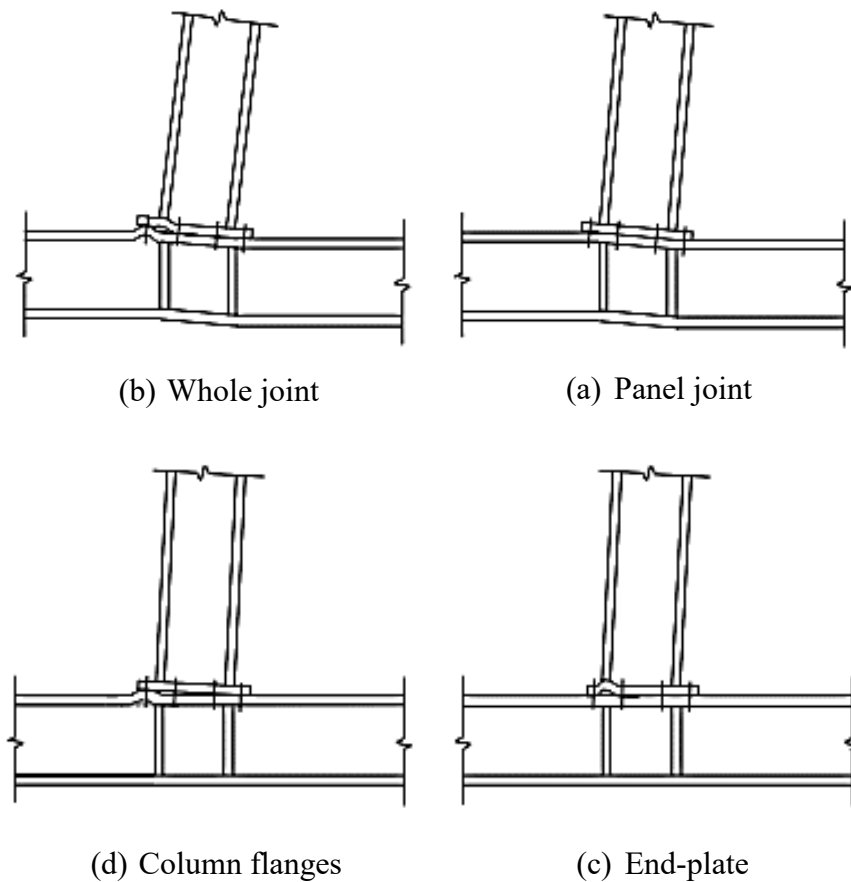


Gambar 2.4 Jenis Sambungan Sesuai Dengan Perilakunya, Di Mana  $\Phi$  Adalah Rotasi Sudut Antara Balok Dan Kolom: (a) *pinned*; (b) *rigid*; dan (c) *semi-rigid*. (Diaz,2011)

Di sisi lain, sambungan yang sepenuhnya kaku memiliki kompatibilitas rotasi dan karenanya mentransmisikan semua bentuk beban antara balok dan kolom (Gambar 2.4-b). Aspek penting dari analisis sambungan ini adalah bahwa perilakunya dipisahkan dari analisis struktur. Meskipun ini menyederhanakan proses analisis dan desain struktural; tetapi dengan sambungan ini kita tidak bisa memperoleh pemahaman rinci tentang perilaku persendian. Namun pada kenyataannya, sambungan memiliki kekakuan yang terbatas dan karenanya bersifat semi-kaku (Gambar 2.4-c). (Diaz, 2011)

Pada abad terakhir, metode analisis sambungan semi-kaku berkembang pesat untuk mendapatkan respons struktural yang sebenarnya. Dimulai pada tahun 1930-an dengan persamaan *slope-deflection* dan metode distribusi momen, tahun 1960-an dengan metode kekakuan matriks, dan saat ini, dengan metode analisis iteratif yang kompleks yang menggabungkan analisis struktural dengan analisis sambungan.

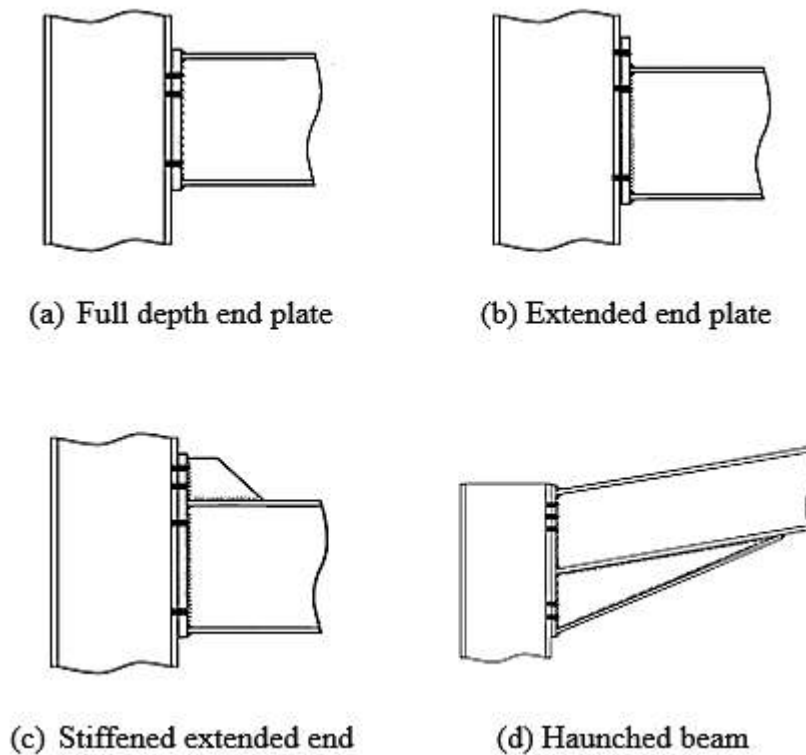
Sambungan sederhana dari balok, gelagar dan rangka batang harus didesain sebagai sambungan fleksibel yang diizinkan dimensinya ditentukan hanya untuk menerima reaksi geser, kecuali dinyatakan lain dalam dokumen desain. Sambungan balok yang fleksibel harus mengakomodasi rotasi ujung dari balok sederhana. Beberapa deformasi inelastis tetapi yang dibatasi-sendiri dalam sambungan diizinkan untuk mengakomodasi rotasi ujung dari balok sederhana. (SNI 1729. 2015)



Gambar 2.5 Jenis Rotasi Yang Terjadi Pada Sambungan (Zhao, 2019)

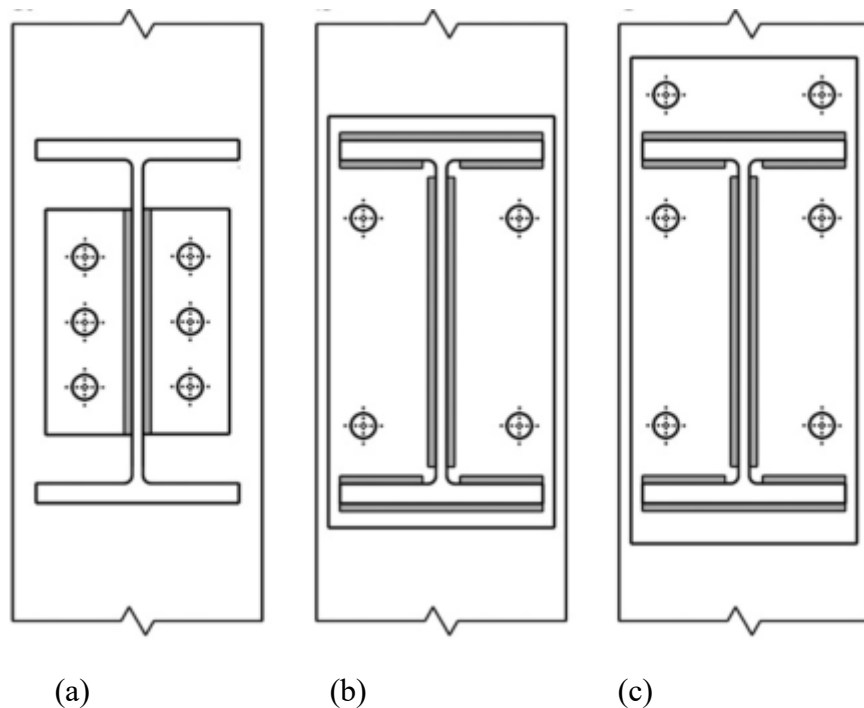
### 2.3 Bolted Extended End-Plate (BEEP)

Sambungan ujung-pelat adalah sambungan baut dengan menggunakan kekakuan variabel. Berdasarkan definisi spesifik rotasi untuk sambungan pelat-ujung yang dibaut, sambungan pelat-ujung didekomposisi menjadi beberapa komponen, termasuk zona panel, baut, *end-plate* dan *flens* kolom.



Gambar 2.6 Jenis Sambungan *Bolted End-Plate*

Sambungan ujung-pelat menjadi lebih populer dalam konstruksi bangunan baja karena ekonomis, kesederhanaan fabrikasi, dan kinerja struktural yang baik. Sambungan *end-plate* dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipologi (Gambar 2.6): *header*, *flush* dan sambungan *end-plate* yang diperluas. Jika panjang pelat ujung kurang dari kedalaman balok, itu disebut pelat ujung tajak (Gambar 2.6-a); jika kira-kira sama tingginya dengan kedalaman balok, itu disebut pelat ujung ombak (Gambar 2.6-b); dan jika tingginya secara signifikan lebih besar dari ketinggian balok menggunakan ruang di atas dan / atau di bawah balok untuk baris tambahan baut, itu disebut pelat ujung yang diperluas (Gambar 2.6-c). *Header* dan *flush* lebih jarang digunakan daripada sambungan ujung-pelat yang diperluas karena kekuatan dan kekakuannya lebih rendah.



Gambar 2.7 Sambungan *End-Plate* Balok-Kolom : (a) *Header*; (b) *Flush*; (c) *Extended*

Dalam literatur, sambungan *end-plate* telah diwakili dengan tipologi yang berbeda (*header*, *flush* dan *extended*), jumlah baut di daerah tegangan *flens* (2, 4, dan 8) dan pengaku menggunakan semua jenis *Finite Element*, dimana lima pengamatan bisa dilakukan.

1. Yang paling banyak dipelajari adalah sambungan pelat ujung ganda
2. Sebagian besar model menggunakan 4 baut dan tidak ada pengaku;
3. Kolom hanya dimasukkan ke dalam model dalam 5 tahun terakhir;
4. *3D Finite Element* sebagian besar digunakan untuk baut, meskipun elemen rangka, balok dan tegangan telah digunakan;
5. *Nut* lebih jarang dimodelkan, tetapi dalam studi *3D Finite Element* digunakan.

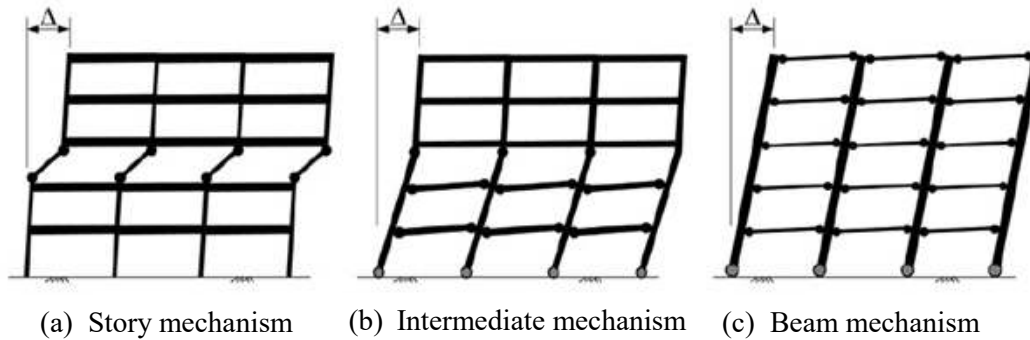
## 2.4 Hubungan Sambungan Balok-Kolom

### 2.4.1 Desain Kapasitas

Perencanaan struktur di daerah gempa menggunakan konsep desain kapasitas yang berarti bahwa ragam keruntuhan struktur akibat beban gempa yang

besar ditentukan lebih dahulu dengan elemen-elemen kritisnya dipilih sedemikian rupa agar mekanisme keruntuhan struktur dapat memencarkan energi yang sebesar-besarnya. Konsep desain kapasitas dipakai untuk merencanakan kolom-kolom pada struktur agar lebih kuat dibanding dengan elemen-elemen balok (*Strong Coloumn Weak Beam*).

Pada saat struktur mengalami gaya lateral gempa, distribusi kerusakan sepanjang ketinggian bangunan bergantung pada distribusi lateral *story drift* (simpangan antar lantai). Jika struktur memiliki kolom yang lemah, simpangan antar lantai akan cenderung terpusat pada satu lantai (gambar a). Sebaliknya jika kolom sangat kuat, maka *drift* akan tersebar merata, dan keruntuhan lokal di satu lantai dapat diminimalkan (gambar c dan b).



Gambar 2.8 Desain Struktur Mencegah Terjadinya Mekanisme Soft Story (A) Dengan Membuat Kolom Kuat Sehingga Drift Tersebar Pada Sebagian Besar Lantai (B) Atau Merata Sepanjang Lantai

#### 2.4.2 Daktilitas

Faktor daktilitas struktur gedung ( $\mu$ ) adalah rasio antara simpangan ultimit dan simpangan pada saat terjadi leleh pertama. Sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut (SNI-1726-2002):

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2.1)$$

dimana

- $\mu$  : Daktilitas
- $\Delta_u$  : Perpindahan dari 80% maksimum struktur
- $\Delta_y$  : Perpindahan pada saat leleh pertama

### 2.4.3 Kekakuan

Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk menghasilkan suatu lendutan. Kekakuan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini :

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (2.2)$$

dimana

$k$  : Kekakuan ( kN/mm)

$P$  : Gaya (kN)

$\Delta$  : Perpindahan (mm)

### 2.4.4 Pola Keruntuhan

Meskipun keruntuhan struktur baja pada umumnya merupakan keruntuhan daktail, namun dalam bermacam variasi kondisi, keruntuhan baja dapat merupakan keruntuhan getas dan keruntuhan lelah (Setiawan, 2008) :

1. Keruntuhan getas adalah merupakan suatu keruntuhan yang terjadi secara tiba-tiba tanpa didahului deformasi plastis, terjadi dengan kecepatan yang sangat tinggi. Keruntuhan ini dipengaruhi oleh temperatur, kecepatan pembebanan, tingkat tegangan, tebal pelat, dan system pengerjaan.
2. Keruntuhan lelah (fatigue failure) adalah keruntuhan yang disebabkan oleh pembebanan yang bersifat siklik. Keruntuhan lelah dipengaruhi oleh jumlah siklus pembebanan, perbedaan antara tegangan maksimum dan minimum, serta cacat-cacat dalam material seperti retak – retak kecil. Proses pengelasan cacat dapat diartikan sebagai takikan pada pertemuan antara dua elemen yang disambung. Lubang baut yang mengakibatkan dikontinuitas pada elemen juga dapat diartikan sebagai cacat elemen tersebut. Cacat – cacat kecil dalam suatu elemen dapat diabaikan dalam suatu proses desain struktur, namun pada struktur yang mengalami beban – beban siklik, maka retakan akan makin bertambah panjang untuk tiap siklus pembebanan sehingga akan mengurangi kapasitas elemen untuk memikul beban. Mutu baja tidak terlalu mempengaruhi keruntuhan lelah ini.

#### 2.4.5 Drift Ratio

Drift ratio merupakan perbandingan antara defleksi lateral yang terjadi akibat beban lateral dan ketinggian beban lateral. Drift ratio dinyatakan dalam persen dan dapat dihitung dengan persamaan :

$$Drift\ ratio = \frac{\Delta}{L} (\%) \quad (2.3)$$

dimana

$\Delta$  : Defleksi yang terjadi akibat beban lateral

$L$  : Ketinggian beban lateral

#### 2.5 Sambungan Baut Mutu Tinggi (HTB)

Elemen-elemen yang menyusun struktur baja harus digabungkan menjadi satu dengan yang lain dengan suatu sistem sambungan. Baut berfungsi untuk menyatukan elemen-elemen dan menyalurkan beban dari satu bagian ke bagian yang lain. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi sistem sambungan struktur baja, yaitu elemen yang disambung, jenis penyambung, dan pelat penyambung. Jenis penyambung terdiri dari sambungan las, baut, dan paku keling.



(a) Las

(b) Baut

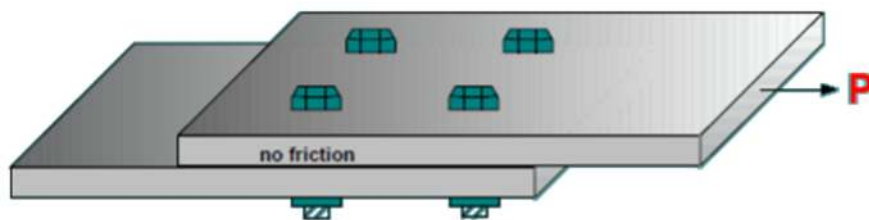
(c) Paku keling

Gambar 2.9 Tipe Alat Sambung

Sambungan baut mutu tinggi mengandalkan gaya tarik awal yang terjadi karena pengencangan awal. Gaya tersebut dinamakan proof load. Gaya tersebut akan memberikan friksi, sehingga sambungan baut mutu tinggi hingga taraf gaya tertentu dapat merupakan tipe friksi. Sambungan jenis ini baik untuk gaya bolak-balik. Untuk taraf gaya yang lebih tinggi dari tipe friksi, sambungan tersebut

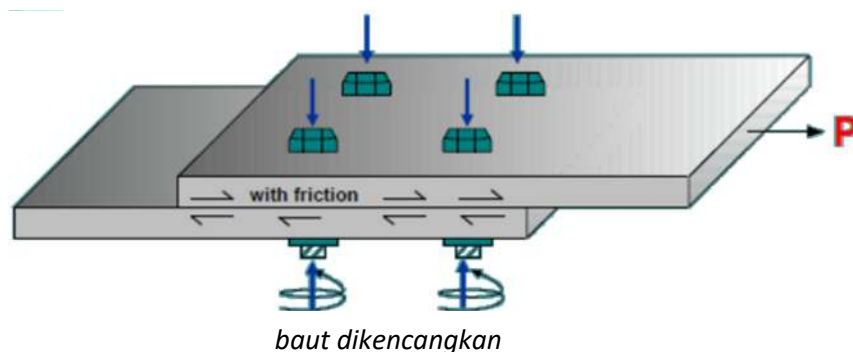
merupakan tipe tumpu. Baut mutu tinggi dipasang dengan mula-mula melakukan kencang tangan dan diikuti dengan setengah putaran setelah kencang tangan. Atau menggunakan kunci torsi yang telah dikalibrasi sehingga menghasilkan setengah putaran setelah kencang tangan. Diameter yang paling sering digunakan pada konstruksi gedung adalah  $\frac{3}{4}$  inci dan  $\frac{7}{8}$  inci. Saat ini sambungan baut lebih ekonomis daripada sambungan keling.

Dilihat dari mekanisme sambungan baut pada struktur baja, maka dibedakan menjadi dua, yaitu tipe tumpu dan tipe friksi. Sambungan tipe tumpu adalah sambungan yang dibuat dengan menggunakan baut yang dikencangkan dengan tangan, atau baut mutu tinggi yang dikencangkan untuk menimbulkan gaya tarik minimum yang disyaratkan, yang kuat rencananya disalurkan oleh gaya geser pada baut dan tumpuan pada bagian-bagian yang disambungkan.



Gambar 2.10 Sambungan Tipe Tumpu

Sedangkan sambungan tipe friksi adalah sambungan yang dibuat dengan menggunakan baut mutu tinggi yang dikencangkan untuk menimbulkan tarikan baut minimum yang disyaratkan sedemikian rupa sehingga gaya geser rencana disalurkan melalui jepitan yang bekerja dalam bidang kontak dan gesekan yang ditimbulkan antara bidang-bidang kontak.



Gambar 2.11 Sambungan Tipe Friksi



Baut yang digunakan pada eksperimental ini ialah menggunakan baut mutu tinggi (HTB). Pada sambungan baut mutu tinggi jenis gaya yang dominan bekerja pada sambungan adalah gaya geser. Pada sambungan geser akan terjadi mekanisme tipe friksi atau slip kritis (slip critical). Sambungan slip kritis harus dirancang untuk mencegah slip dan untuk keadaan batas dari sambungan tipe tumpuan. Bila baut-baut slip kritis melewati sampai pengisi (pelat), semua permukaan yang menahan slip harus dipersiapkan untuk mencapai ketahanan slip desain. (SNI 1729-2002)

Ketahanan slip yang tersedia untuk keadaan batas dari slip harus ditentukan sebagai berikut:

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (2.4)$$

Dimana :

- $\mu$  : 0.30 (Koefisien slip rata-rata untuk permukaan bersih)
- $D_u$  : 1.13 (pengali yang mencerminkan rasio rata-rata pratarik baut terpasang terhadap pratarik baut minimum yang disyaratkan)
- $h_f$  : 1.00 (faktor untuk pengisi untuk lubang standar)
- $T_b$  : Gaya Tarik baut minimum
- $n_s$  : Jumlah bidang slip yang diperlukan untuk mengizinkan sambungan dengan slip.

Bila suatu sambungan slip kritis menahan gaya Tarik yang direpkan reduksi gaya penjepit neto, ketahanan slip yang tersedia tiap baut harus dikalikan dengan faktor  $k_{sc}$  sebagai berikut:

$$k_{sc} = 1 - \frac{T_u}{D_u T_b n_b} \quad (2.5)$$

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Baut

Identifikasi Ansi/ASTM	Diameter Baut	Beban Leleh	Beban Leleh	Kekuatan
		Metode	Metode	Tarik
		Pengukuran	Pengukuran	Minimum
	Inci	ksi	ksi	ksi
	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
A307, baja karbon rendah				
Mutu A dan B	¼ sampai 4 (6.35 sampai 104)	-	-	60
A325, baja berkekuatan tinggi				
Tipe 1,2, dan 3	½ sampai 1 (12.7 sampai 25.4)	85 (585)	92 (635)	120 (825)
Tipe 1,2, dan 3	1 ⅛ sampai 1½ (28.6 sampai 38.1)	74 (510)	81 (560)	105 (725)
A449, baja berkekuatan tinggi (Catatan: pemakaiannya dibatasi oleh AISC hanya untuk baut yang lebih besar dari 1½ inci serta untuk batang berulir dan baut angkur)				
	¼ sampai 1 (6.35 sampai 25.4)	85 (585)	92 (635)	120 (825)
	1 ⅛ sampai 1½ (28.6 sampai 38.1)	74 (510)	81 (560)	105 (725)
	1¾ sampai 3 (6.35 sampai 76.2)	55 (380)	58 (400)	90 (620)
A490, baja paduan yang diberi perlakuan panas	½ sampai 1½ (12.7 sampai 38.1)	120 (825)	130 (895)	150 (1035)

Sumber : Struktur baja desain dan perilaku, 1997

### 2.5.1 Perincian Baut Mutu Tinggi (HTB)

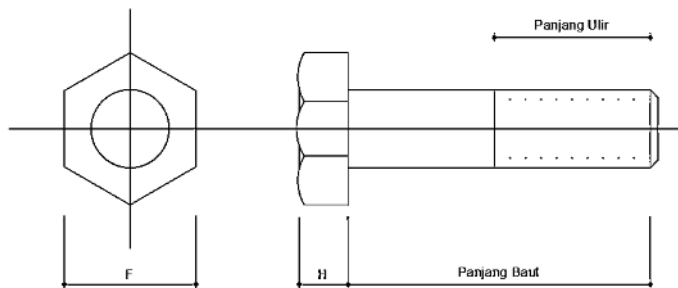
Baik Baik baut A325 yang paling banyak dipakai, maupun baut A490 yang kadang-kadang digunakan merupakan baut kepala segi enam yang tebal. Baut ini ditunjukkan dengan identifikasi ASTM dan simbol pabrik yang ditulis dipuncak kepala baut. Keduanya memiliki mur segi enam tebal yang diberi tanda standar dan simbol pabrik pada salah satu mukanya.

Tabel 2.2 Dimensi Baut Mutu Tinggi

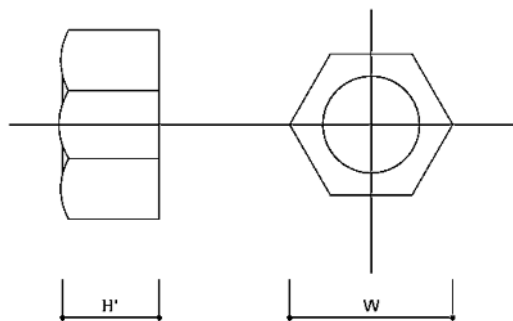
DIMENSI BAUT								DIMENSI MUR			
Diameter		F	H		Panjang Ulir		W	H*			
inc	Mm	inc	mm	inc	mm	inc	mm	inc	mm	inc	mm
1/2	12.7	3/8	22.2	5/16	7.9	1	25.4	3/8	22.2	31/64	12.3
5/8	15.9	17/16	27.0	15/54	9.9	5/4	31.8	17/16	27.0	39/64	15.5
3/4	19.1	5/4	31.8	15/32	11.9	11/8	34.9	5/4	31.8	47/64	18.7
7/8	22.2	23/16	36.5	35/54	13.9	3/2	38.1	23/16	36.5	55/64	21.8
1	25.4	13/6	41.3	39/54	15.5	7/4	44.5	13/6	41.3	63/64	25.0
5/8	28.6	29/16	46.0	11/16	17.5	2	50.8	29/16	46.0	71/64	28.2
5/4	31.8	2	50.8	15/32	19.8	2	50.8	2	50.8	39/31	31.0
11/8	34.9	35/16	55.6	17/32	21.4	5/4	38.1	35/16	55.6	43/31	34.1
3/2	38.1	19/6	60.3	15/16	23.8	5/4	38.1	19/6	60.3	47/31	37.3

Sumber : Struktur baja desain dan perilaku, 1997

Berikut ini detail simbol ukuran baut sesuai tabel di atas:



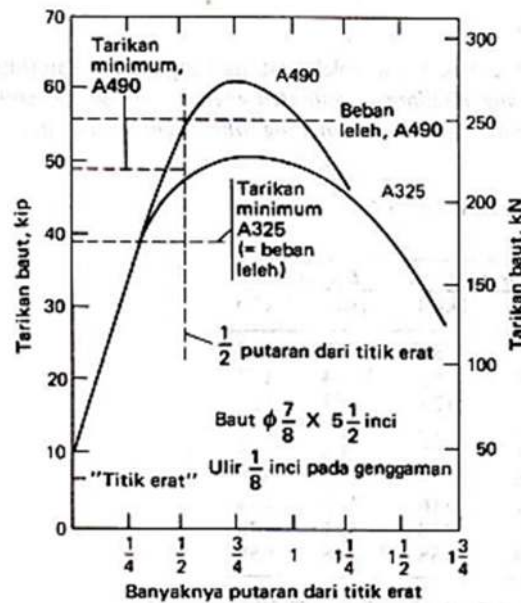
Gambar 2.12 Detail Ukuran Baut



Gambar 2.13 Detail Ukuran Mur

## 2.5.2 Beban Leleh dan Penarikan Baut

Syarat utama dalam pemasangan baut mutu tinggi ialah memberikan gaya pratarik (pretension). Gaya pratarik harus sebesar mungkin dan tidak menimbulkan deformasi permanen atau kehancuran baut. Bahan baut menunjukkan kelakuan tegangan-regangan (beban deformasi) yang tidak memiliki titik leleh yang jelas seperti Gambar 2.10.



Gambar 2.14 Hubungan Tipikal Untuk Beban dan Rotasi Mur Pada Baut A325 dan A490

Sumber : Charles G Salmon, 1986

Sebagai pengganti tegangan leleh, istilah beban leleh atau beban tarik awal akan digunakan untuk baut. Beban leleh adalah beban yang diperoleh dari perkalian hasil tegangan tarik dan tegangan leleh yang ditentukan berdasarkan regangan tetap (*offset strain*) 0.2% atau perpanjangan 0.5% akibat beban. Tegangan beban leleh untuk baut A325 dan A490 masing-masing minimal sekitar 70% - 80% dari kekuatan tarikan maksimumnya.

## 2.5.3 Teknik Pemasangan Baut Mutu Tinggi

Mekanisme slip kritis yang memungkinkan sistem sambungan baut tidak mengalami slip ketika dibebani adalah sangat penting untuk menghindari terjadinya kegagalan akibat fatik. Meskipun secara teori, suatu sambungan baut

yang direncanakan terhadap mekanisme slip kritis juga harus direncanakan terhadap mekanisme tumpu, sehingga secara teori dapat diketahui bahwa ketika mekanisme slip kritis gagal, yaitu terjadi slip, maka sistem sambungan tidak langsung rusak karena kemudian dapat bekerja baut tersebut dalam mekanisme tumpu, tetapi jika kemudian tidak diberikan *pretension* lagi pada baut tersebut maka seiring berjalannya waktu, struktur tersebut dapat rusak akibat faktor fatik.

Tiga teknik yang umum digunakan untuk memperoleh gaya pratarik yang dibutuhkan adalah :

- Metode kunci yang dikalibrasi (*calibrate wrench*)
- Metode putaran mur (*turn of the nut*)
- Metode indikator tarikan langsung (*direct tension indicator*)

Metode kunci yang dikalibrasi dapat dilakukan dengan kunci puntir manual atau kunci otomatis yang diatur agar berhenti pada harga puntir yang ditetapkan. Variasi tarikan baut yang dihasilkan oleh satu putaran dapat mencapai 30% dengan variasi rata-rata sebesar 10%. Oleh karena itu, *research council* menyarankan agar kunci yang dikalibrasi diatur untuk menimbulkan tarikan baut minimal 5%. Nilai pretension dapat dilihat pada Tabel 2.5 dengan mengacu pada SNI 1729:2002 dan Tabel 2.6 untuk penguncian dengan menggunakan kunci torsi yang mengacu *Standard Specification for Road and Bridge Construction*. 2007, sebagai berikut :

Tabel 2.3 Pratarik Minimum Baut (kN)

Ukuran baut, mm	Group A (baut A325)	Group B (baut A490)
16	91	114
20	142	179
24	205	257
30	326	408
36	475	595

\* Sama dengan 0,70 dikalikan kekuatan tarik minimum baut, dibulatkan kip

Seperti disyaratkan dalam spesifikasi baut ASTM A325 dan A490 dengan ulir UNC

Sumber: SNI 03-1729-2002

Tabel 2.4 Torsi Maksimum Baut yang Dianjurkan

Bolt Size (inch)	Torsi maksimum, ft- Lbs
1/2	150
5/8	290
3/4	500
7/8	820
1	1230
1 1/8	1500
1 1/4	2140
1 3/8	2810
1 1/2	3690

Sumber : *Standard Specification for Road and Bridge Construction. 2007*

Pada pemasangan sambungan baut mutu tinggi yang diberi *pretension* dapat menggunakan tangan / manual (*turn of nut*) yang dilakukan dengan persyaratan gaya tarik baut tercapai dan pratarik yang menggunakan kunci manual (*turn of nut*) dapat dilihat pada Tabel 2.5 di bawah ini :

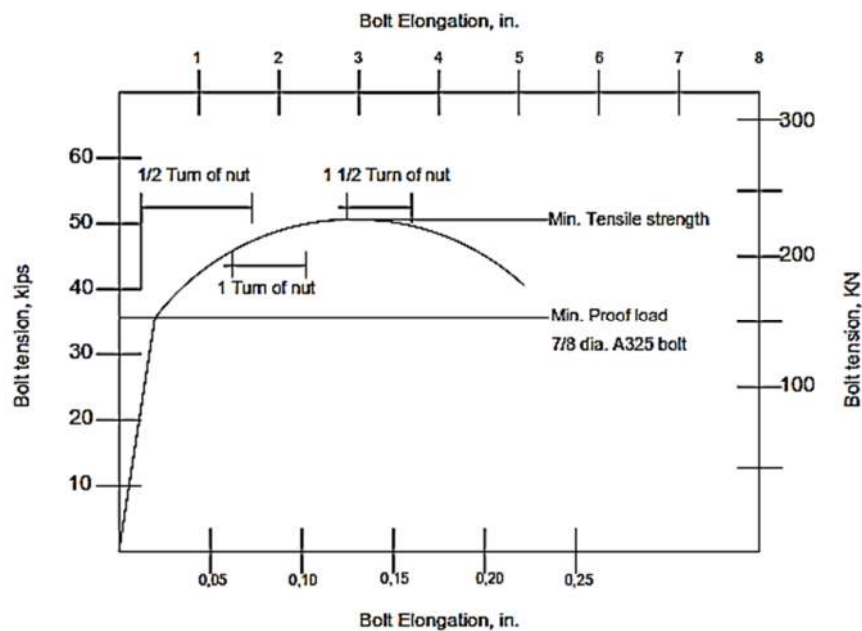
Tabel 2.5 Putaran Mur Dari Kondisi Kencang Tangan

Panjang baut (Bagian bawah kepala baut sampai ujung baut)	Posisi permukaan luar bagian yang dibaut (lihat Catatan 1, 2, 3, 4)		
	Semua permukaan tegak lurus terhadap sumbu baut	Satu permukaan tegak lurus terhadap sumbu baut, dan yang lainnya miring	Semua permukaan miring
$\leq 4d$	1/3 putaran	1/2 putaran	2/3 putaran
$4d < l \leq 8d$	1/2 putaran	2/3 putaran	5/6 putaran
$8d < l \leq 12d$ (lihat catatan 5)	2/3 putaran	5/6 putaran	1 putaran

Sumber: *SNI 03-1729-2002*

Di dalam dunia konstruksi, baut mutu tinggi banyak beragam jenis, tipe dan fungsinya. Salah satu baut mutu tinggi digunakan adalah baut A325 ataupun A490 menurut ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Pada metode

putaran mur, deformasi merupakan faktor kritis dengan batas keamanan yang diperlihatkan pada Gambar 2.5 di bawah ini. Secara umum masing-masing proses pemasangan memerlukan minimum  $2 \frac{1}{4}$  putaran dari titik erat untuk mematahkan baut. Bila metode putaran maut digunakan dan baut ditarik secara bertahap dengan kelipatan  $\frac{1}{8}$  putaran, baut biasanya akan patah setelah empat putaran dari titik erat.



Gambar 2.15 Hubungan Tegangan dan Regangan Pada Baut (Charles G Salmon, 1986)

## 2.6 Sambungan Las

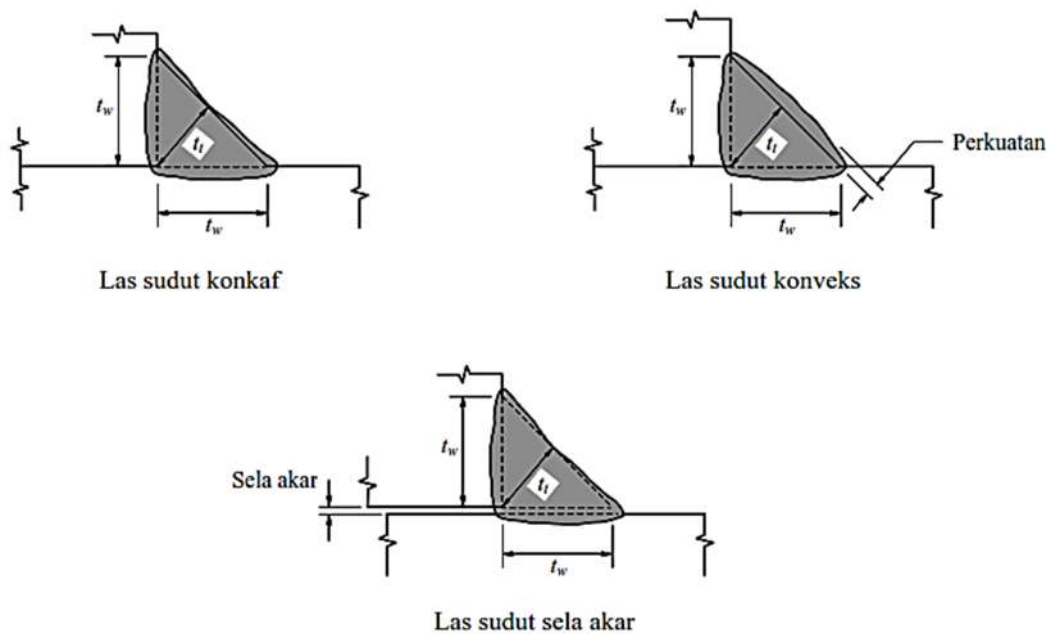
Sambungan las adalah sambungan antara dua atau lebih permukaan logam dengan cara mengaplikasikan pemanasan lokal pada permukaan benda yang disambung.

Di saat pembuatan produk-produk pengelasan, sangat penting untuk merencanakan material pengelasan dan sambungan-sambungan las dengan hati-hati agar hasilnya sesuai dengan yang diharapkan. Retak-retak pada struktur las disebabkan karena factor material, prosedur pengelasan, dan desain yang kurang baik. Dari penyebab-penyebab tersebut, desain yang kurang baik menyebabkan hampir 50% keretakan. Desain yang kurang baik menyebabkan retak dapat

disebabkan oleh perhitungan kekuatan yang salah (perhitungan penentuan muatan dan tegangan), dan juga desain struktur yang tidak tepat.

Secara umum, bentuk sambungan las yang sering dipakai yaitu las tumpul dan las sudut. Pada penelitian ini, akan digunakan las sudut.

Ukuran las sudut ditentukan oleh panjang kaki. Panjang kaki harus ditentukan sebagai panjang  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$ , dari sisi yang terletak sepanjang kaki segitiga yang terbentuk dalam penampang melintang las (lihat Gambar 2.12). Bila kakinya sama panjang, ukurannya adalah  $t_w$ . Bila terdapat sela akar, ukuran  $t_w$  diberikan oleh panjang kaki segitiga yang terbentuk dengan mengurangi sela akar seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.12.



Gambar 2.16 Ukuran Las Sudut

Ukuran minimum las sudut, selain dari las sudut yang digunakan untuk memperkuat las tumpul, ditetapkan sesuai dengan Tabel 2.6 kecuali bila ukuran las tidak boleh melebihi tebal bagian yang tertipis dalam sambungan.



Tabel 2.6 Ukuran Minimum Las Sudut

Tebal bagian paling tebal, $t$ (mm)	Tebal minimum las sudut, $t_w$ (mm)
$t \leq 7$	3
$7 < t \leq 10$	4
$10 < t \leq 15$	5
$15 < t$	6

Sumber : SNI 1729:2002

Ukuran maksimum las sudut sepanjang tepi komponen yang disambung adalah:

- Untuk komponen dengan tebal kurang dari 6,4 mm, diambil setebal komponen;
- Untuk komponen dengan tebal 6,4 mm atau lebih, diambil 1,6 mm kurang dari tebal komponen kecuali jika dirancang agar memperoleh tebal rencana las tertentu.

Untuk perhitungan kuat las sudut yang memikul gaya terfaktor per satuan panjang las,  $R_u$ , harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi R_{nw} \quad (2.6)$$

Dimana :

$$\phi_f R_{nw} = 0,75 t_t (0,6 f_{uw}) \text{ (las)} \quad (2.7)$$

$$\phi_f R_{nw} = 0,75 t_t (0,6 f_u) \text{ (bahan dasar)} \quad (2.8)$$

Dengan  $\phi_f = 0,75$  faktor reduksi kekuatan saat fraktur

Keterangan

$f_{uw}$  : tegangan tarik putus logam las, MPa

$f_u$  : tegangan tarik putus bahan dasar, MPa

$t_t$  : tebal rencana las, mm

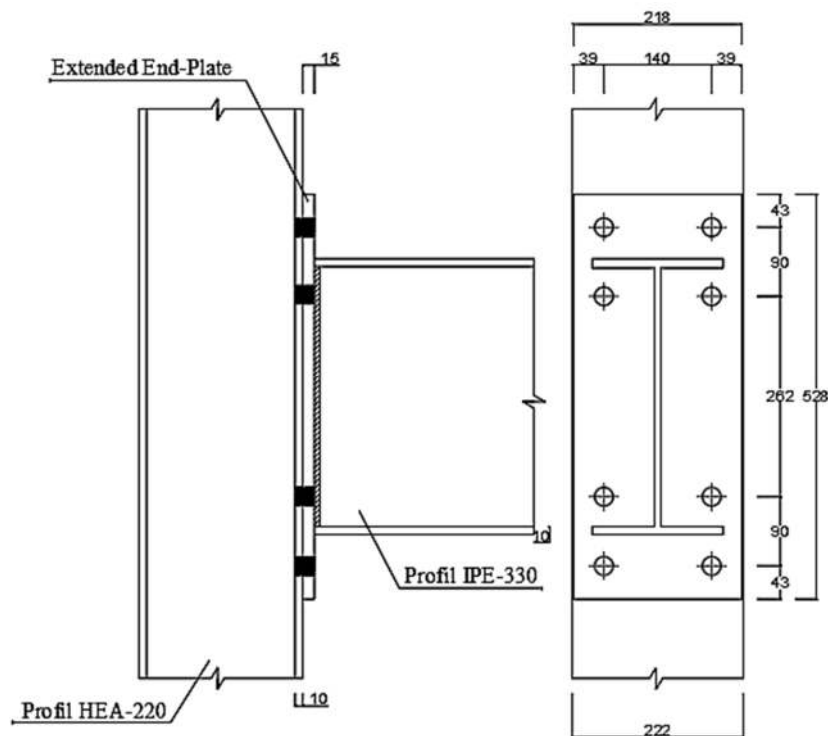
## 2.7 Pemodelan Sambungan Balok-Kolom Baja

Pemodelan yang akan dilakukan pada penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Doh, dkk. 2018 sekaligus sebagai verifikasi untuk pemodelan mengenai *end plate*. Berikut ini data-data pemodelan oleh Doh, dkk :

Tabel 2.7 Data Pemodelan Sambungan Tipe PS-1

Material	$E$ (Modulus of Elasticity) (N/mm <sup>2</sup> )	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)
Balok	207.000	248	483
Kolom			
Baut	210.000	634	827
End-Plate	207.000	248	483

Berikut ini detail ukuran balok-kolom yang digunakan pada pemodelan Abaqus oleh Doh, dkk:



Gambar 2.17 Detail Ukuran Profil Dan Jarak Antar Baut

Pada Gambar 2.17 dapat dilihat secara detail ukuran setiap material yang digunakan, baik kolom, balok, *end-plate*, maupun bautnya. Untuk kolom menggunakan panjang 1900 mm dan balok 1500 mm. Sedangkan *end-plate* menggunakan ukuran 218 x 528 mm dengan jumlah baut ada 8 buah.

## **2.8 Metode Elemen Hingga**

Metode elemen hingga adalah suatu alat numerik yang digunakan dalam menyelesaikan masalah teknik seperti persamaan diferensial dan integral dengan metode pendekatan. Metoda itu mula-mula dikembangkan untuk mempelajari tentang struktur dan tekanan (Clough 1960).

Dengan metode elemen hingga kita dapat mengubah suatu masalah dengan jumlah derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya akan lebih sederhana. FEM membagi-bagi problema kompleks ke elemen-elemen kecil yang dapat diselesaikan dengan hubungan sesamanya. Domain yang berkaitan akan direpresentasikan dalam bentuk elemen hingga (finite elements- FE). Fungsi pendekatan dalam FE ditentukan dalam bentuk nilai titik (nodal values) dari medan fisis. Problema fisis kontinu ditransformasikan menjadi problema FE terdiskritisasi dengan nilai titik yang tak diketahui. Untuk problema linier, sistem persamaan aljabar linier harus diselesaikan. Nilai yang terdapat dalam FE dapat diperoleh dengan nilai titik.

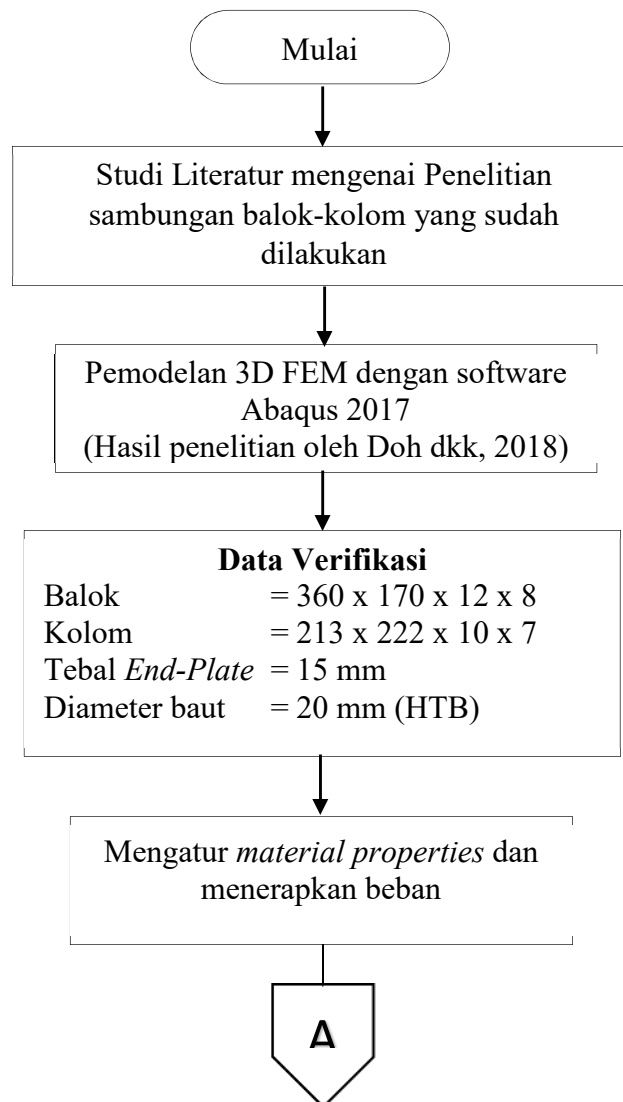
## BAB 3 METODOLOGI

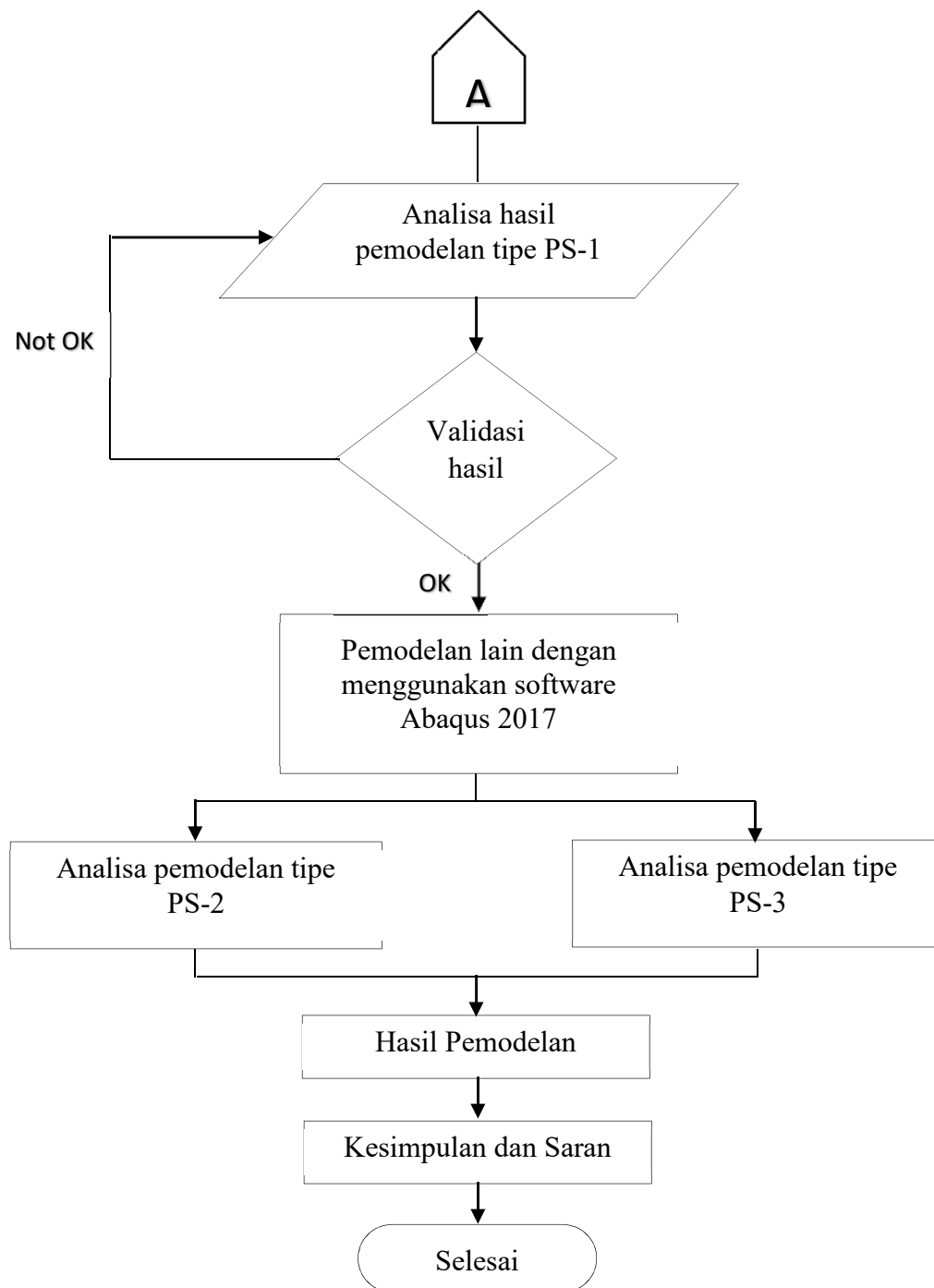
### 3.1 Umum

Metodologi ini akan menguraikan dan menjelaskan metode penelitian yang akan dilakukan. Pemikiran awal agar tercapai tujuan penelitian juga diberikan, sehingga memberi gambaran bagaimana filosofi dasar dari penelitian ini. Uraian tahapan penelitian diperlihatkan dengan diagram alir pengerjaan penelitian ini.

### 3.2 Bagan Alir Penyelesaian Tesis

Berikut ini alur penyelesaian penelitian mengenai *Extended End-Plate*:





Gambar 3.1 Bagan Alir Penyelesaian Tesis

### 3.3 Studi Literatur

Melakukan studi referensi berupa peraturan, buku pustaka, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan *Extended End-Plate*.

1. AISC 2005 tentang “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”

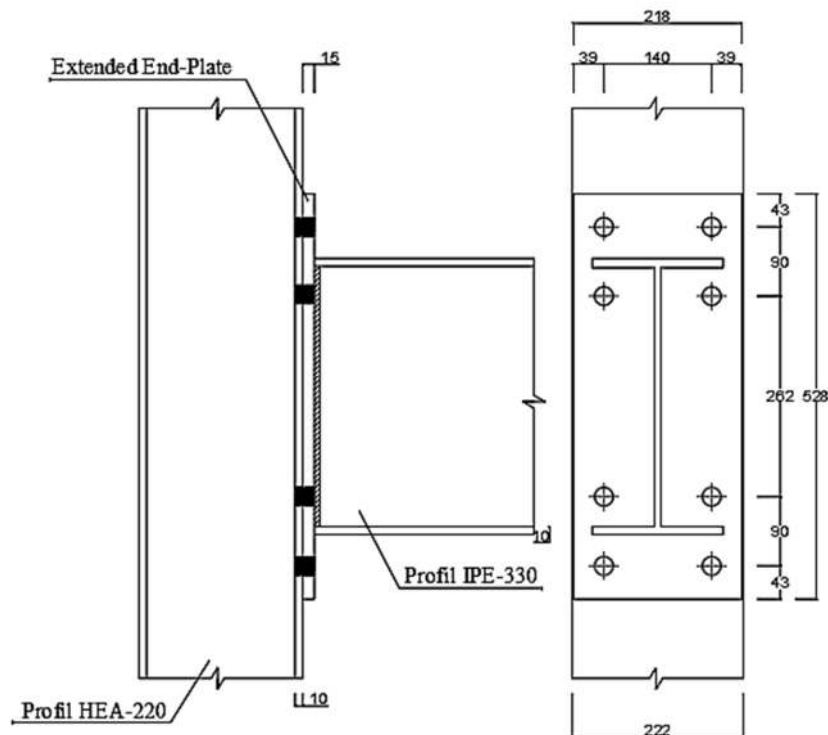
2. SNI 1792:2015 tentang “Spesifikasi untuk bangunan gedung baja structural“
3. SNI 1727:2013 tentang “Beban minimum untuk Perancangan Gedung dan struktur lain
4. ”SNI 1726:2012 tentang “Tata cara perencanaan ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung”
5. Laporan Penelitian “Behaviour of Extended End-Plate Steel Beam to Column Connections” (Doh, dkk, 2018)

### 3.4 Pemodelan 3D FEM Hasil Eksperimental (Doh dkk, 2018)

Proses dan Tahap Pengerjaan:

- Melakukan pemodelan pada program Abaqus 2017
- Mengatur material properties dan menerapkan beban
- Melakukan analisis FEM
- Mendapatkan hasil (validasi)

Berikut ini spesifikasi dan ukuran sambungan sebagai data untuk verifikasi:



Gambar 3.2 Detail Sambungan Tipe PS-1

Pada Gambar 3.2 dapat dilihat secara detail ukuran setiap material yang digunakan, baik kolom, balok, *end-plate*, maupun bautnya. Untuk kolom menggunakan panjang 1900 mm dan balok 1500 mm. Sedangkan *end-plate* menggunakan ukuran 218 x 528 mm dengan jumlah baut ada 8 buah. Berikut ini disajikan detail material dalam Tabel 3.1

Tabel 3.1 Detail Material Pemodelan Tipe PS-1

Material	Detail	Fy	fu	E
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Kolom	213 x 222 x 10 x 7	248	483	207000
Balok	360 x 170 x 12 x 8	248	483	207000
<i>Extended End-Plate</i>	Tebal 15 mm	248	483	207000
Baut	Grade 8.8 (20 mm)	634	827	210000

Material yang digunakan pada pemodelan pengembangan yang dianalisis adalah baja. Sedangkan untuk berat jenis yang digunakan sebesar 7850 kg/m<sup>3</sup>.

Hasil eksperimental dari Doh dkk, 2018 ini menjadi acuan dalam pemodelan. Nantinya hasil eksperimen ini sangat berguna untuk memverifikasi atau mengoreksi hasil dari pemodelan yang dilakukan agar hasil pemodelan dapat dikontrol terhadap hasil eksperimen yang sudah ada.

### 3.5 Pemodelan dan Analisa Struktur

#### 3.5.1 Kontrol Desain

Melakukan analisa struktur, dimana harus memenuhi syarat keamanan dan rasional sesuai batas-batas tertentu menurut peraturan. Dilakukan analisa apakah desain telah sesuai dengan syarat-syarat perencanaan dan peraturan angka keamanan, serta efisiensi. Bila telah memenuhi persyaratan, maka dapat dilanjutkan ke tahap pendetailan dan apabila tidak memenuhi persyaratan, maka dilakukan pendesainan ulang.

### 3.5.2 Balok

a. Kontrol Penampang (SNI 1729:2015 tabel B4.1) :

- Pelat badan :

$$\frac{h}{tw} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (3.1)$$

$$\lambda_{Rw} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (3.2)$$

- Pelat sayap :

$$\frac{b}{2tf} \leq 0,38 \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (3.3)$$

$$\lambda_{Rf} = 1,0 \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (3.4)$$

b. Kontrol Kuat Lentur Akibat Tekuk Lokal SNI 1729:2015 Pasal 8.2 :

- Penampang Kompak :  $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_n = M_p = Z_x \cdot fy \quad (3.5)$$

- Penampang Tidak Kompak :  $\lambda < \lambda_p \leq \lambda_R$

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7S_x \cdot fy) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_R - \lambda_p)} \quad (3.6)$$

c. Kontrol Kuat Lentur Akibat Tekuk Lateral :

- Plastis :  $L_b \leq L_p$

$$M_n = M_p = Z_x \cdot fy \quad (3.7)$$

$$L_p = 1,76 \cdot ry \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (3.8)$$

$$ry = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (3.9)$$

ry = Jari-jari girasi terhadap sumbu lemah



- Inelastis ( $L_p \leq L_b \leq L_r$ )

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0,7S_x f_y) \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right] \leq M_p \quad (3.10)$$

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7f_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_0}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7f_y}{E}\right)^2}} \quad (3.11)$$

$$r_{ts} = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x} \quad (3.12)$$

$$C_w = \frac{1}{4} I_y h_0^2 \quad (3.13)$$

Keterangan :

$$C_b = \frac{12,5 M_{Max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 2,27 \quad (3.14)$$

$C_b=1,0$  untuk kantilever atau overhangs dimana ujung bebas yang tanpa dibresing

- Elastis ( $L_b > L_r$ )

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (3.15)$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{J_c}{S_x h_0} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (3.16)$$

d. Kontrol Kuat Geser (SNI 1729:2015 pasal G2):

$$V_n = 0,6f_y \cdot A_w \cdot C_v \quad (3.17)$$

- Plastis

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (3.18)$$

$$\frac{h}{t_w} \leq 1,1 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}} \quad (3.19)$$

$C_v=1,0$

- Inelastis

$$1,1 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}} \leq \frac{h}{t_w} \leq 1,37 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}} \quad (3.20)$$

$$C_v = \frac{1,10 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}}}{\frac{h}{tw}} \quad (3.21)$$

- Elastis

$$\frac{h}{tw} > 1,37 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}} \quad (3.22)$$

$$C_v = \frac{1,51 K_v E}{\left(\frac{h}{tw}\right)^2 f_y} \quad (3.23)$$

$K_v = 5$  untuk  $\frac{h}{tw} < 260$  *badan tanpa pengaku transversal*

Untuk badan dengan pengaku transversal :

$$K_v = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 5 \text{ bila } \frac{a}{h} > 3,0 \text{ atau } \frac{a}{h} > \left[\frac{260}{h/tw}\right]^2 \quad (3.24)$$

$$V_u \leq \phi V_n \quad (3.25)$$

- e. Kontrol Lendutan :

$$y_{maks} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384EI} \text{ (Untuk beban terbagi rata)} \quad (3.26)$$

$$y_{maks} = \frac{P \cdot L^3}{48EI} \text{ (Untuk beban terpusat)} \quad (3.27)$$

Dimana :  $\bar{y} = \frac{L}{360}$

### 3.5.3 Kolom

- a. Kontrol Penampang

Penampang tidak boleh termasuk dalam kategori penampang langsing :

Pelat Badan :

$$\frac{h}{tw} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3.28)$$

$$\lambda = \lambda_R \quad (3.29)$$

Pelat Sayap :

$$\frac{h}{2tf} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3.30)$$

$$\lambda = \lambda_R \quad (3.31)$$

b. Kontrol Tekuk-Lentur (SNI 1729:2015 pasal E3)

$$\lambda = \frac{Kc \cdot L}{r} \quad (3.32)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (3.33)$$

$$\text{Bila } \lambda \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ atau } \frac{f_y}{F_e} \leq 2,25 \quad (3.34)$$

$$\text{Maka } F_{cr} = \left[ 0,658 \frac{f_y}{F_e} \right] \quad (3.35)$$

$$\text{Bila } \lambda > 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ atau } \frac{f_y}{F_e} > 2,25 \quad (3.36)$$

$$\text{Maka } F_{cr} = 0,877 F_e$$

c. Kontrol Tekuk-Puntir : (SNI 1729:2015 pasal E4)

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y} \quad (3.37)$$

d. Kontrol Gaya Aksial dan Momen Lentur (SNI 1729:2015 pasal F2)

$$P_n = A_g \cdot F_{cr} \quad (3.38)$$

$$P_c = \phi P_n \quad (3.39)$$

$$M_u \leq \phi M_n \quad (3.40)$$

Keterangan :

$M_u$  = Momen lentur rencana (N.mm)

$M_n$  = Kuat lentur nominal penampang (N.mm)

$\phi$  = Faktor reduksi (0.9)

Tekuk Torsi Lateral :

a. Bentang Pendek ( $L_b \leq L_p$ )

$$M_n = M_p = Z_x \cdot f_y \quad (3.41)$$

$$L_p = 1.76 \cdot r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3.42)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (3.43)$$

$r_y$  = Jari-jari girasi terhadap sumbu lemah

Keadaan batas dari tekuk torsi-lateral tidak boleh digunakan

b. Bentang Menengah ( $L_p \leq L_b \leq L_r$ )

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0.7 S_x f_y) \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right] \leq M_p \quad (3.44)$$

$$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 f_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_0}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 f_y}{E}\right)^2}} \quad (3.45)$$

$$r_{ts} = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x} \quad (3.46)$$

Keterangan :

$$C_b = \frac{12.5 M_{Max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \leq 2.27 \quad (3.47)$$

$C_b=1,0$  untuk kantilever atau overhangs dimana ujung bebas yang tanpa dibresing

c. Bentang Panjang ( $L_b > L_r$ )

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (3.48)$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J_c}{S_x h_0} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (3.49)$$

Persamaan interaksi aksial momen (SNI 1729:2015 pasal H1) :

1. Jika  $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$ , maka :

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.50)$$

2. Jika  $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$ , maka :

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.51)$$

### 3.6 Sambungan Baut

Kuat rencana setiap komponen sambungan tidak boleh kurang dari beban terfaktor yang dihitung. Perencanaan sambungan harus memenuhi persyaratan berikut:

- a. Gaya-dalam yang disalurkan berada dalam keseimbangan dengan gaya-gaya yang bekerja pada sambungan;
- b. Deformasi pada sambungan masih berada dalam batas kemampuan deformasi sambungan;
- c. Sambungan dan komponen yang berdekatan harus mampu memikul gaya-gaya yang bekerja padanya

Berikut ini syarat-syarat control sambungan baut:

- a. Kontrol jarak baut : (SNI 1729-2015 Ps. J3.3-5)

Spasi minimum : Jarak antara pusat-pusat standar , ukuran berlebih, dan lubang-lubang slot, tidak boleh kurang dari  $2 \frac{2}{3}$  kali diameter nominal,  $d$  dari pengencang; suatu jarak  $3d$  yang lebih disukai.

Tabel 3.2 Jarak Tepi Minimum Dari Pusat Lubang Standar ke Tepi dari Bagian Yang Disambung

Diameter Baut (mm)	Jarak Tepi Minimum
16	22
20	26
22	28
24	30
27	34
30	38
36	46
Di atas 36	1,25d

Sumber: SNI 1729-2015

#### Spasi Maksimum dan Jarak Tepi

Jarak maksimum dari pusat setiap baut ke tepi terdekat dari bagian-bagian dalam kontak harus 12 kali ketebalan dari bagian yang disambung akibat perhitungan, tetapi tidak boleh melebihi 6 in. (150 mm). Spasi longitudinal pengencang antara elemen-elemen yang terdiri dari suatu pelat dan suatu profil atau dua pelat pada kontak menerus harus sebagai berikut :

1. Untuk komponen struktur dicat atau komponen struktur tidak dicat yang tidak menahan korosi, spasi tersebut tidak boleh melebihi 24 kali ketebalan dari bagian tertipis atau 12 in. (305 mm).
2. Untuk komponen struktur tidak dicat dari baja yang berhubungan dengan cuaca yang menahan korosi atmosferic, spasi tidak boleh melebihi 14 kali ketebalan dari bagian tertipis atau 7 in. (180 mm).

#### b. Kekuatan rencana baut

1. Kekuatan rencana geser baut

$$\phi R_n = F_n A_b \quad (3.52)$$

Keterangan:

$$\phi = 0,75$$

$$A_b = \text{luas tubuh baut tidak berulir atau bagian ulir (mm}^2\text{)}$$

$F_n$  = tegangan tarik nominal,  $F_{nt}$ , atau tegangan geser,  $F_{nv}$  dari tabel J3.2 (MPa)

2. Kekuatan rencana tumpu baut dengan plat

$$Rn = F'_{nt} A_b \quad (3.53)$$

Dimana :

$$F_{nt} = 1,3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} F_{rv} \leq F_{nt} \quad (3.54)$$

Keterangan:

$\phi$  = 0,75 adalah faktor reduksi kekuatan untuk fraktur

$F'_{nt}$  = tegangan tarik nominal yang dimodifikasi mencakup efek teg, geser (MPa)

$F_{nt}$  = tegangan tarik nominal tabel J3.2, (MPa)

$F_{nv}$  = tegangan geser dari tabel J3.2, (MPa)

$F_{rv}$  = tegangan geser diperlukan menggunakan kombinasi beban DFBK (Desain faktor Beban dan Ketahanan), (MPa)

3. Kekuatan baut memikul beban tarik

Kekuatan rencana tarik dari baut :

$$\phi_f T_n = \phi_f \cdot 0,75 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad (3.55)$$

Dimana :

$f_u^b$  = tegangan tarik putus baut

$A_b$  = luas bruto penampang baut

$\phi_f$  = faktor reduksi ( 0,75 )

### 3.6.1 Kontrol Konsep *Strong Column Weak Beam*

Untuk perbandingan momen kolom terhadap momen balok hubungan berikut ini harus dipenuhi yaitu:

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1 \quad (3.56)$$

Keterangan :

$\sum M_{pc}^*$  adalah jumlah momen-momen kolom di bawah dan di atas sambungan pada pertemuan antara as kolom dan as balok.  $\sum M_{pb}^*$  ditentukan

dengan menjumlahkan proyeksi kuat lentur nominal kolom, termasuk voute bila ada, di atas dan di bawah sambungan pada as balok dengan reduksi akibat gaya aksial tekan kolom. Diperkenankan untuk mengambil  $\sum M_{pc}^* = \sum Z_c (f_{yc} - N_{uc}/A_g)$ . Bila as balok-balok yang bertemu di sambungan tidak membentuk satu titik maka titik tengahnya dapat digunakan dalam perhitungan.

$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c \left( f_{yc} - \frac{N_{uc}}{A_g} \right) \quad (3.57)$$

$\sum M_{pb}^*$  adalah jumlah momen-momen balok-balok pada pertemuan as balok dan as kolom.  $\sum M_{pb}^*$  ditentukan dengan menjumlahkan proyeksi kuat lentur nominal balok di daerah sendi plastis pada as kolom. Diperkenankan untuk mengambil  $\sum M_{pb}^* = \sum (1,1R_y M_p + M_y)$ , dengan  $M_y$  adalah momen tambahan akibat amplifikasi gaya geser dari lokasi sendi plastis ke as kolom. Sebagai alternatif, diperkenankan untuk menentukan  $\sum M_{pb}^*$  dari hasil pengujian sesuai peraturan atau dengan analisis rasional berdasarkan pengujian. Bila sambungan dibuat menggunakan penampang balok yang direduksi maka diperkenankan untuk mengambil  $\sum M_{pb}^* = \sum (1,1R_y f_y Z + M_y)$  dengan  $Z$  adalah modulus plastis minimum pada penampang balok yang direduksi.

$A_g$  adalah luas penampang bruto kolom, mm<sup>2</sup>

$f_{yc}$  adalah tegangan leleh penampang kolom, MPa

$N_{uc}$  adalah gaya aksial tekan terfaktor pada kolom, N

$Z_c$  adalah modulus plastis penampang kolom, mm<sup>3</sup>

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1,1R_y f_y Z + M_y) \quad (3.58)$$

### 3.6.2 Daerah Panel Pada Sambungan Balok-Kolom

Berdasarkan SNI 1729 : 2002 Pasal 15.7.3 mengenai sambungan dimana badan balok sebidang dengan badan kolom.

Kuat geser : gaya geser terfaktor  $V_u$  pada daerah panel ditentukan berdasarkan momen lentur balok sesuai dengan kombinasi pembebanan. Namun



Vu tidak perlu melebihi gaya geser yang ditetapkan berdasarkan  $0.8 \Sigma R_y M_p$  dari balok-balok yang merangka pada sayap kolom disambungan. Kuat geser rencana  $\phi_v V_n$  panel ditentukan menggunakan persamaan berikut :

- Bila  $N_u \leq 0.75N_y$  , maka

$$\phi_v V_n = 0,6\phi_v f_y d_c t_p \left[ 1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_p} \right] \quad (3.59)$$

Dengan  $\phi_v = 0,75$

- Bila  $N_u > 0.75N_y$  , maka

$$\phi_v V_n = 0,6\phi_v f_y d_c t_p \left[ 1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_p} \right] \left[ 1,9 - \frac{1,2N_u}{N_y} \right] \quad (3.60)$$

Dengan  $\phi_v = 0,75$

Dimana :

$t_p$  = tebal total daerah panel, termasuk pelat pengganda, mm

$d_c$  = tinggi keseluruhan penampang kolom, mm

$b_{cf}$  = lebar sayap kolom, mm

$t_{cf}$  = ketebalan dari sayap kolom, mm

$d_b$  = tinggi bruto penampang balok, mm

$f_y$  = tegangan leleh bahan baja pada daerah panel, MPa

### 3.6.3 Tebal Daerah Panel

Ketebalan masing-masing pelat badan penampang kolom atau pelat pengganda pada daerah panel, ditetapkan menurut persamaan berikut:

$$t \geq \frac{d_z + w_z}{90} \quad (3.61)$$

Dimana:

$t$  = tebal pelat badan penampang kolom atau pelat pengganda pada daerah panel, mm

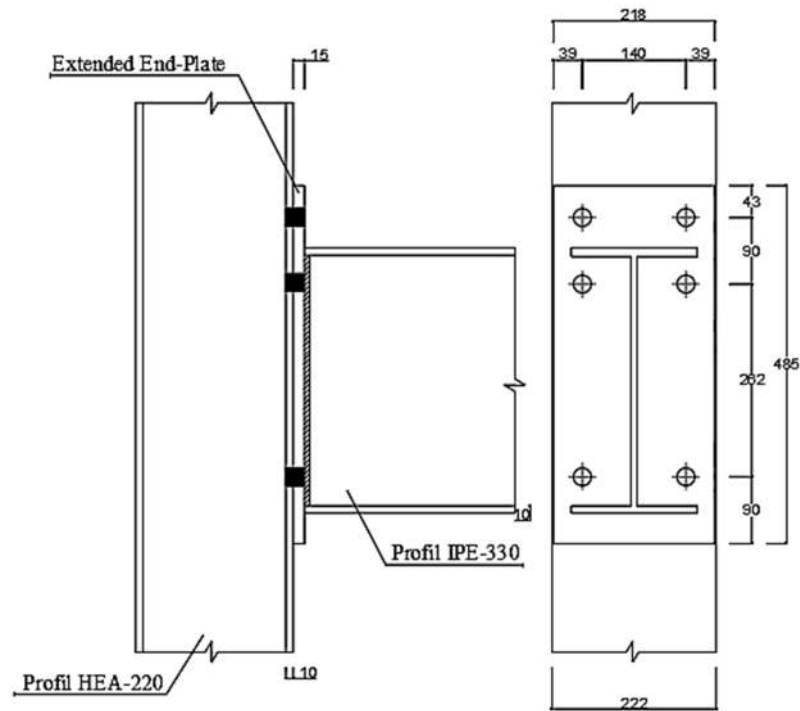
$d_z$  = tinggi daerah panel di antara pelat terusan, mm

$w_z$  = lebar daerah panel di antara kedua sayap kolom, mm

### 3.7 Model-model Sambungan

Dengan menggunakan material yang sama sesuai pemodelan sebelumnya, maka akan dilakukan modifikasi model sambungan dengan data sebagai berikut:

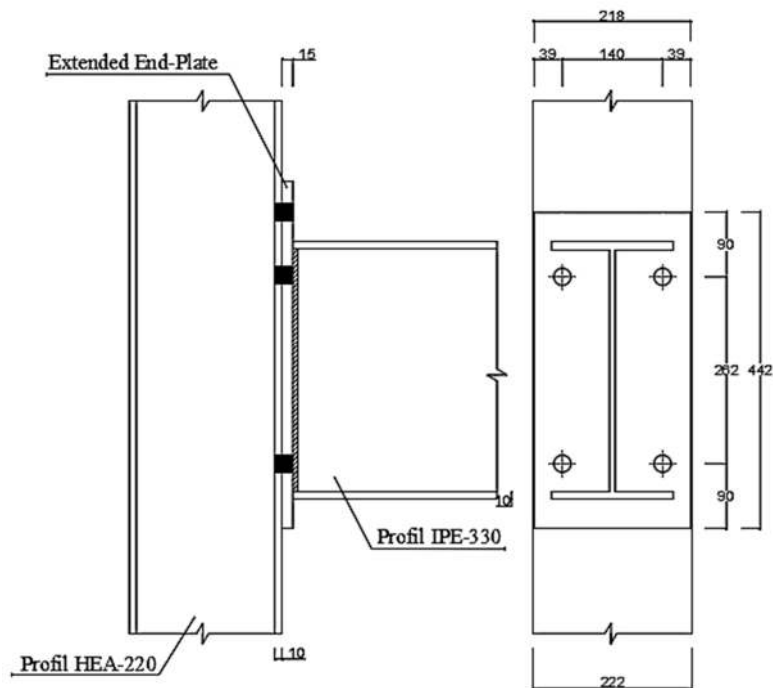
#### 1. Spesimen tipe PS-2



Gambar 3.3 Detail Sambungan Spesimen Tipe PS-2

Pada Gambar 3.3 dapat dilihat secara detail ukuran setiap material yang digunakan, baik kolom, balok, *end-plate*, maupun bautnya. Untuk kolom menggunakan panjang 1900 mm dan balok 1500 mm. Sedangkan *end-plate* menggunakan ukuran 218 x 485 mm dengan jumlah baut ada 6 buah. Untuk profil balok dan kolom sama dengan pemodelan PS-1 dengan diameter baut 20 mm.

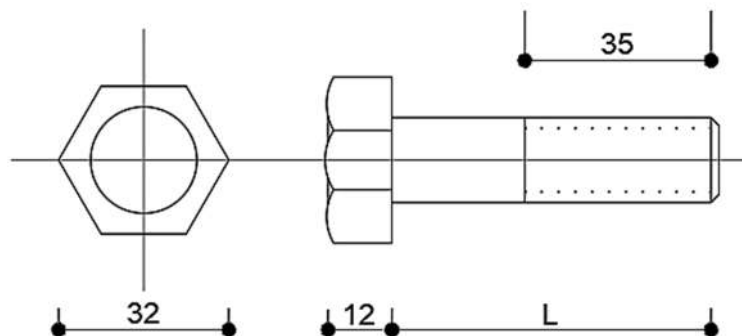
## 2. Specimen tipe PS-3



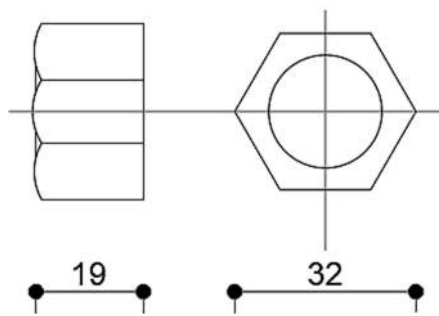
Gambar 3.4 Detail Sambungan Spesimen Tipe PS-3

Pada Gambar 3.4 dapat dilihat secara detail ukuran setiap material yang digunakan, baik kolom, balok, *end-plate*, maupun bautnya. Untuk kolom menggunakan panjang 1900 mm dan balok 1500 mm. Sedangkan *end-plate* menggunakan ukuran 218 x 442 mm dengan jumlah baut ada 4 buah. Untuk profil balok dan kolom sama dengan pemodelan PS-1 dengan diameter baut 20 mm.

## 3. Detail Ukuran Baut Grade 8.8 (d=20mm)



Gambar 3.5 Detail Ukuran Baut Grade 8.8

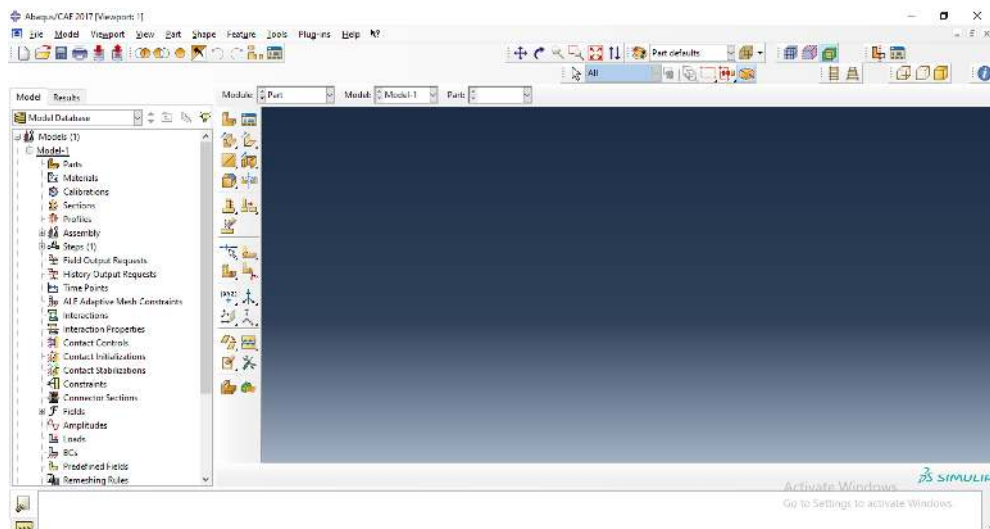


Gambar 3.6 Detail Ukuran Mur Grade 8.8

Gambar 3.5 dan 3.6 menunjukkan detail ukuran baut yang digunakan pada pemodelan baik untuk variasi specimen PS-1, PS-2, dan PS-3. Baut yang digunakan ialah diameter 20 mm dengan tebal kepala baut 12 mm dan diameternya ialah 32 mm. pendetailan ini sesuai dengan aturan ukuran baut yang terdapat pada Tabel 2.2.

### 3.8 Analisa Metode Elemen Hingga

Analisa metode elemen hingga akan dilakukan untuk memodelkan sambungan dalam bentuk 3 dimensi. Analisa metode elemen hingga ini dilakukan dengan program bantu ABAQUS.



Gambar 3.7 Tampilan Awal Program Bantu Abaqus 2017

Pada Gambar 4.7 menunjukkan tampilan awal saat kita membuka aplikasi Abaqus 2017. Setelah tahapan ini, kita akan melanjutkan untuk memulai pemodelan.

Berikut ini tahapan yang dilakukan dalam melakukan Analisa metode elemen hingga:

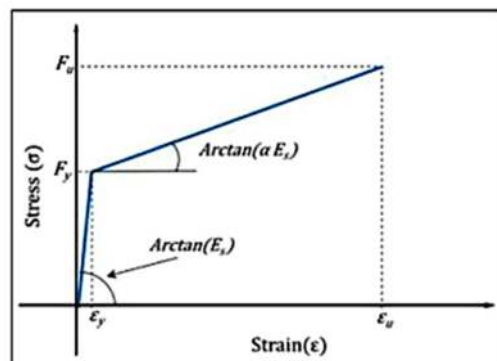
1. Menggambar elemen struktur

Penggambaran elemen struktur disesuaikan dengan ukuran dan material yang dimodelkan pada Abaqus sehingga dapat dilakukan validasi hasil.

2. Input *material properties*

Model struktur yang akan dibuat yaitu struktur baja. Berikut penjelasan dari masing masing material:

Pada input material baja, terdapat beberapa parameter yaitu *general* dan *mechanical* . Pada material *general* dilakukan input *density* baja sedangkan pada *mechanical* terdapat 2 *material behavior* yaitu *elasticity* dan *plasticity*. Pada *elasticity* dipilih perilaku material *elastic* dimana perlu diinput nilai *modulus young* dan *poisson ratio* dari beton. Pada *plasticity* dipilih *plastic* dimana diinput *yield stress* dari material tersebut.



Gambar 3.8 Hubungan Tegangan-Regangan Baja  
(Khanouki dkk, 2016)

Pada tahap ini, diinput nilai tegangan-regangan pada modul property plastic. Nilai tegangan-regangan baja didapatkan melalui pendekatan analisis dengan perumusan Khanouki dkk, 2016.

Grafik di atas merupakan penentu perhitungan mutu material yang digunakan. Baik  $f_y$  (tegangan leleh), maupun nilai regangannya. Adapun rumusnya ialah sebagai berikut:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (3.62)$$

$$f_s = \varepsilon_s \cdot E_s \quad (3.63)$$

Dari rumus di atas maka diperoleh nilai tegangan dan regangan setiap material baja sebagai berikut:

Tabel 3.3 Nilai Regangan Material

No	Material	Tegangan Leleh (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)	Regangan
1.	Balok	248	207000	0.0001
2.	Kolom			
3.	End-Plate			
4.	Baut	634	210000	0.0003

Untuk input nilai *Yield Stress* dan *Plastic Strain* pada Abaqus harus dalam bentuk *true stress* dan *logarithmic plastic strain*. Adapun perhitungan *true stress* dan *plastic strain* adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.64)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{nom} - \frac{\sigma_{nom}}{E} \quad (3.65)$$

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (3.67)$$

Dimana:

$\sigma$  = *True Stress*

$\sigma_{nom}$  = *Nominal Stress*

$\varepsilon$  = *True Strain*

$\varepsilon_{nom}$  = *Nominal Strain*

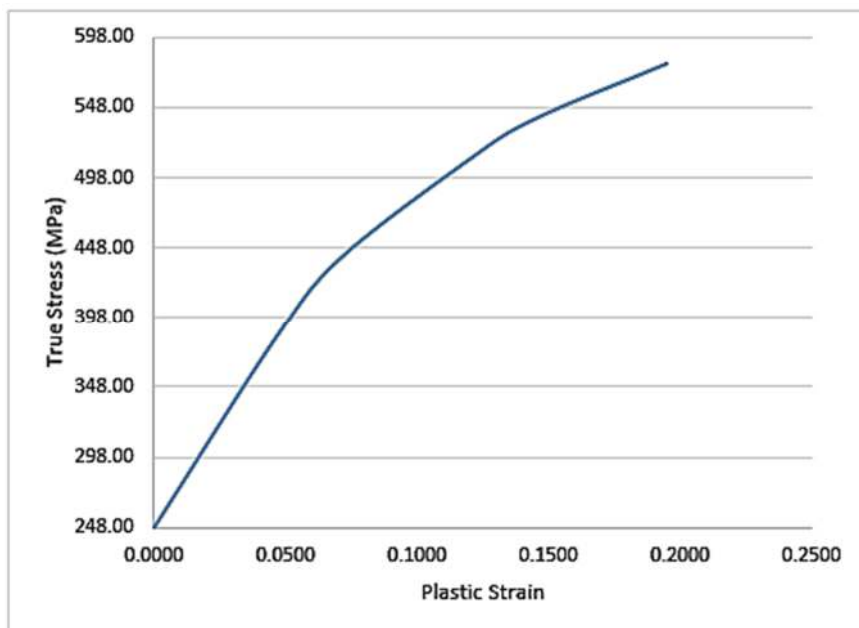
$\varepsilon^{pl}$  = *Plastic Strain*

E = *Modulus Elastisitas*

Tabel 3.4 Perhitungan Nilai *Plastic Strain* Material Baja

Nominal Stress (MPa)	Nominal Strain	True Stress (MPa)	True Strain	Plastic Strain
248	0.0001	248.02	0.0001	0.0001
365	0.050	383.25	0.048	0.0464
400	0.075	430.00	0.073	0.0710
450	0.125	506.25	0.123	0.1204
470	0.150	540.50	0.148	0.1451
483	0.200	579.60	0.198	0.1949

Dari Tabel 3.4 bisa diperoleh nilai *true stress* dan *plastic strain* untuk diinput pada model *material properties* di Abaqus. Pada saat *true stress* bernilai 248.02 MPa, nilai *plastic strain* 0.0001. Saat *true stress* mencapai 579.60 MPa, nilai *plastic strain* 0.1949.



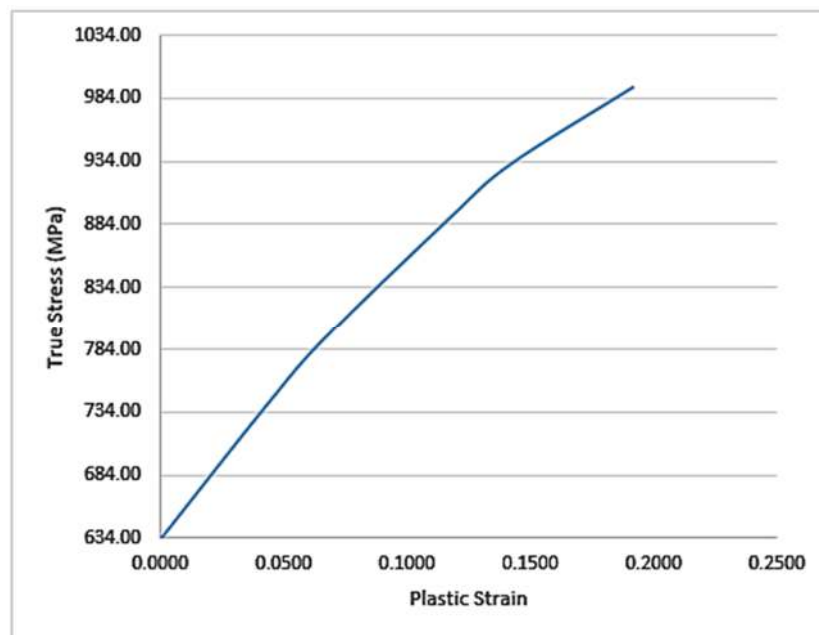
Gambar 3.9 *Stress-Strain* Material Baja

Nilai *true stress* dan *plastic strain* pada Tabel 3.4 diplot ke dalam bentuk grafik seperti yang terdapat pada Gambar 3.9.

Tabel 3.5 Perhitungan Nilai Plastic Strain Material Baut

Nominal Stress (MPa)	Nominal Strain	True Stress (MPa)	True Strain	Plastic Strain
634	0.0003	634.19	0.0003	0.0003
705	0.050	740.25	0.047	0.0431
740	0.075	795.50	0.071	0.0677
790	0.125	888.75	0.121	0.1170
810	0.150	931.50	0.146	0.1417
827	0.200	992.40	0.196	0.1913

Dari Tabel 3.5 bisa diperoleh nilai *true stress* dan *plastic strain* untuk diinput pada model *material properties* di Abaqus. Pada saat *true stress* bernilai 634.19 MPa, nilai *plastic strain* 0.0003. Saat *true stress* mencapai 992.40 MPa, nilai *plastic strain* 0.1913.



Gambar 3.10 *Stress-Strain* Material Baut

Nilai *true stress* dan *plastic strain* pada Tabel 3.5 diplot ke dalam bentuk grafik seperti yang terdapat pada Gambar 3.10.



### 3. *Assembly*

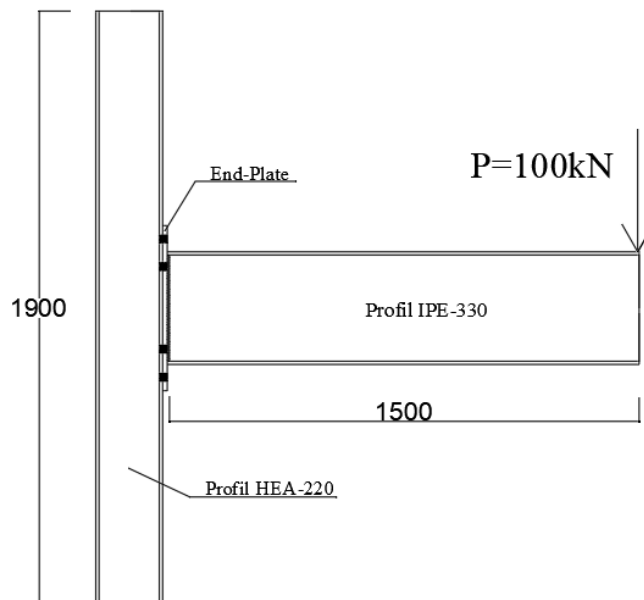
Setelah melakukan pemodelan tiap *part* maka perlu dilakukan *assembly* untuk membentuk sebuah elemen struktur menjadi satu kesatuan. *Assembly* yaitu pengaturan posisi dari tiap elemen sesuai dengan elemen struktur yang akan dianalisis. Setelah dilakukan *assembly* perlu adanya penggabungan agar elemen tersebut menjadi satu kesatuan.

### 4. *Step*

Modul Step digunakan untuk menentukan langkah yang dilalui selama proses simulasi. Initial step sebagai kondisi gaya perletakan. Step-1 dan step selanjutnya adalah pemberian beban displacement. Step dibuat sebanyak beban displacement yang akan diberikan.

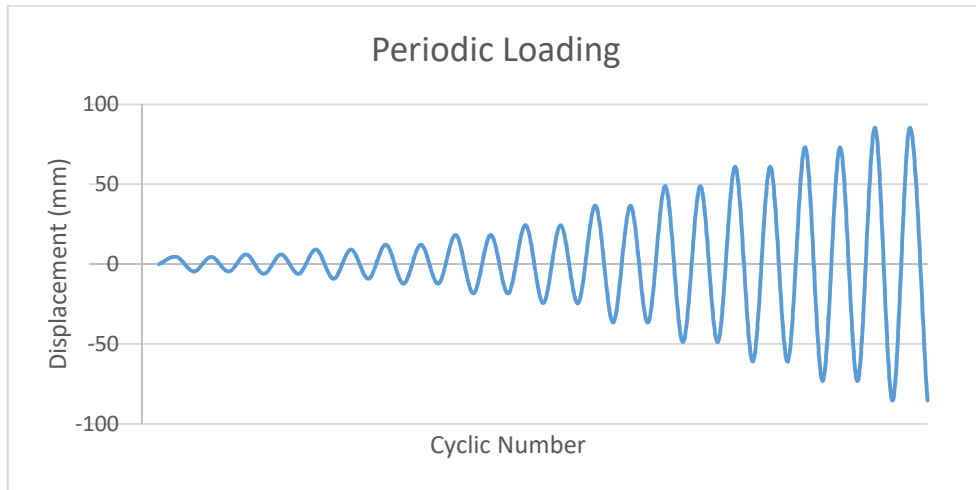
### 5. *Input* beban dan *boundary condition*

Pada elemen struktur dilakukan *input* beban luar dan beban siklik. Beban luar yang diberikan disesuaikan dengan beban yang di *input* pada Abaqus 2017 dengan tipe beban terpusat. Selain itu pada *boundary condition* juga diatur perletakan yang digunakan. Pada pembebanan siklik mengacu pada AISC.



Gambar 3.11 Pola Posisi Beban Aksial

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa beban berada pada ujung balok dengan nilai 100 kN. Ujung balok berada pada jarak sejauh 1500 mm dari permukaan kolom.



Gambar 3.12 Beban Siklik Sesuai AISC

Pada Gambar 3.10 dapat kita lihat beban siklik yang digunakan, dimana beban tersebut mengacu pada perturan yang terdapat pada AISC. Beban siklik juga berada pada ujung balok.

## 6. Meshing

Pembuatan *meshing* pada elemen struktur dimaksudkan untuk membagi elemen menjadi bagian lebih kecil sehingga analisis elemen akan lebih detail. Ada beberapa tahapan dalam *meshing* elemen, yaitu:

- Kontrol *mesh*, untuk menentukan bentuk elemen yang akan digunakan (*hex, hex-dominated, tet* dan *wedge*).
- *Element Type*, untuk menentukan jenis elemen yang digunakan (*standard, linear, quadratic*)
- *Mesh size*, untuk menentukan ukuran *mesh* yang akan dipakai. Penentuan ukuran *mesh* dapat dilakukan secara manual atau secara otomatis oleh program.

### **3.9 Analisis Pemodelan Sambungan**

Setelah sambungan dimodelkan dengan menggunakan software Abaqus 2017, dilakukan proses running atau eksekusi proses pembebanan. Hasil eksekusi pembebanan tersebut akan dianalisis, baik perilaku tegangan, regangan dan deformasi (momen-rotasi) dari tipe model sambungan dan elemen struktur yang direncanakan. Analisis gaya dilakukan untuk mempersiapkan beban maksimum yang bekerja pada sambungan serta menetapkan batasan-batasan sesuai dengan peraturan terkait. Proses running dan analisis gaya pada model sambungan tersebut dilakukan dengan iterasi berulang untuk mendapatkan konfigurasi sambungan yang daktail.

### **3.10 Kesimpulan dari Hasil Penelitian**

Berdasarkan analisa hasil pemodelan yang dilakukan pada masing-masing tipe sambungan menggunakan software Abaqus 2017, maka dapat ditarik kesimpulan ditinjau dari perilaku tegangan, regangan dan deformasi (momen rotasi) dari seluruh studi yang telah dilakukan.

## BAB 4

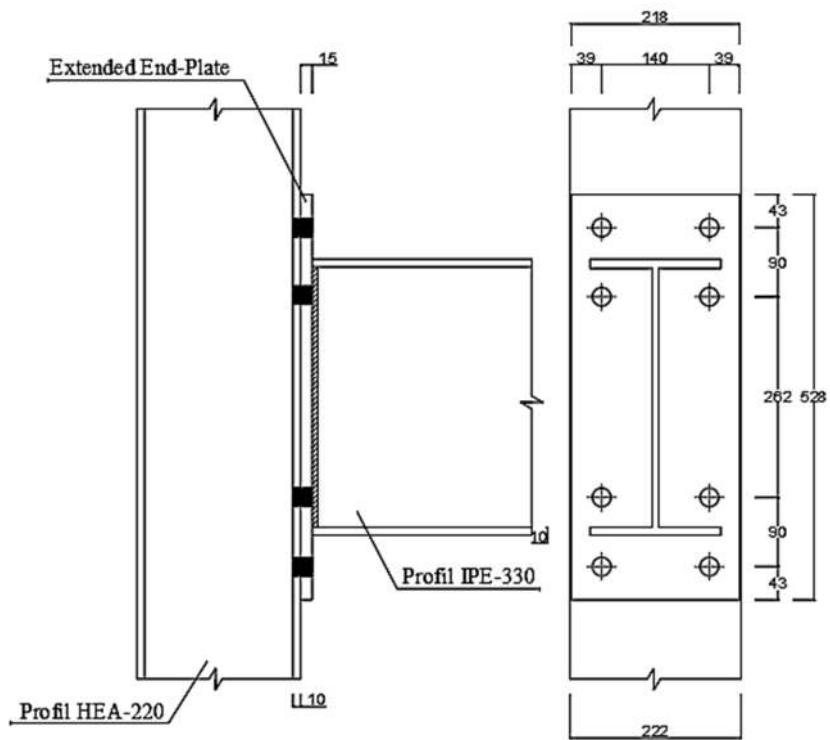
### PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Pemodelan

Pada penelitian ini, spesimen dibuat berdasarkan pada penelitian-penelitian sebelumnya dengan melakukan beberapa modifikasi. Pemodelan menggunakan program bantu Abaqus 2017 secara tiga dimensi (3D) berdasarkan dari penelitian yang dilakukan oleh Doh dkk, 2018. Spesifikasi dan ukuran diambil sesuai detail penelitian tersebut. Pada pemodelan ini digunakan balok dan kolom baja. Profil yang digunakan untuk balok ialah IPE-330 dan untuk kolom baja yaitu menggunakan profil HEA-220. Untuk pemodelan yang akan divalidasi di abaqus ialah spesimen tipe PS-1, lalu dilanjutkan pemodelan lain menggunakan ukuran *end plate* yang sedikit berbeda, dimana spesimen tipe PS-2 tidak menggunakan perpanjangan pada *end-plate* bagian kiri dan tipe PS-3 *end-plate* tidak diperpanjang pada kedua sisi. Adapun parameter yang digunakan pada pemodelan yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.1. Tabel 4.1 menunjukkan variasi spesimen yang akan akan digunakan pada metode elemen hingga menggunakan Abaqus 2017.

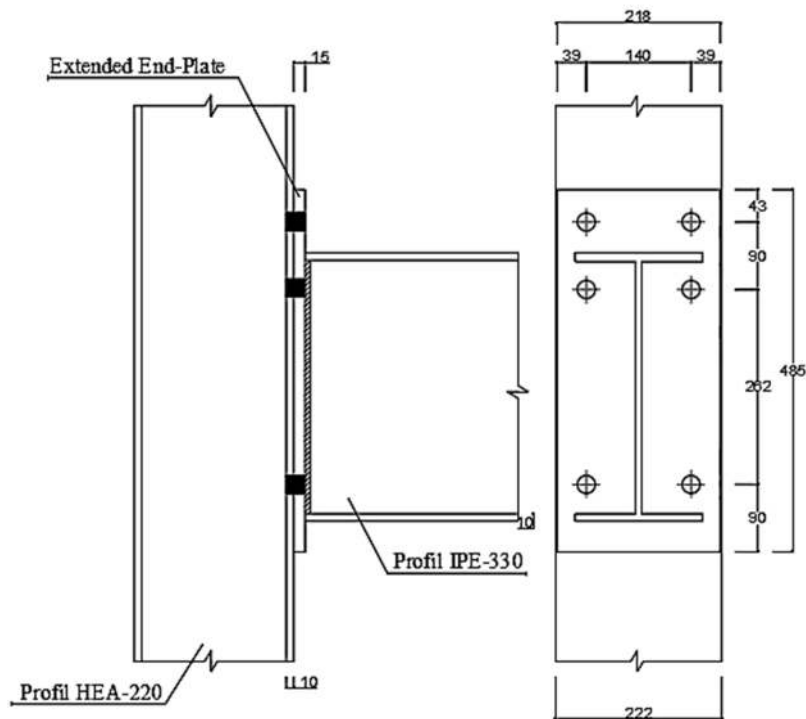
Tabel 4.1 Spesimen Pemodelan Abaqus

No.	Spesimen	Spesifikasi		
		Balok	Kolom	Sambungan
1	PS-1	360 x 170 x 12 x 8	213 x 222 x 10 x 7	Bolt = dia 20 mm
				Plate = 15 mm
				EEP = dua sisi
2	PS-2	360 x 170 x 12 x 8	213 x 222 x 10 x 7	Bolt = dia 20 mm
				Plate = 15 mm
				EEP = satu sisi
3	PS-3	360 x 170 x 12 x 8	213 x 222 x 10 x 7	Bolt = dia 20 mm
				Plate = 15 mm
				EEP = -



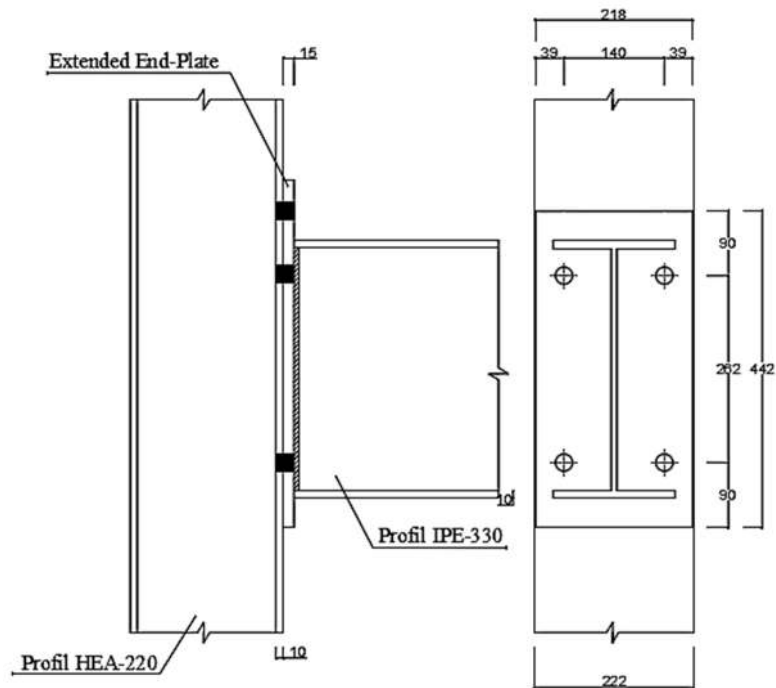
Gambar 4.1 Detail Sambungan Spesimen PS-1

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat secara detail ukuran setiap material yang digunakan, baik kolom, balok, *end-plate*, maupun bautnya. Untuk kolom menggunakan panjang 1900 mm dan balok 1500 mm. Sedangkan *end-plate* menggunakan ukuran 218 x 528 mm dengan jumlah baut ada 8 buah dengan jarak antar baut seperti pada Gambar 4.1. Untuk profil balok dan kolom tersaji dalam Table 4.1.



Gambar 4.2 Detail Sambungan Spesimen PS-2

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat secara detail ukuran setiap material yang digunakan, baik kolom, balok, *end-plate*, maupun bautnya. Untuk kolom menggunakan panjang 1900 mm dan balok 1500 mm. Sedangkan *end-plate* menggunakan ukuran 218 x 485 mm dengan jumlah baut ada 6 buah dengan jarak antar baut seperti pada Gambar 4.2. Untuk profil balok dan kolom tersaji dalam Table 4.1.



Gambar 4.3 Detail Sambungan Spesimen PS-3

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat secara detail ukuran setiap material yang digunakan, baik kolom, balok, *end-plate*, maupun bautnya. Untuk kolom menggunakan panjang 1900 mm dan balok 1500 mm. Sedangkan *end-plate* menggunakan ukuran 218 x 442 mm dengan jumlah baut ada 4 buah dengan jarak antar baut seperti pada Gambar 4.3. Untuk profil balok dan kolom tersaji dalam Table 4.1.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Doh, dkk (2018) digunakan untuk memverifikasi atau mengoreksi hasil dari pemodelan yang dilakukan agar hasil pemodelan dapat dikontrol terhadap hasil penelitian yang sudah ada.

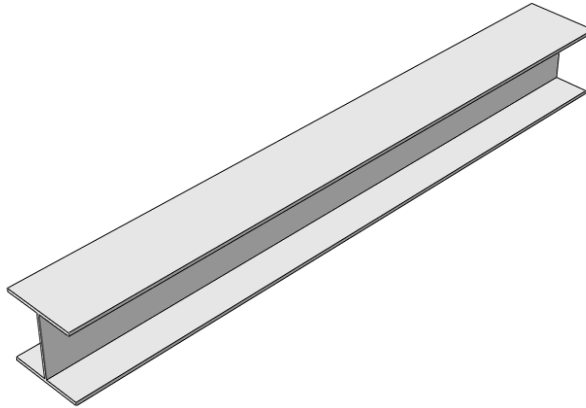
## 4.2 Metode *Finite Element*

### 4.2.1. Pemodelan

Pemodelan yang dilakukan pada program bantu Abaqus 2017 dengan solid 3D. Pemodelan menggunakan welded plate I shaped. Pemodelan balok - kolom baja dan bolts dimodelkan dengan tahapan sebagai berikut ini :

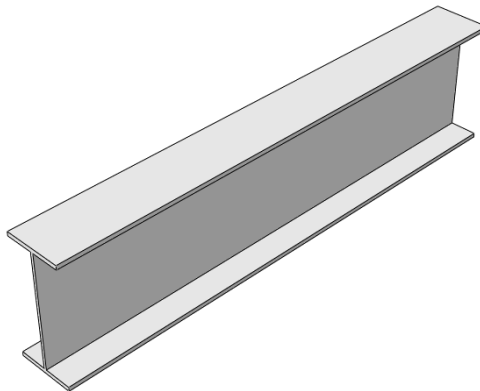
### 1. Parts

Pembuatan bentuk elemen yang akan digunakan dalam penelitian ini dilakukan pada tahap ini. Adapun tahapannya dimulai dengan membuat sketsa section cut dan panjang elemen tersebut. Elemen-elemen yang akan digunakan dalam penelitian ini dapat terlihat pada Gambar 4.4 sampai 4.7.



Gambar 4.4 Pemodelan Kolom Profil I

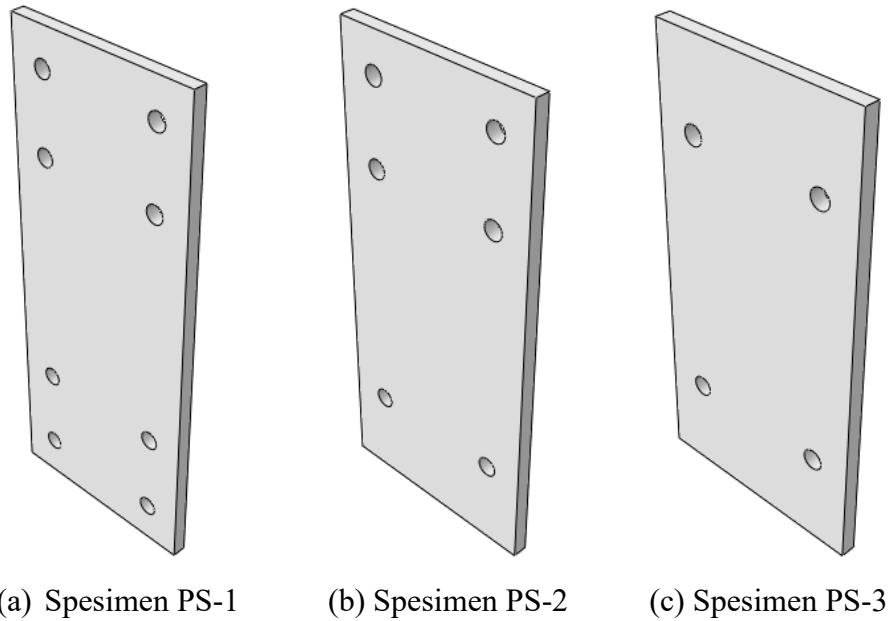
Modul geometri pemodelan kolom dibuat pada modul part menggunakan *Solid-Extrusion*. Dengan ukuran profil I – 213 x 222 x 10 x 7 mm. Kolom dimodelkan dengan panjang 1900 mm.



Gambar 4.5 Pemodelan Balok Profil I, L=1500 mm

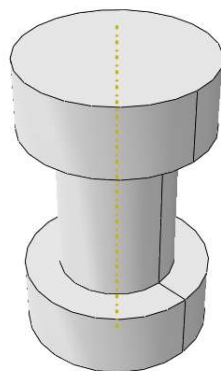
Modul geometri pemodelan balok dibuat pada modul part menggunakan *Solid-Extrusion*. Dengan ukuran profil I – 360 x 170 x 12 x 8 mm. Balok dimodelkan dengan panjang 1500 mm.





Gambar 4.6 Pemodelan *End Plate*,  $t=15$  mm

Gambar 4.6 menunjukkan ukuran *end-plate* pada ketiga specimen. Modul geometri pemodelan *end-plate* dibuat pada modul part menggunakan *Solid-Extrusion*. Bisa dilihat ada perbedaan ukuran dan jumlah lubang baut antara satu dengan yang lainnya. Untuk variasi specimen PS-1 ukuran *end-plate* 218 x 528 mm, PS-2 dengan ukuran *end-plate* 218 x 485 mm, dan PS-3 dengan ukuran *end-plate* 218 x 442 mm. Tebal *end-plate* untuk ketiga variasi specimen ialah 15 mm.



Gambar 4.7 Pemodelan Baut  $d = 20$  mm

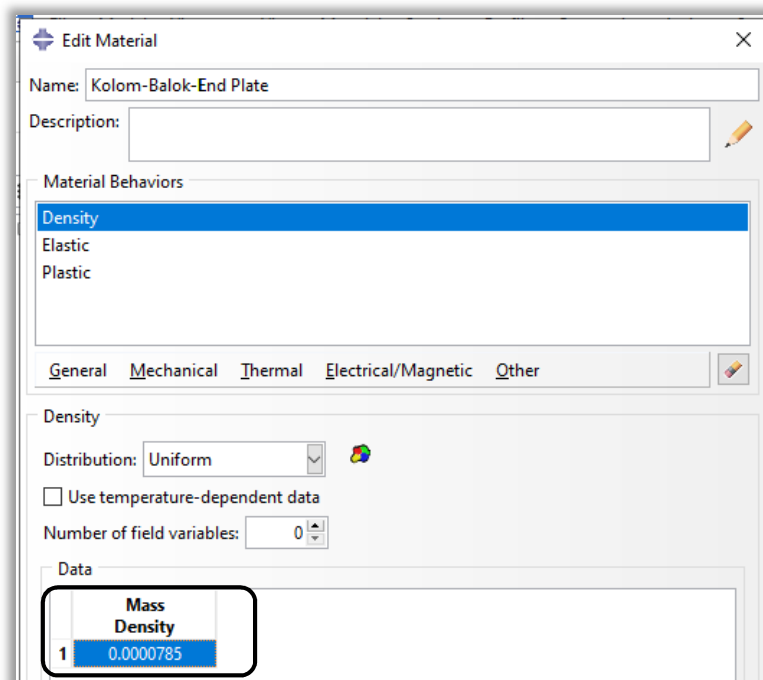
Gambar 4.7 menunjukkan pemodelan baut pada Abaqus 2017. Modul geometri pemodelan baut dibuat pada modul part menggunakan *Solid-Extrusion*. Adapun ukuran baut menggunakan diameter 20 mm dengan panjang 27 mm.

## 2. Property

Pembuatan jenis bahan/material yang akan digunakan dalam penelitian ini dilakukan pada tahap ini. Tahapan dimulai dengan perincian perilaku material (Tabel 3.3), seperti nilai tegangan leleh (*yield*) dan maksimum (*ultimate*), beserta regangannya.

### a) Density

*Density* merupakan berat jenis dari material yang dimodelkan. Material dalam model ini adalah baja dengan nilai  $\text{density} = 7850 \text{ kg/m}^3 = 7.85 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$ .

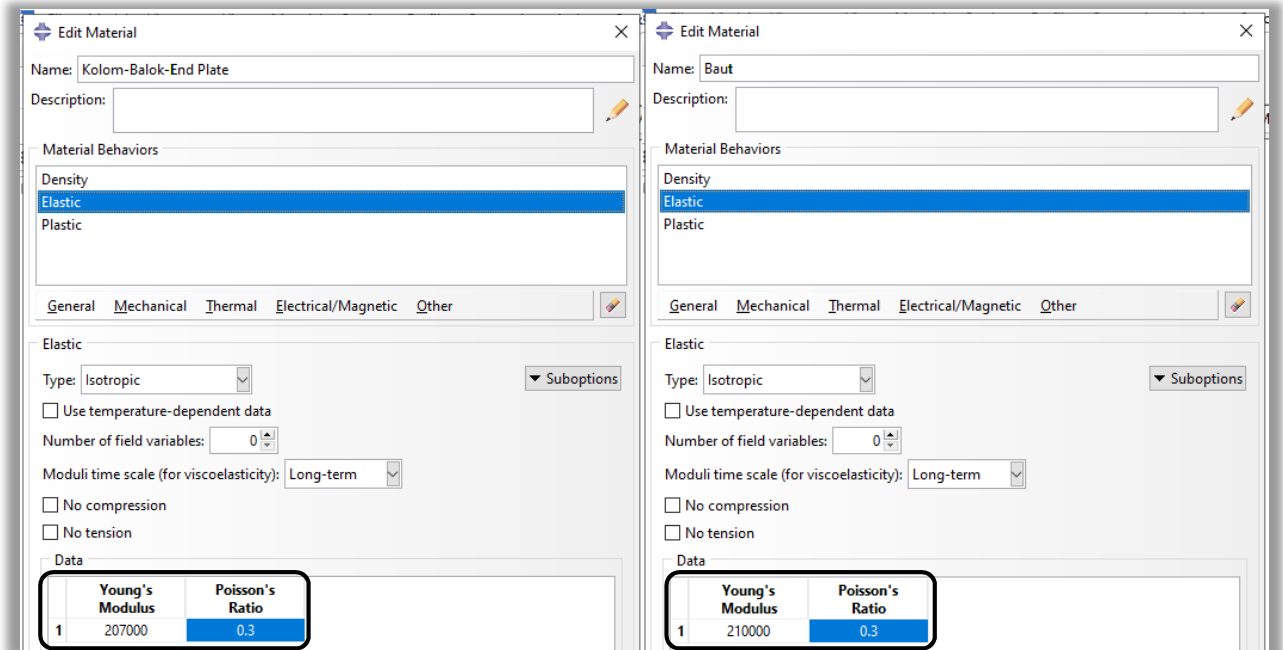


Gambar 4.8 Input Nilai *Density*

Gambar 4.8 menunjukkan input material *Density* pada program bantu Abaqus 2017 dengan nilai 0.0000785. Adapun nilai *density* seragam untuk semua material.

b) *Elastic*

Nilai yang akan dimasukkan pada *property elastic* adalah nilai modulus elastisitas dan rasio poisson ditunjukkan pada Gambar 4.9.

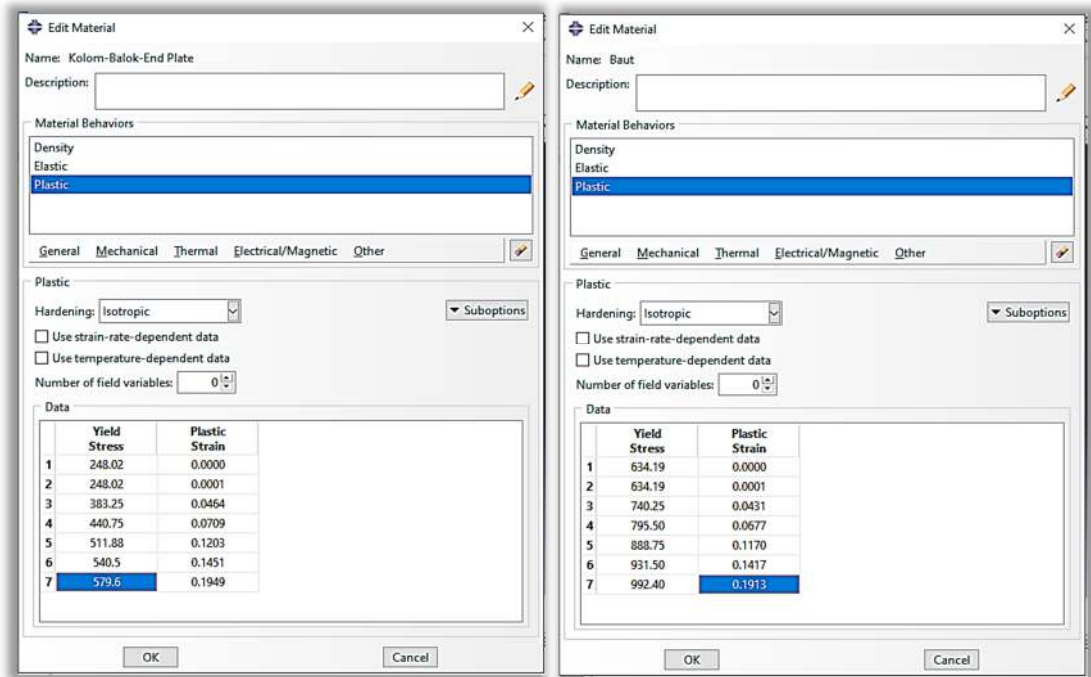


Gambar 4.9 Input Material *Elastic*

Pada Gambar 4.9 diinput nilai modulus elastisitas untuk kolom, balok, dan *end-plate* sebesar 207.000 MPa, dan untuk baut sebesar 210.000 MPa. Nilai rasio poisson seragam sebesar 0.3.

c) *Plastic*

Pada tahap ini, diinput nilai tegangan-regangan pada modul *property plastic*. Nilai tegangan leleh pada kolom, balok, dan *end-plate* sebesar 248 MPa dan untuk baut sebesar 634 MPa. Data tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Doh, dkk (2018).

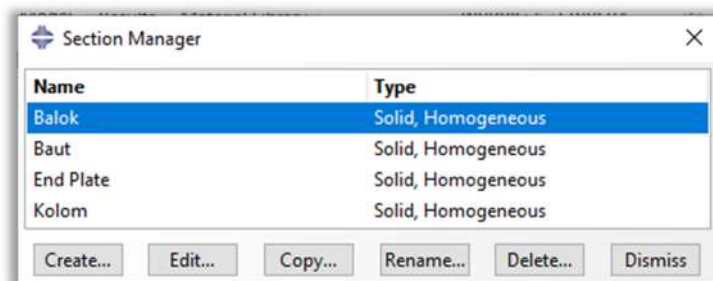


Gambar 4.10 Input Material *Plastic*

Untuk nilai yield stress dan *plastic strain* diinput berdasarkan tabel 3.4 dan 3.5. Untuk material baja saat *Yield Stress* = 248.02 MPa maka *Plastic Strain* = 0.0001, saat *Yield Stress* = 579.6 MPa maka *Plastic Strain* = 0.1949. Untuk material baut saat *Yield Stress* = 634.19 MPa maka *Plastic Strain* = 0.0003, saat *Yield Stress* = 992.40 MPa maka *Plastic Strain* = 0.1913.

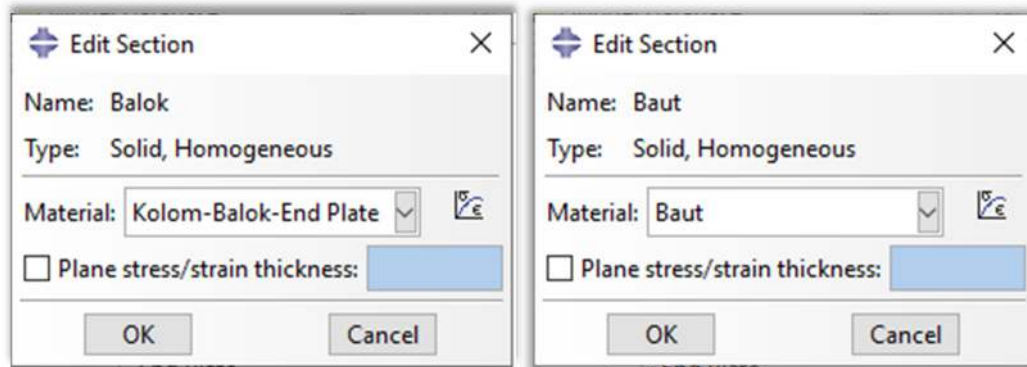
d) *Assign Section*

Pada tahap ini, material yang didefinisikan ditempatkan pada *part* sesuai dengan rencana pemodelan.



Gambar 4.11 *Section Manager*

Gambar 4.11 menunjukkan modul *Section Manager*. *Assign section* untuk profil I, *end-plate*, dan baut adalah *Solid – Homogeneous*.

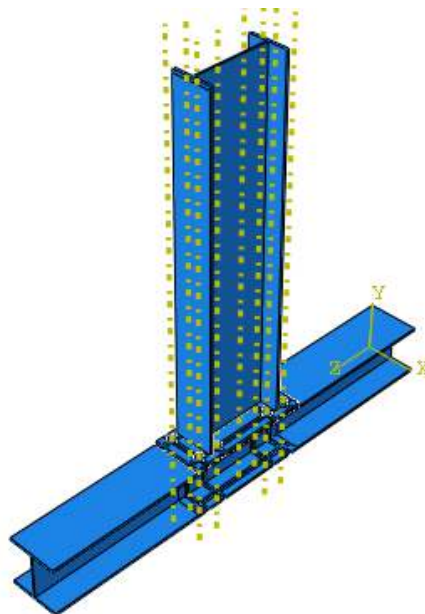


Gambar 4.12 Input *Property* Pada *Part*

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa geometri pada *part* telah dimasukkan pada properti material yang sesuai dan siap untuk dirangkai atau digabungkan menjadi satu kesatuan.

#### 4.2.2. Modul *Assembly*

*Part* yang telah dibuat, digabungkan menjadi satu kesatuan pemodelan. Untuk pemodelan las, digunakan jenis interaction berupa *tie constraint*.

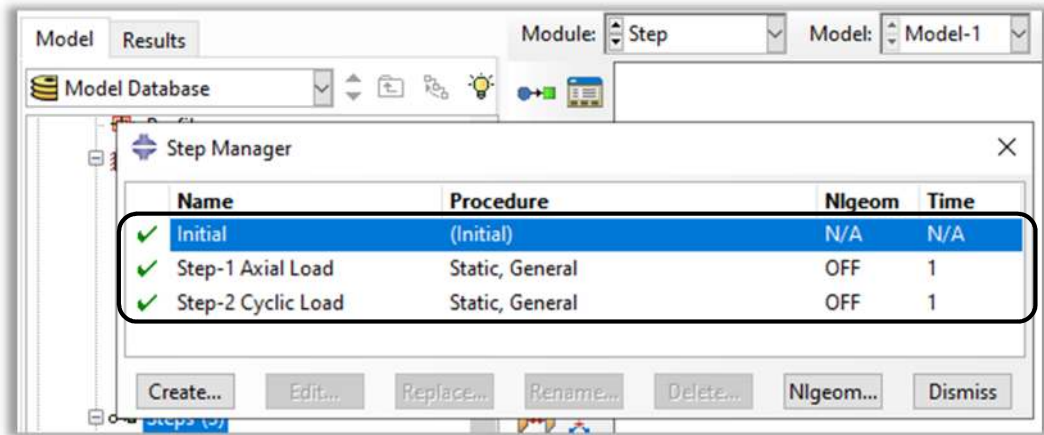


Gambar 4.13 *Layout* Sambungan Hasil *Assembly*

Gambar 4.13 menunjukkan penyatuan semua elemen material baik kolom, balok, *end-plate* dan baut. Pada modul *assembly* diatur pula posisi yang tepat untuk setiap elemen dengan koordinat yang diperhitungkan sebelumnya.

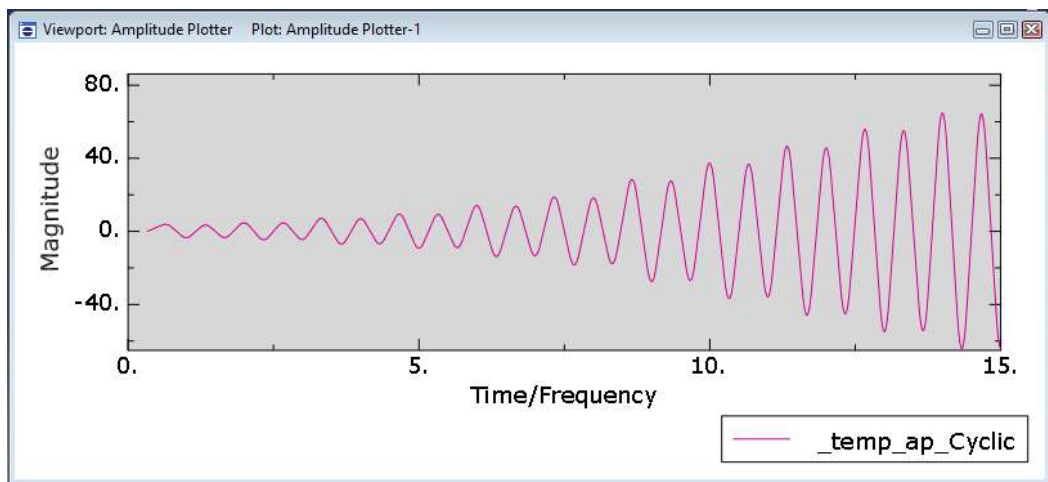
### 4.2.3. Pembebanan

Pembebanan yang terjadi pada pemodelan sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan. Untuk pembebanan menggunakan 2 variasi beban, yaitu gaya aksial dan beban siklik. Sebelum memasukkan pembebanan, pemodelan dimasukkan modul step. Pada modul ini analisis step diciptakan dan kemudian dikonfigurasi.



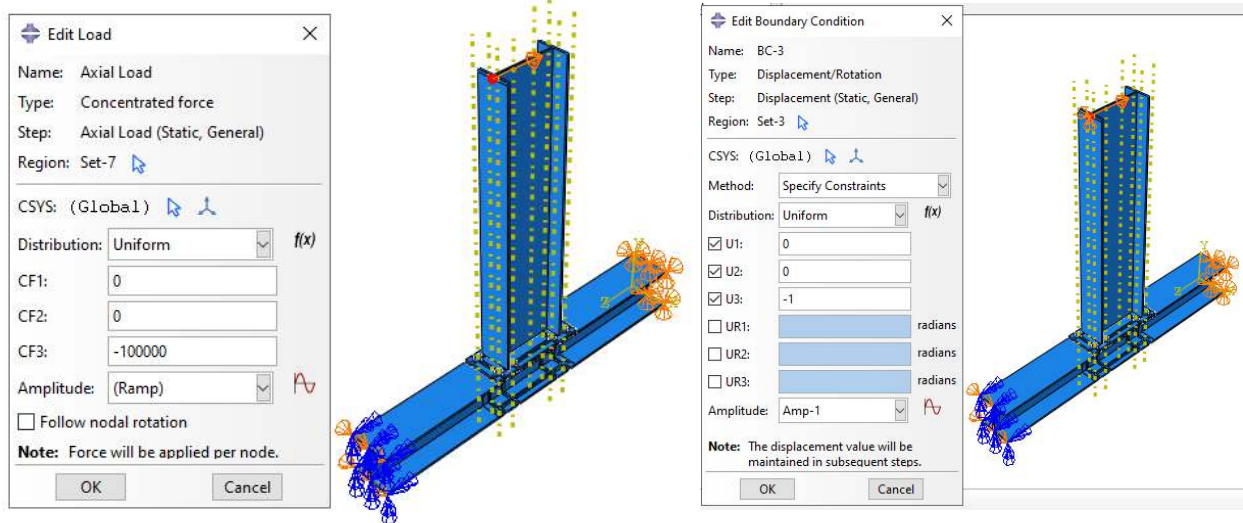
Gambar 4.14 Step Pada Pemodelan Abaqus

Prosedur yang dipakai pada modul step ialah *static, general*. Selain itu *output request* juga dapat dikonfigurasi di sini sesuai kebutuhan.



Gambar 4.15 Beban Siklik Pada Pemodelan Abaqus

Gambar 4.15 menunjukkan pemberian beban siklik yang dilakukan pada pemodelan. Beban siklik dimasukkan pada modul *Amplitudes*. Setelah modul step, pembebanan dimasukkan sesuai dengan variasi bebannya.



(a) Concentrated Load

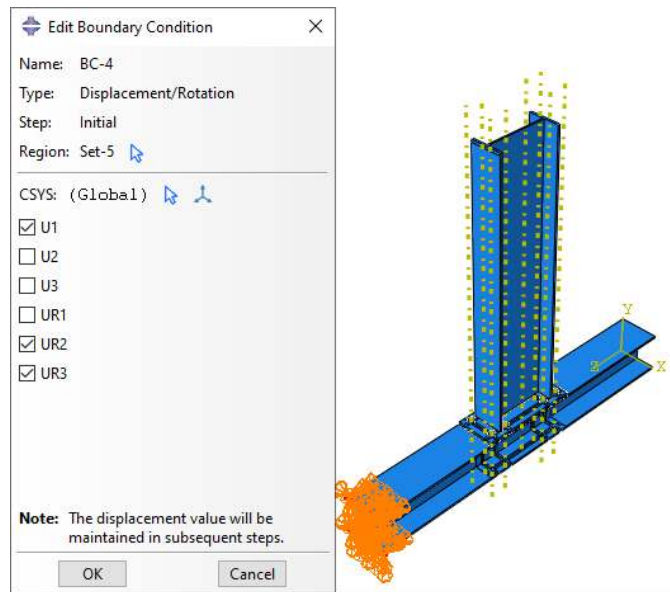
(b) Displacement/Rotation

Gambar 4.16 Input Beban Pada Pemodelan Abaqus

Untuk gaya aksial yang berada di ujung balok sebesar 100 kN, sedangkan untuk beban siklik ( $P, \Delta$ ) juga berada pada ujung balok. Prosedur pembebanan aksial seperti pada Gambar 4.15. Pada ujung balok diberi beban siklik sesuai data pembebanan siklik. Pada program Abaqus 2017, gaya aksial dimodelkan dengan *concentrated load* di ujung balok ditunjukkan pada Gambar 4.16 (a). Beban siklik dimodelkan dengan *displacement/rotation* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 (b).

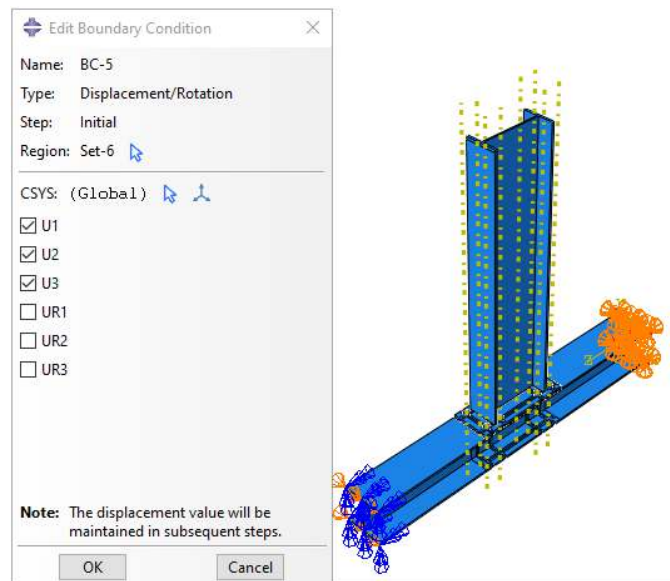
#### 4.2.4. Boundary Condition

Boundary condition atau perletakan yang digunakan adalah rol dan sendi. Perletakan sendi berada pada sisi kiri, sedangkan sisi rol sebaliknya pada kolom. Pada program Abaqus 2017 memilih modul *boundary condition* dengan mengunci arah X untuk perletakan rol, dan mengunci arah X, Y, dan Z. Pada Gambar 4.17 sampai dengan 4.18 ditampilkan langkah pembuatan Boundary Condition.



Gambar 4.17 Proses *Boundary Condition* Pada Program Abaqus

Pada Gambar 4.17 ditunjukkan perletakan sendi dengan mengunci arah X. Tipe *boundary condition* yang digunakan ialah *Displacement/Rotation*.



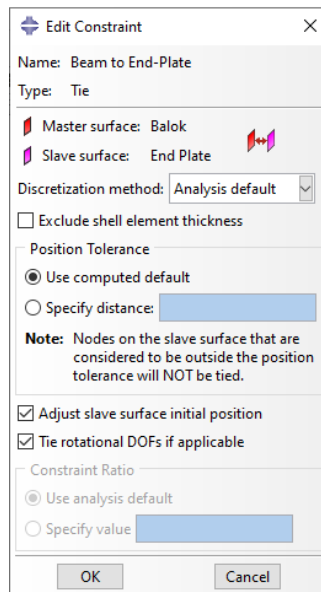
Gambar 4.18 Proses *Boundary Condition* Pada Program Abaqus

Pada Gambar 4.18 ditunjukkan perletakan rol dengan mengunci arah X,Y, Z. Tipe *boundary condition* yang digunakan ialah *Displacement/Rotation*.



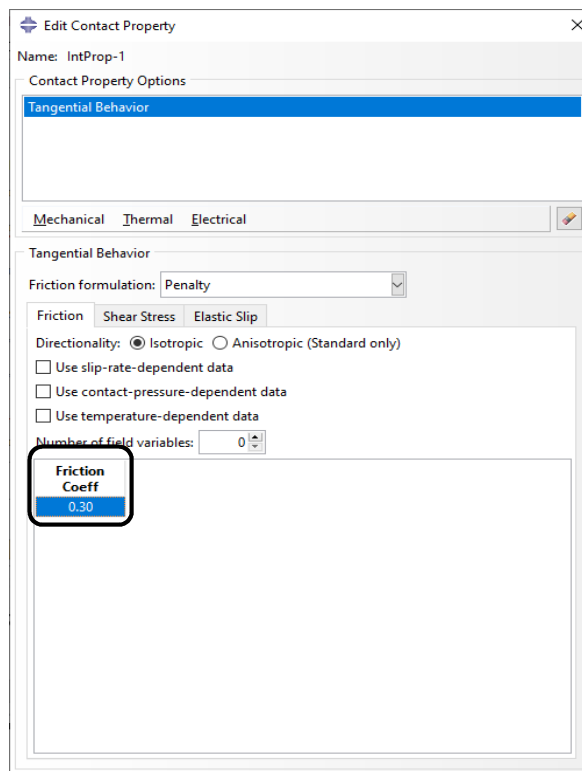
#### 4.2.5. Interaction

Modul *Interaction* berfungsi untuk menentukan bidang kontak atau jenis interaksi yang dialami pemodelan. Berikut ini gambar hubungan interaksi yang terdapat pada seluruh elemen yang digunakan.



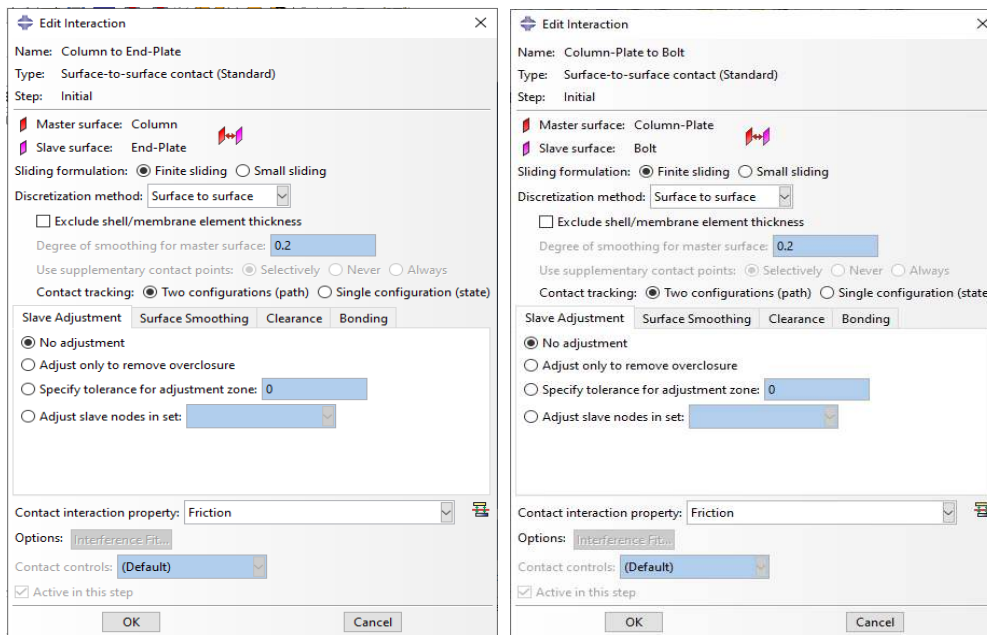
Gambar 4.19 *Tie Constraint* Antara Balok dan *End-Plate*

Interaksi pada balok dengan *end-plate* menggunakan *constraints-tie* karena hubungan diantaranya bekerja secara utuh tanpa adanya slip yang terjadi. Interaksi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.19.



Gambar 4.20 *Contact Property* Untuk Elemen Tersambung

Sedangkan untuk interaksi pada *flange* kolom dengan *end-plate*, baut dengan bagian atas dan dalam pada *end-plate* dan *flange* kolom menggunakan *surface to surface* dan terjadi slip yang dengan koefisien sebesar 0.30 seperti ditunjukkan Gambar 4.20 yang mengacu pada SNI 1729-2002.

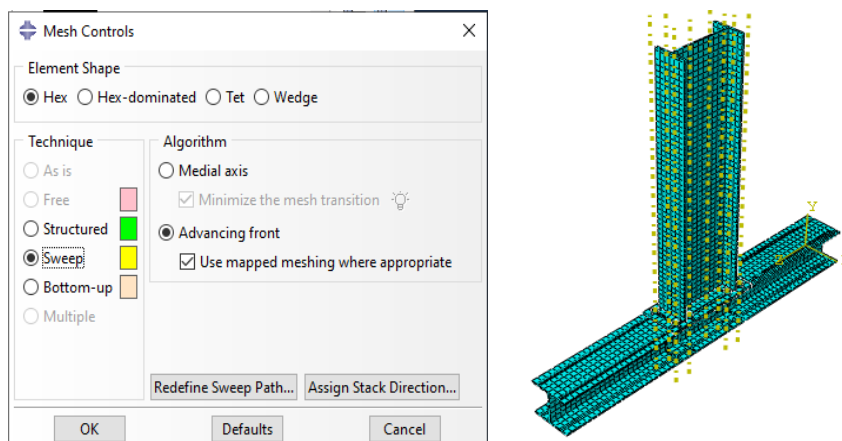


Gambar 4.21 Modul *Interaction* Antara Baut Dengan Kolom dan *End-Plate*

Gambar 4.21 menunjukkan interaksi pada *flange* kolom dengan *end-plate*, baut dengan bagian atas dan dalam pada *end-plate* dan *flange* kolom menggunakan *surface to surface*.

#### 4.2.6. *Mesh*

Mesh berfungsi membagi geometri pemodelan menjadi node dan elemen. Pada modul mesh, dapat menentukan jenis mesh yang akan digunakan serta mengontrol jenis mesh yang diberikan pada pemodelan.

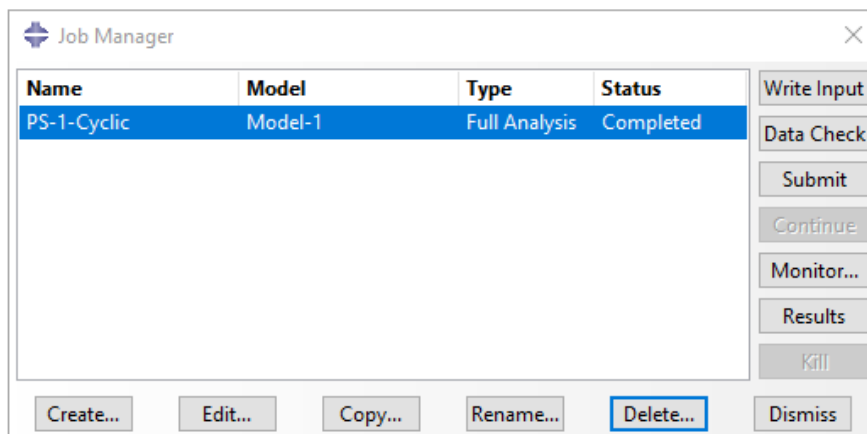


Gambar 4.22 Proses Pada Modul *Mesh* Pada Program Abaqus

Jenis mesh yang digunakan pada pemodelan adalah Hex. Pemilihan jenis mesh dapat dilihat pada Gambar 4.22.

#### 4.2.7. Job

Modul *Job* berfungsi untuk mendeskripsikan model kemudian melakukan analisa numerik. Pada modul ini bisa dikontrol apakah simulasi yang dilakukan berhasil atau tidak. Jika terjadi *Aborted message* di dalam *prompt area* maka bisa kembali ke modul sebelumnya untuk memperbaiki kesalahan yang terjadi selama proses iterasi numerik.

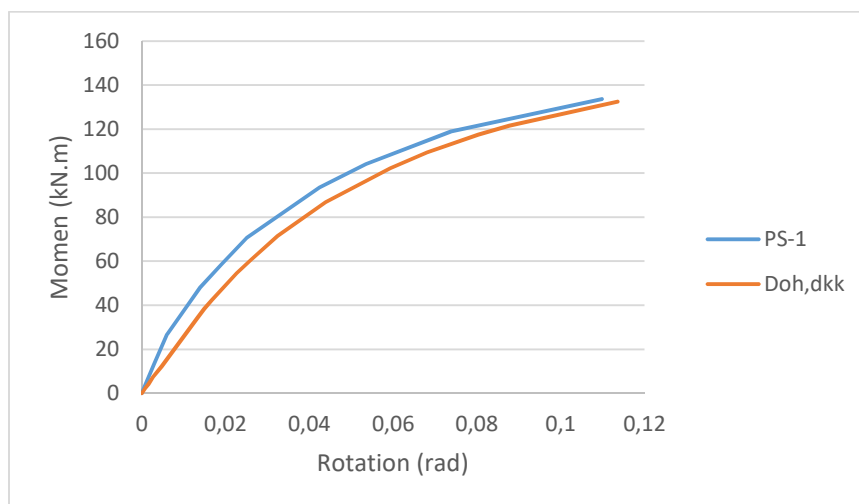


Gambar 4.23 *Job Manager* Pada Pemodelan Abaqus

Pada Job manager terlihat bahwa pekerjaan sudah menunjukkan status *Completed*. Artinya bahwa pekerjaan sudah selesai dan siap untuk dianalisa hasilnya.

### 4.3 Verifikasi Dengan Penelitian Sebelumnya

Spesimen yang akan diverifikasi dengan penelitian Doh, dkk (2018) hanya spesimen PS-1 dengan dimodelkan menggunakan program bantu *finite element*. Specimen PS-1 dimodelkan dengan hanya menggunakan beban aksial sebesar 100 kN. Hasil pemodelan dengan program bantu *finite element* (Abaqus 2017) merupakan sebuah pendekatan. Sehingga hasilnya tidak sama persis dengan hasil penelitian sebelumnya. Berikut ini disajikan grafik Momen-Rotasi sebagai verifikasi dengan penelitian sebelumnya.



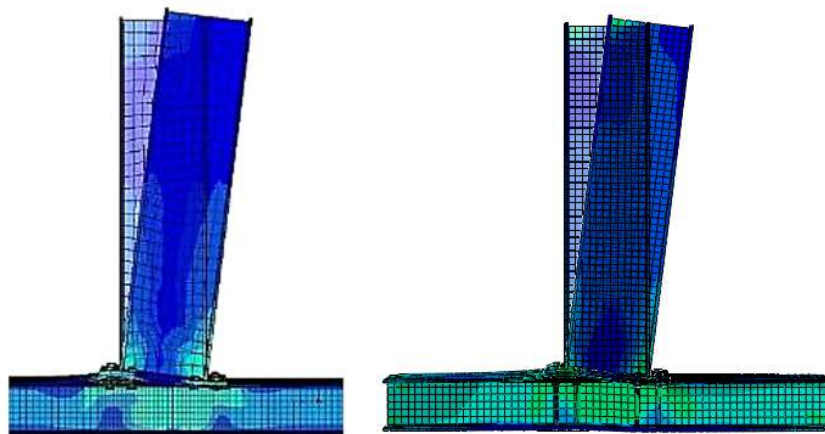
Gambar 4.24 Grafik Momen – Rotasi Verifikasi

Jika dilihat dari grafik pada Gambar 4.24 dapat disimpulkan bahwa secara umum kedua grafik mempunyai tren yang sama. Dari grafik tersebut dapat dilihat pula bahwa nilai momen hasil pemodelan PS-1 lebih besar jika dibandingkan dengan hasil pemodelan Doh,dkk mulai awal hingga akhir pembebanan, namun perbedaannya tidak signifikan.

Tabel 4.2 Verifikasi Eksperimen dan Pemodelan PS-1

No	Variasi	Momen-Rotasi	
		Mmax (kN.m)	$\Theta$ (rad)
1	Eksperimen	132.45	0.1137
2	PS-1	133.65	0.1098
<b>Selisih</b>		<b>1.2</b>	<b>0.0039</b>

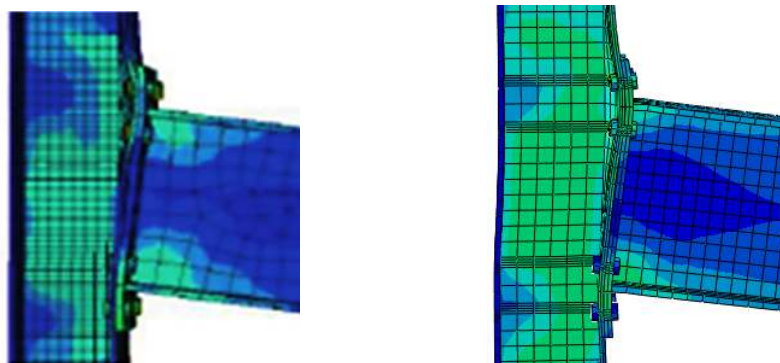
Pada Tabel 4.2 di atas menunjukkan nilai perbedaan antara penelitian sebelumnya dengan pemodelan tipe PS-1. Terdapat selisih nilai momen maksimum sebesar 1.2 kN dan nilai rotasi sebesar 0.0039 rad.



(a) Eksperimen Doh,dkk (2018)      (b) Pemodelan PS-1

Gambar 4.25 Perbandingan S-Mises Antara Eksperimen dengan PS-1

Jika dilihat pada Gambar 4.25, maka distribusi tegangan yang terjadi memiliki pola yang hampir sama. Balok menekuk ke arah kanan karena adanya beban yang bekerja pada ujung balok sebesar 100 kN.

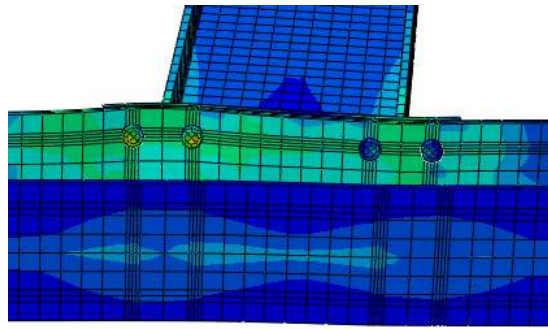


(a) Eksperimen Doh,dkk (2018)

(b) Pemodelan PS-1

Gambar 4.26 Perbandingan Detail Sambungan Antara Eksperimen dengan PS-1

Pada Gambar 4.26 dapat kita lihat bahwa pada sambungan baut bagian atas mengalami tarik, sedangkan baut bagian bawah mengalami tekan. Hal ini diakibatkan adanya beban yang bekerja pada ujung balok sebesar 100 kN.



Gambar 4.27 Mode Kegagalan Verifikasi PS-1

Gambar 4.27 menunjukkan mode kegagalan verifikasi PS-1 dimana kegagalan terjadi pada baut sisi kiri. Kegagalan pada baut terjadi akibat beban yang bekerja pada sambungan sebesar 100 kN.

Jika dilihat dari hasil validasi model yang disajikan pada grafik pada Gambar 4.24 dan Tabel 4.2, maka pemodelan selanjutnya dapat dilakukan dengan menggunakan variasi yang lain menggunakan beban siklik.

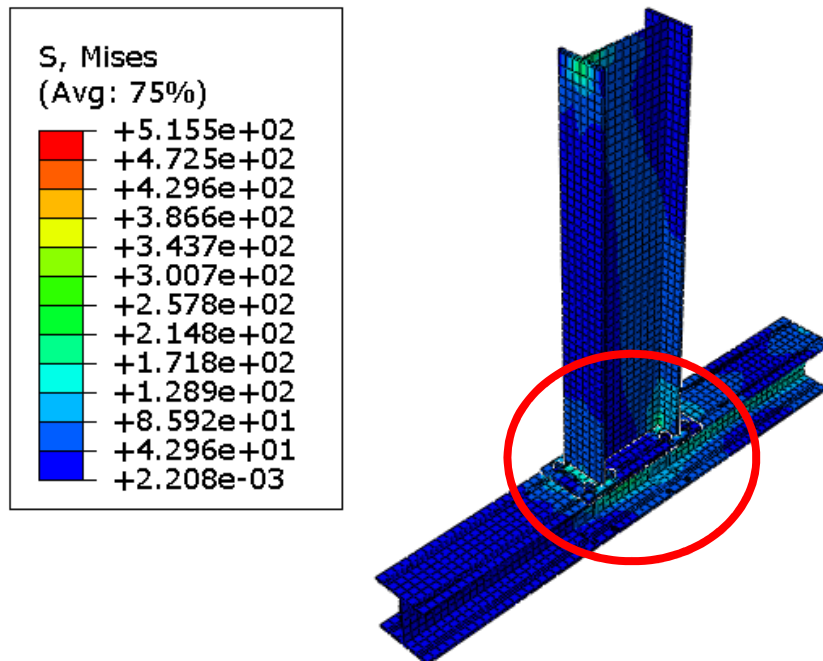
#### 4.4 Hasil Pemodelan Sambungan Menggunakan Program bantu Abaqus

2017

Pada sub-bab ini akan disajikan hasil hasil distribusi tegangan pada masing-masing tipe sambungan untuk PS-1, PS-2, dan PS-3 dengan menggunakan program bantu *finite element*. Untuk pemodelan lanjutan menerapkan beban aksial sebesar 100 kN dan beban siklik sesuai dengan Gambar 4.15. Beban terletak pada ujung balok.

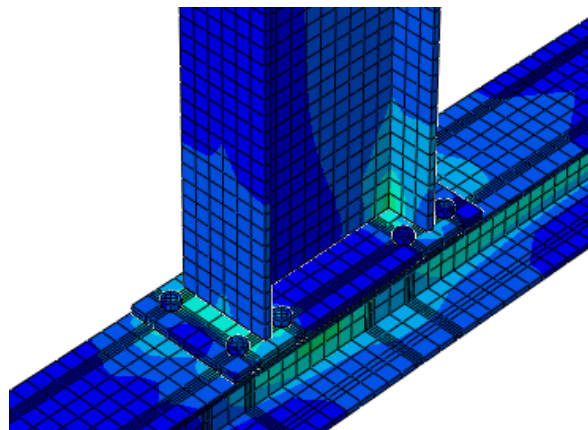
##### 4.4.1 Distribusi Tegangan Akibat Beban Siklik Pada Spesimen PS-1

Gambar di bawah ini menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi akibat beban siklik pada model sambungan tipe PS-1 pada step 88 dan 460.



Gambar 4.28 Hasil *S-Mises* Step 88 Pada Spesimen PS-1

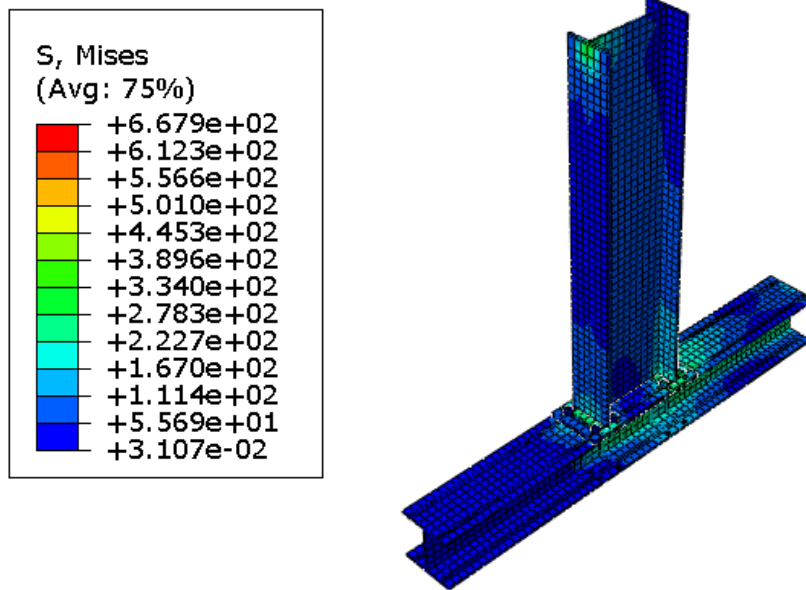
Gambar 4.28 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-1 saat leleh pertama secara keseluruhan. Pendetailan sambungan PS-1 pada saat leleh pertama dapat dilihat pada Gambar 4.29



Gambar 4.29 Hasil *S-Mises* Step 88 Pada Pendetailan PS-1

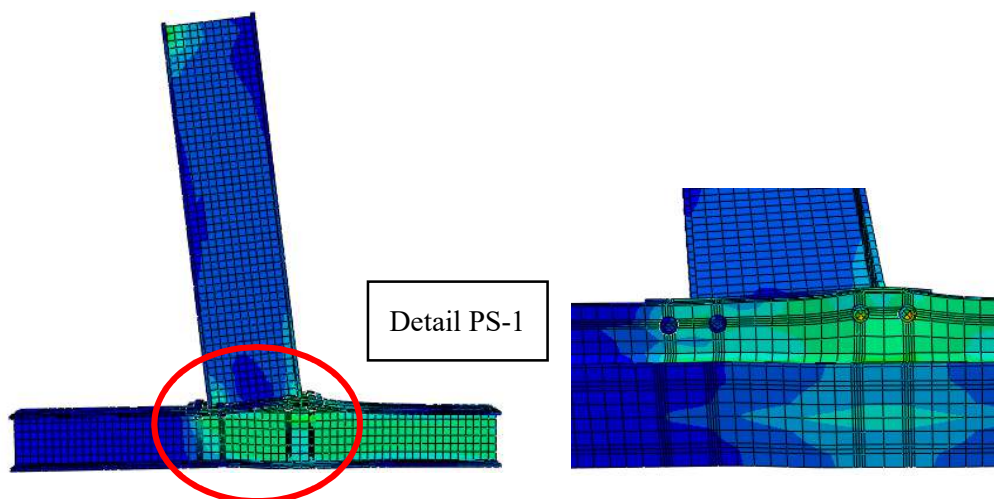
Gambar 4.29 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-1 secara detail pada area sambungan. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa model sambungan PS-1 mengalami leleh pertama di daerah *web* kolom pada step 88 saat *displacement* mencapai 12.196 mm.





Gambar 4.30 Hasil S-Mises Step 460 Pada Spesimen PS-1

Gambar 4.30 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-1 saat saat step 460. Pendetailan sambungan PS-1 pada saat step 460 dapat dilihat pada Gambar 4.31

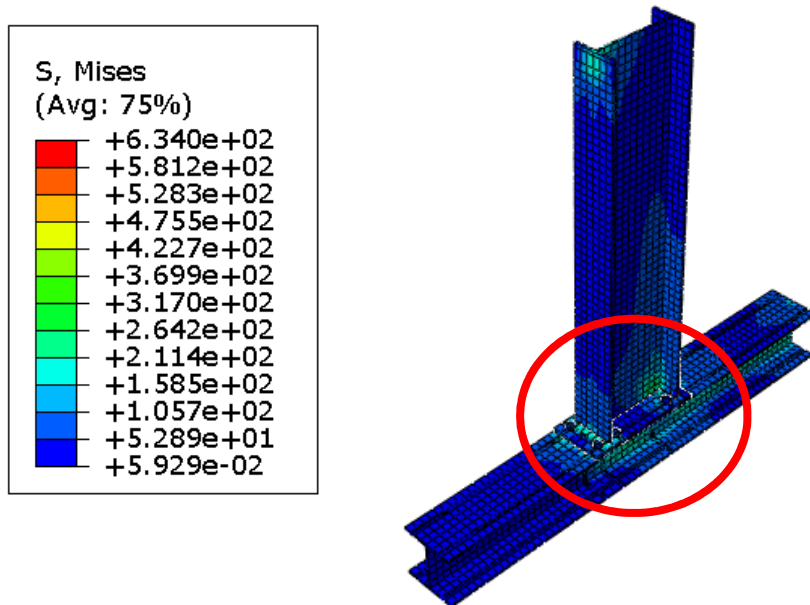


Gambar 4.31 Hasil *S-Mises* Step 460 Pada Pendetailan PS-1

Gambar 4.31 di atas menunjukkan distribusi tegangan dan mode kegagalan specimen PS-1 pada step 460, dimana terjadi gagal di baut yang ditandai dengan tercapai tegangan ultimate sebesar 667.9 MPa pada baut tersebut saat *displacement* mencapai 48.580 mm.

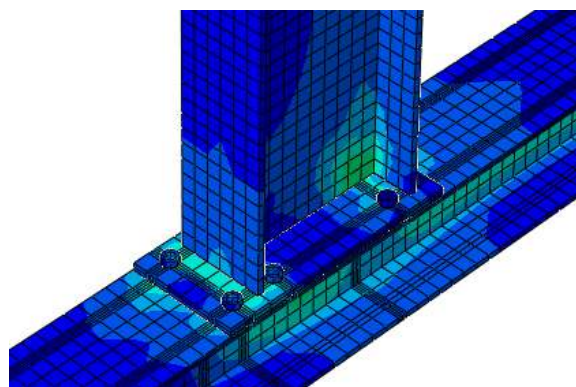
#### 4.4.2 Distribusi Tegangan Akibat Beban Siklik Pada Spesimen PS-2

Gambar di bawah ini menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi akibat beban siklik pada model sambungan tipe PS-2 pada step 130 dan 555.



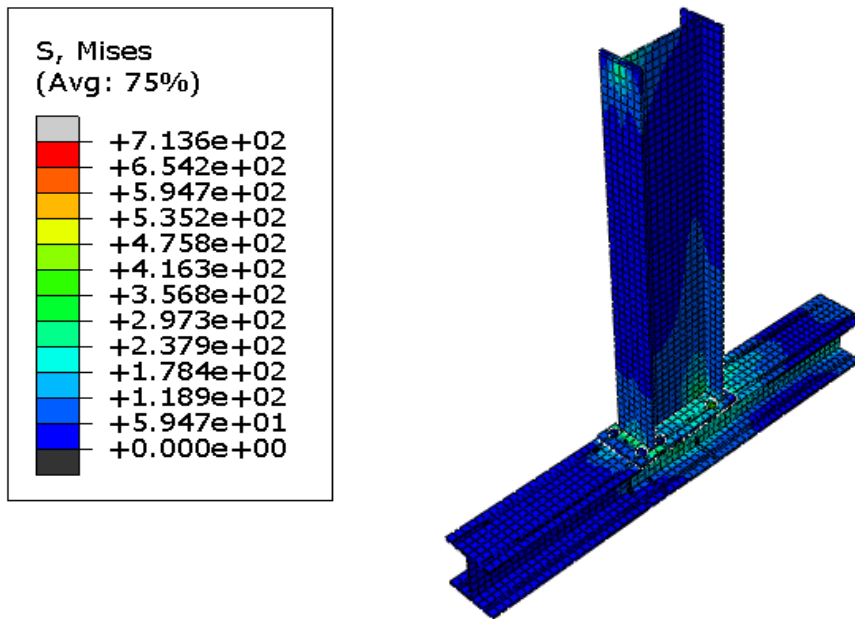
Gambar 4.32 Hasil *S-Mises* Step 130 Pada Spesimen PS-2

Gambar 4.32 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-2 saat leleh pertama secara keseluruhan. Pendetailan sambungan PS-2 pada saat leleh pertama dapat dilihat pada Gambar 4.33



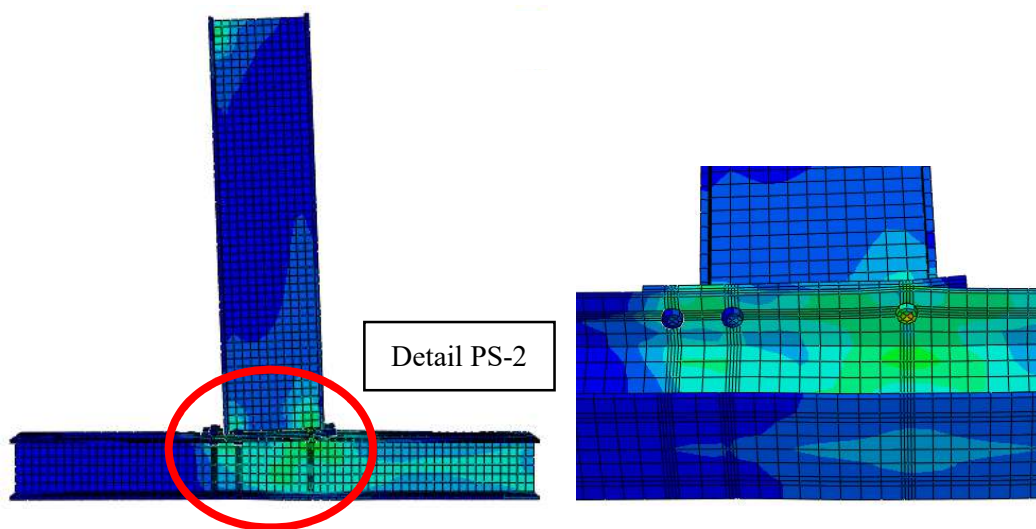
Gambar 4.33 Hasil *S-Mises* Step 130 Pada Pendetailan PS-2

Gambar 4.33 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-2 secara detail pada area sambungan. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa model sambungan PS-2 mengalami leleh pertama di daerah *web* kolom pada step 130 saat *displacement* mencapai 17.996 mm.



Gambar 4.34 Hasil *S-Mises* Step 555 Pada Spesimen PS-2

Gambar 4.34 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-2 saat saat step 555. Pendetailan sambungan PS-2 pada saat step 555 dapat dilihat pada Gambar 4.35

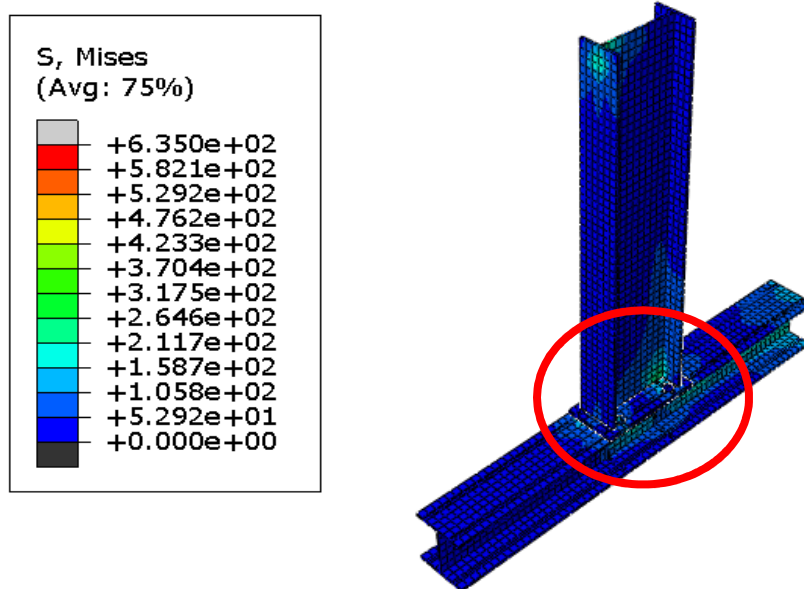


Gambar 4.35 Hasil *S-Mises* Step 555 Pada Pendetailan PS-2

Gambar 4.35 di atas menunjukkan distribusi tegangan dan mode kegagalan specimen PS-2 pada step 555, dimana terjadi gagal di baut yang ditandai dengan tercapai tegangan ultimate sebesar 713.6 MPa pada baut tersebut saat *displacement* mencapai 58.749 mm.

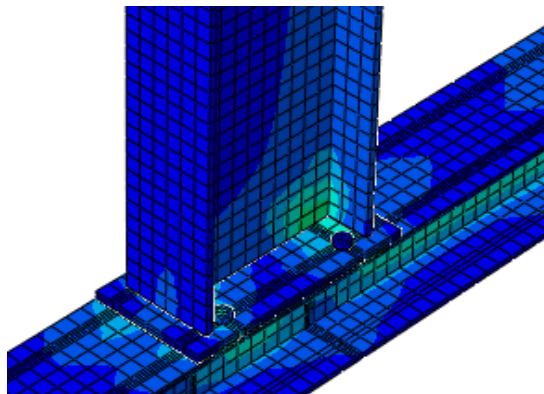
#### 4.4.3 Distribusi Tegangan Akibat Beban Siklik Pada Spesimen PS-3

Gambar di bawah ini menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi akibat beban siklik pada model sambungan tipe PS-2 pada step 186 dan 684.



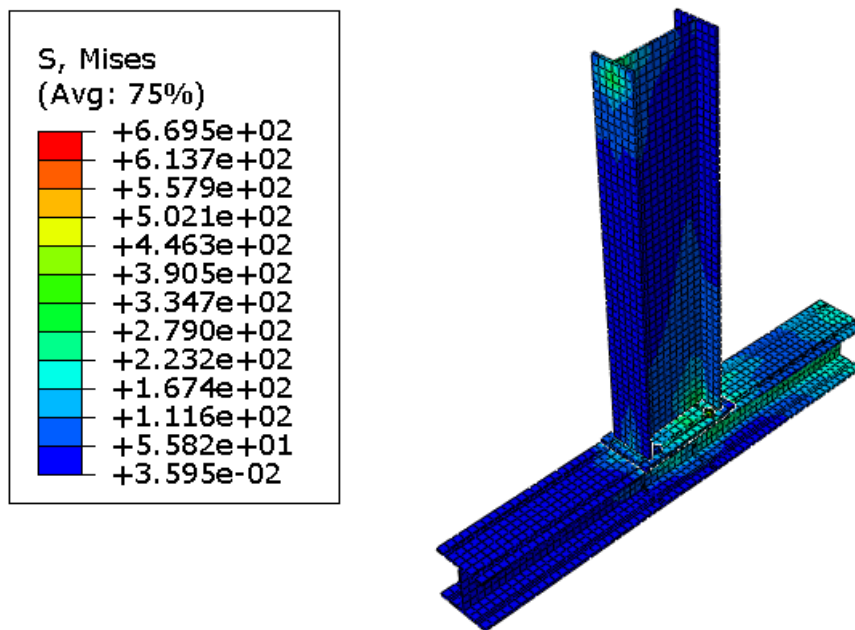
Gambar 4.36 Hasil *S-Mises* Step 186 Pada Spesimen PS-3

Gambar 4.36 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-3 saat leleh pertama secara keseluruhan. Pendetailan sambungan PS-3 pada saat leleh pertama dapat dilihat pada Gambar 4.37



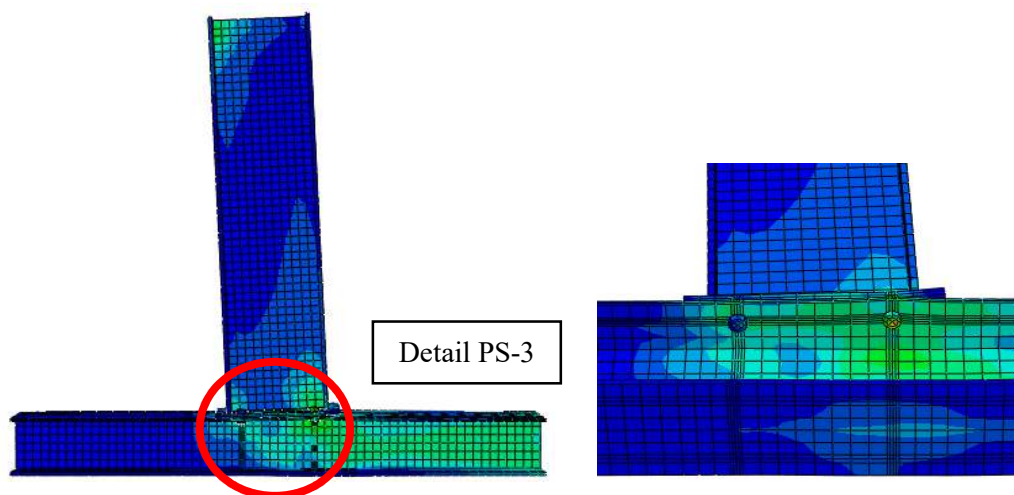
Gambar 4.37 Hasil *S-Mises* Step 186 Pada Pendetailan PS-3

Gambar 4.37 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-3 secara detail pada area sambungan. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa model sambungan PS-3 mengalami leleh pertama di daerah *web* kolom pada step 186 saat *displacement* mencapai 23.141 mm.



Gambar 4.38 Hasil *S-Mises* Step 684 Pada Spesimen PS-3

Gambar 4.38 di atas menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada model sambungan tipe PS-3 saat saat step 684. Pendetailan sambungan PS-3 pada saat step 684 dapat dilihat pada Gambar 4.39



Gambar 4.39 Hasil *S-Mises* Step 684 Pada Pendetailan PS-3

Gambar 4.39 di atas menunjukkan distribusi tegangan dan mode kegagalan specimen PS-3 pada step 684, dimana terjadi gagal di baut yang ditandai dengan tercapai tegangan ultimate sebesar 669.5 MPa pada baut tersebut saat *displacement* mencapai 70.286 mm.

#### 4.5 Daktilitas

Faktor daktilitas struktur gedung ( $\mu$ ) adalah rasio antara simpangan *ultimate* dan simpangan pada saat terjadinya leleh pertama. Nilai daktilitas dari setiap spesimen perlu menjadi perhatian dalam mempertimbangkan pemilihan penggunaan metode yang tepat dalam penerapannya pada gedung bertingkat. Hasil Analisa dari masing – masing pemodelan dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Faktor Daktilitas

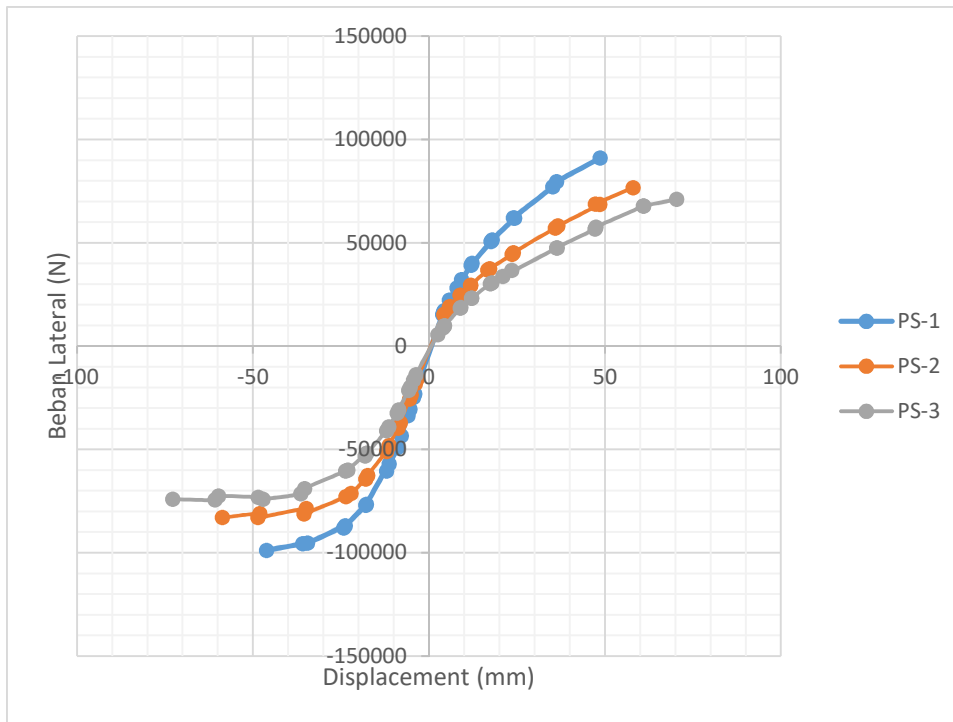
No	Spesimen	Simpangan saat		Daktilitas ( $\mu$ )
		Leleh Pertama (mm)	Ultimate (mm)	
1	PS-1	12.196	48.580	3.983
2	PS-2	17.996	58.749	3.265
3	PS-3	23.141	70.286	3.037

Dari Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa spesimen PS-1 mempunyai nilai daktilitas paling tinggi yaitu sebesar 3.983 dilanjutkan dengan PS-2 sebesar 3.265 dan yang terakhir ialah PS-3 sebesar 3.037. Artinya bahwa spesimen PS-1 paling mampu mempertahankan kestabilan saat mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup. Dari penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwa tambahan panjang *end-plate* mampu menambah nilai daktilitas jika diterapkan pada struktur baja.

#### 4.6 Envelope Curve

*Envelope curve* terdiri dari beban puncak siklus pertama dari masing-masing siklus pembebanan lateral bolak - balik. *Displacement* arah positif menghasilkan *envelope curve* positif sedangkan *displacement* negatif menghasilkan *envelope curve* negatif. Kurva hasil perbandingan beban dan *displacement* dapat dilihat pada Gambar 4.38. Hasil tersebut meunjukkan bahwa spesimen PS-1 mengalami pencapaian beban lateral maksimum tekan dan tarik serta penurunan

beban tekan dan tarik pada level *drift ratio* yang berbeda bila dibandingkan spesimen PS-2 dan PS-3. Hal ini terjadi karena pada pemodelan PS-1 terdapat *end-plate* yang diperpanjang pada sisi kiri dan kanan dengan total baut berjumlah 8 buah. Berbeda dengan pemodelan PS-2 dan PS-3 dimana jumlah baut masing-masing berjumlah 6 dan 4 buah.



Gambar 4.40 *Envelope Curve*

Dari Gambar 4.40 terlihat bahwa kapasitas beban lateral maksimal untuk spesimen variasi PS-1 lebih besar dari PS-2 dan PS-3 yakni sebesar 98884.8 N pada *displacement* 48.58 mm, untuk spesimen variasi PS-2 sebesar 83009.5 N pada *displacement* 58.749 mm, sedangkan specimen variasi PS-3 sebesar 74982.6 N pada *displacement* 70.286 mm. Pada gambar 4.38, terlihat kapasitas beban lateral variasi PS-1 lebih besar dari kapasitas beban variasi PS-2 dan PS-3. Oleh sebab itu variasi PS-1 lebih mampu menahan beban daripada variasi yang lain. Dari sini dapat dikatakan bahwa penambahan panjang *end-plate* menambah kekuatan sambungan dalam menahan beban.

#### 4.7 Kekakuan Siklus (Kc)

Kekakuan merupakan besarnya gaya yang mampu ditahan / diserap oleh struktur tiap satuan panjang. Kekakuan siklus pada pembebanan siklik secara umum akan mengalami penurunan pada setiap siklusnya, hal ini disebabkan karena pembebanan bolak-balik yang dilakukan menyebabkan efek kelelahan / *fatigue* pada spesimen yang digunakan. Besarnya kekakuan siklus dapat dinyatakan dengan kekakuan rotasi. Hasil kekakuan dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai Kekakuan Rotasi

No	Spesimen	Momen (Nmm)	Rotasi (rad)	Kekakuan Rotasi (N.mm/rad)
1	PS-1	136398.300	0.0345	3956.869
2	PS-2	114995.250	0.0417	2756.914
3	PS-3	106473.900	0.0499	2133.596

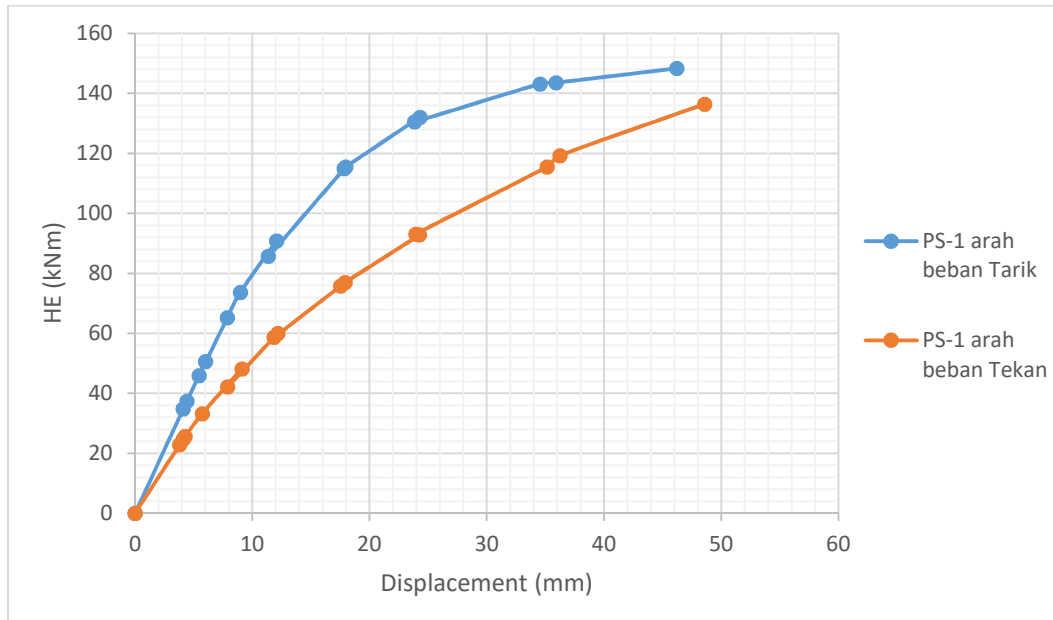
Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa spesimen PS-1 memiliki nilai kekakuan rotasi yang paling besar. Nilai kekakuan rotasi spesimen PS-1 sebesar 3956.869 N.mm/rad, untuk spesimen PS-2 sebesar 2756.914 N.mm/rad, dan untuk spesimen PS-3 sebesar 2133.596 N.mm/rad. Jika dilihat dari nilai kekakuan rotasinya, maka spesimen PS-1 paling kaku jika dibandingkan dua spesimen yang lain. Artinya bahwa sambungan tipe PS-1 paling mampu menahan besarnya gaya yang bekerja/diterima oleh struktur. Hal inipun juga dipengaruhi oleh *end-plate* yang diperpanjang pada kedua sisinya.

#### 4.8 Disipasi Energi

Grafik perbandingan energi disipasi variasi sambungan PS-1, PS-2, dan PS-3 terlihat pada setiap variasi cenderung meningkat setiap adanya peningkatan beban. Adapun energi disipasi atau *hysteretic energy* menggambarkan kemampuan spesimen untuk mendisipasikan beban yang bekerja pada benda uji tersebut. Besarnya energi disipasi dihitung berdasarkan besarnya luasan kurva yang dibentuk dari satu siklus lengkap (positif dan negatif). Besarnya energi disipasi dihitung

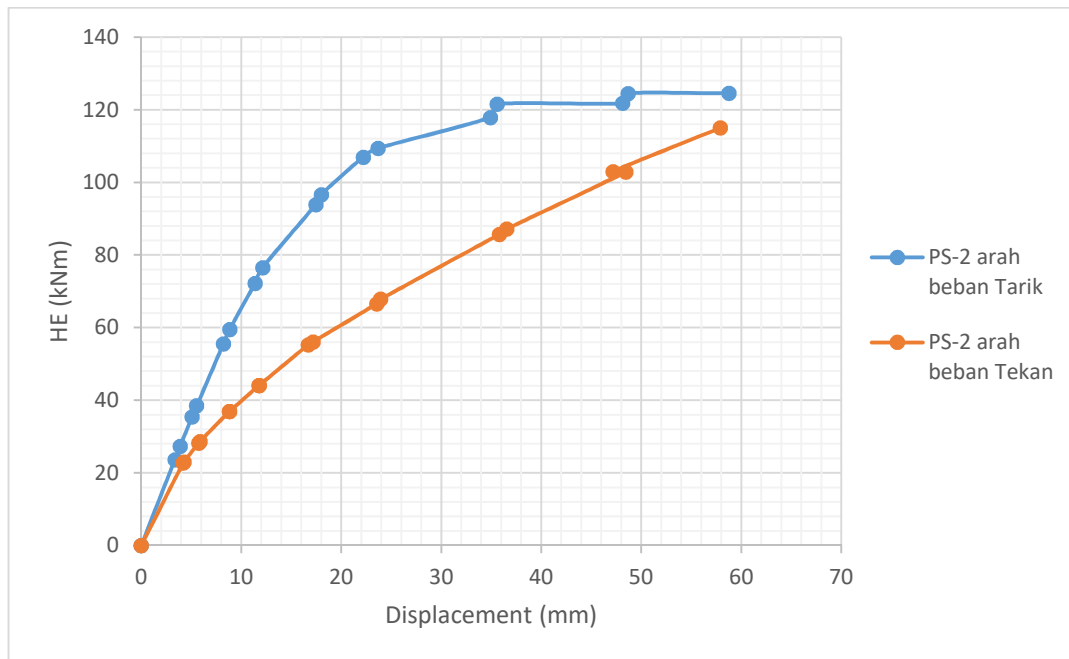


berdasarkan pendekatan numerik dengan cara menghitung luasan tiap pias pada siklus positif dan negatif. Hasil rekapitulasi perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.39 sampai 4.41.



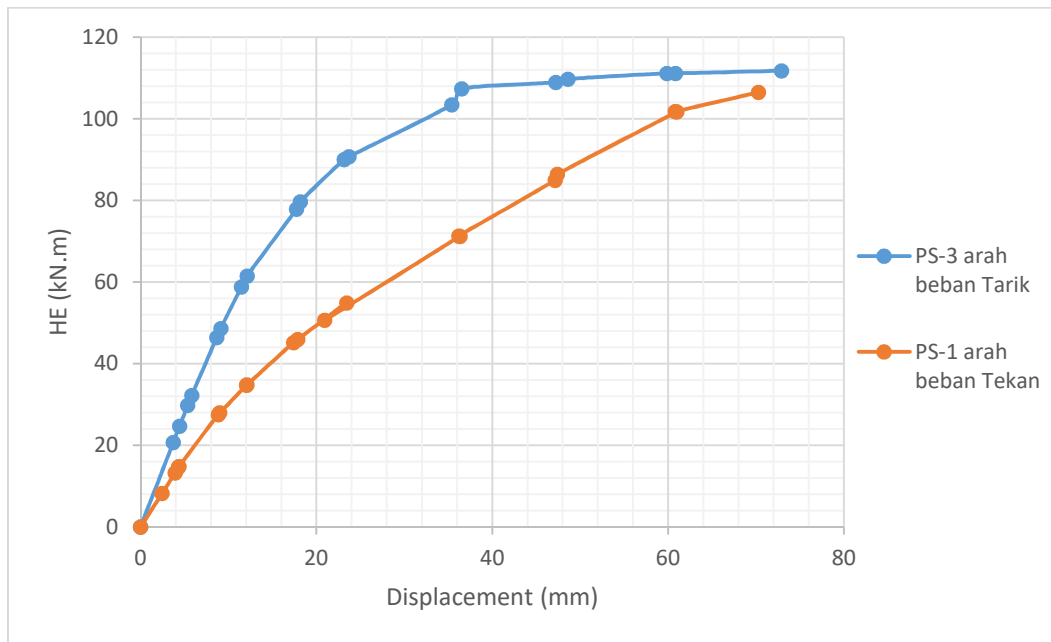
Gambar 4.41 Grafik *Hysteretic Energy* Pemodelan PS-1

Gambar 4.41 menunjukkan grafik *Hysteretic Energy* baik arah beban Tarik dan beban tekan yang dialami oleh struktur sambungan PS-1. Arah beban Tarik menunjukkan nilai *Hysteretic Energy* yang lebih besar jika dibandingkan dengan arah beban tekan. *Hysteretic Energy* maksimum arah beban tarik menunjukkan nilai sebesar 148.327 kN.m dengan *displacement* sebesar 46.207 mm. sedangkan *Hysteretic Energy* maksimum arah beban tekan menunjukkan nilai sebesar 136.398 kN.m dengan *displacement* sebesar 48.580 mm.



Gambar 4.42 Grafik *Hysteretic Energy* Pemodelan PS-2

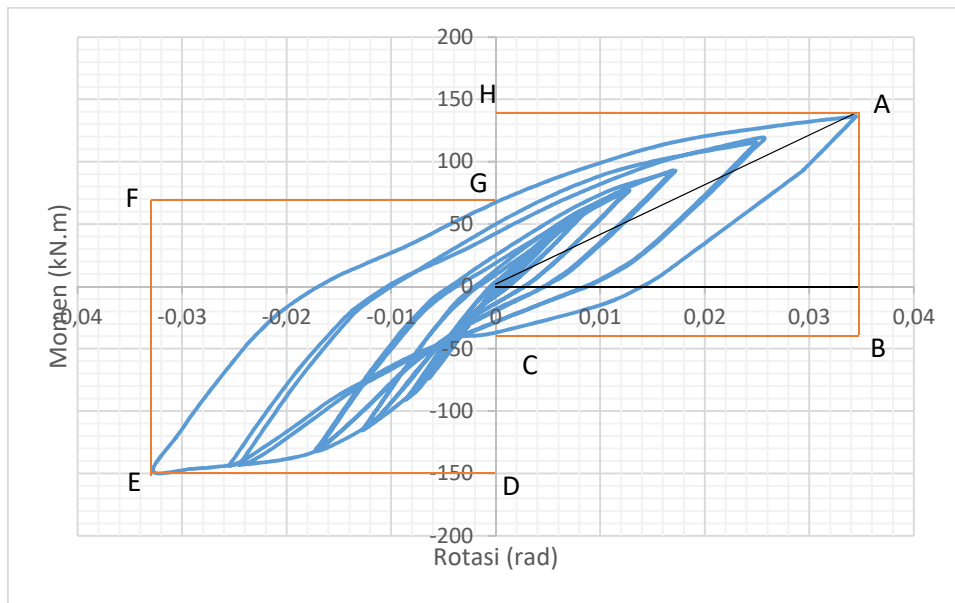
Gambar 4.42 menunjukkan grafik *Hysteretic Energy* baik arah beban Tarik dan beban tekan yang dialami oleh struktur sambungan PS-2. Arah beban Tarik menunjukkan nilai *Hysteretic Energy* yang lebih besar jika dibandingkan dengan arah beban tekan. *Hysteretic Energy* maksimum arah beban tarik menunjukkan nilai sebesar 124.514 kN.m dengan *displacement* sebesar 58.749 mm. sedangkan *Hysteretic Energy* maksimum arah beban tekan menunjukkan nilai sebesar 114.995 kN.m dengan *displacement* sebesar 57.912 mm.



Gambar 4.43 Grafik *Hysteretic Energy* Pemodelan PS-3

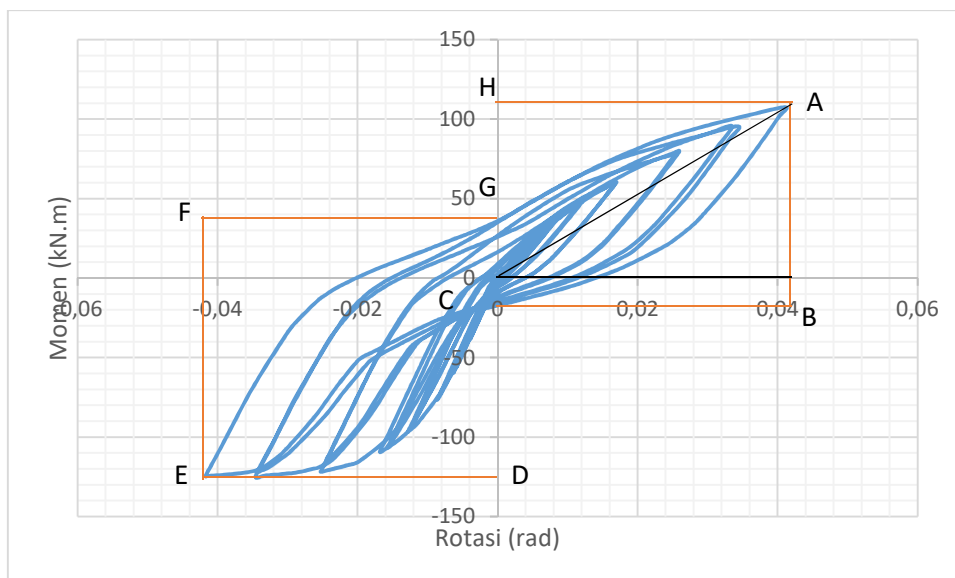
Gambar 4.43 menunjukkan grafik *Hysteretic Energy* baik arah beban Tarik dan beban tekan yang dialami oleh struktur sambungan PS-3. Arah beban Tarik menunjukkan nilai *Hysteretic Energy* yang lebih besar jika dibandingkan dengan arah beban tekan. *Hysteretic Energy* maksimum arah beban tarik menunjukkan nilai sebesar 111.750 kN.m dengan *displacement* sebesar 72.899 mm. sedangkan *Hysteretic Energy* maksimum arah beban tekan menunjukkan nilai sebesar 106.474 kN.m dengan *displacement* sebesar 70.287 mm.

Pada Gambar 4.41 sampai 4.43 di atas menunjukkan bahwa spesimen variasi PS-1 memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan variasi PS-2 dan PS-3. Hal ini juga masih berkaitan dengan serapan energi yang dialami oleh setiap spesimen terhadap beban luar yang bekerja untuk setiap siklusnya untuk melihat kestabilan system struktur pada level perpindahan maksimum, Selanjutnya Pada gambar 4.44 sampai 4.46 ditampilkan perbandingan momen – rotasi setiap spesimen.



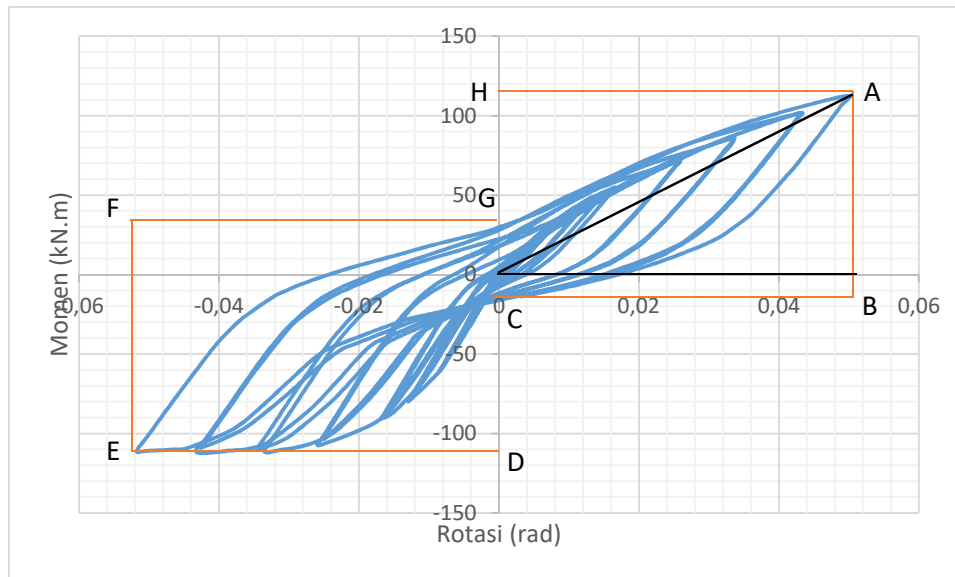
Gambar 4.44 Grafik Momen-Rotasi Pemodelan PS-1

Gambar 4.44 menunjukkan grafik momen-rotasi pada spesimen PS-1. Luas daerah siklik ditunjukkan oleh luasan segitiga AOB. Luas daerah siklik AOB sebesar 2208.752 kN.mm, sedangkan luas daerah yang dibatasi oleh ABCH dan DEFG sebesar 8986.635 kN.mm.



Gambar 4.45 Grafik Momen-Rotasi Pemodelan PS-2

Gambar 4.45 menunjukkan grafik momen-rotasi pada spesimen PS-2. Luas daerah siklik ditunjukkan oleh luasan segitiga A0B. Luas daerah siklik A0B sebesar 2075.095 kN.mm, sedangkan luas daerah yang dibatasi oleh ABCH dan DEFG sebesar 9026.891 kN.mm.



Gambar 4.46 Grafik Momen-Rotasi Pemodelan PS-3

Gambar 4.46 menunjukkan grafik momen-rotasi pada spesimen PS-2. Luas daerah siklik ditunjukkan oleh luasan segitiga A0B. Luas daerah siklik A0B sebesar 2435.136kN.mm, sedangkan luas daerah yang dibatasi oleh ABCH dan DEFG sebesar 10701.247 kN.mm.

Pada Gambar 4.44 sampai 4.46 di atas menunjukkan bahwa spesimen variasi PS-1 memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan variasi PS-2 dan PS-3. Hal ini juga masih berkaitan dengan serapan energi yang dialami oleh setiap spesimen terhadap beban luar yang bekerja untuk setiap siklusnya untuk melihat kestabilan system struktur pada level perpindahan maksimum, ACI 374.1-05 mensyaratkan rasio energi disipasi pada siklus terakhir pada pembebanan siklik tidak boleh kurang dari 1/8 (0.125). Berikut ini disajikan perbandingan nilai rasio energi disipasi jika dihitung berdasarkan grafik momen-rotasi yang ada.

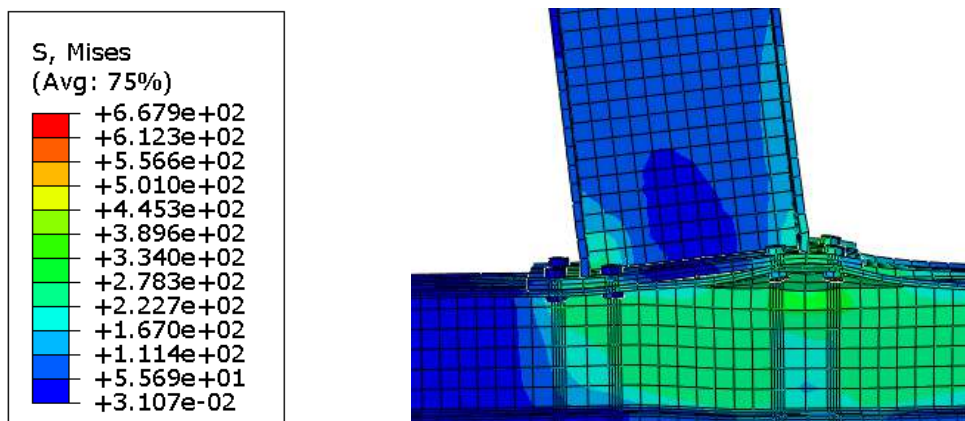
Tabel 4.5 Nilai Rasio Energi Disipasi

No	Spesimen	Luas Daerah Siklik (kN.mm)	Luas Daerah Yang Dibatasi Oleh ABCH dan DEFG (kN.mm)	Rasio Energi Disipasi Relatif ( $\beta$ )
1	PS-1	2208.752	8986.635	0.246
2	PS-2	2075.095	9026.891	0.230
3	PS-3	2435.136	10701.247	0.228

Mengacu pada hasil analisis yang telah dilakukan, rasio energi disipasi relatif pada ketiga spesimen lebih besar dari 1/8 (0.125), sehingga masih memenuhi kriteria yang disyaratkan atau dengan kata lain struktur masih memiliki kemampuan untuk menjaga stabilitasnya sebelum runtuh. Namun jika dibandingkan antar spesimen, maka spesimen SP-1 memiliki nilai rasio disipasi relative ( $\beta$ ) paling besar yaitu sebesar 0.246, artinya bahwa spesimen PS-1 paling mampu menyerap energi yang yang dialami terhadap beban luar yang bekerja. Spesimen PS-1 paling stabil dalam menerima beban saat terjadinya level perpindahan maksimum.

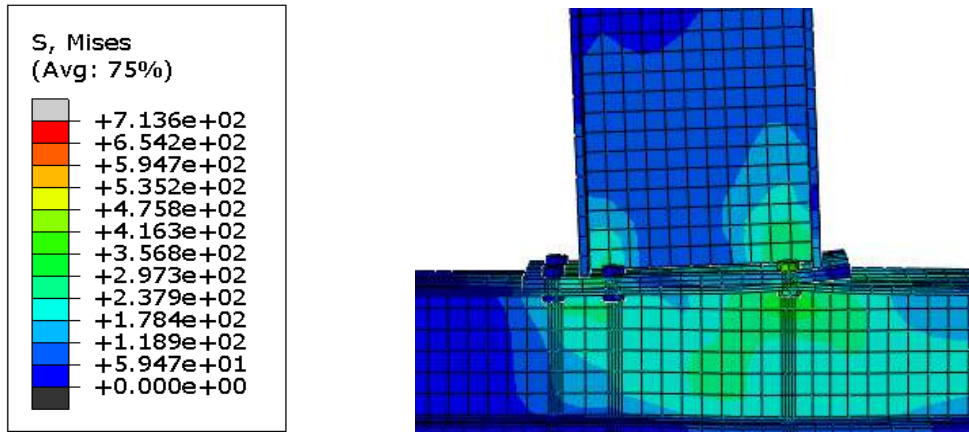
#### 4.9 Mode Kegagalan / Pola Keruntuhan

Pengamatan pola kegagalan dimulai dari awal hingga akhir pemodelan yang dilakukan. Berikut ini pola kegagalan pada setiap spesimen.



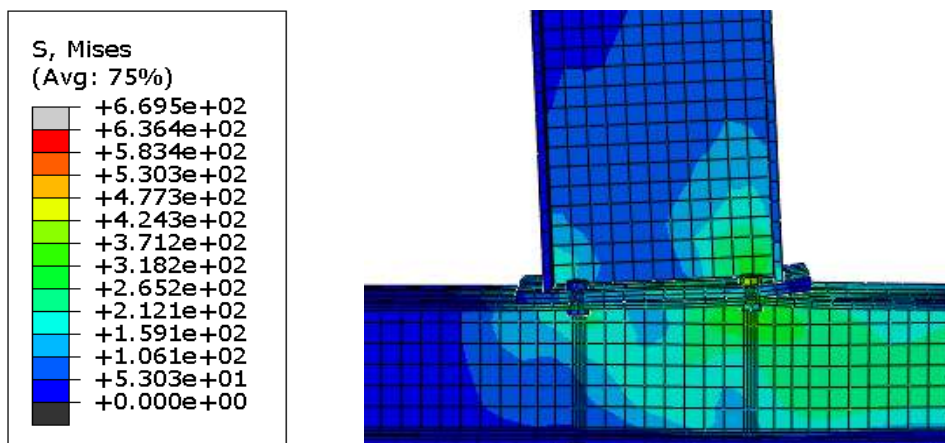
Gambar 4.47 Pola Kegagalan Variasi PS-1

Pada Gambar 4.47 dapat dilihat bahwa mode kegagalan specimen PS-1 terjadi pada baut sisi kanan (4 baut), leleh terjadi pada badan dan sayap kolom, sementara untuk balok relatif aman. Leleh juga terjadi pada *end-plate*.



Gambar 4.48 Pola Kegagalan Variasi PS-2

Pada Gambar 4.48 dapat dilihat bahwa mode kegagalan spesimen PS-2 terjadi pada baut sisi kanan (2 baut) dimana tidak terdapat pemanjangan *end-plate* pada sisi tersebut, leleh terjadi pada badan dan sayap kolom, sementara untuk balok juga mengalami leleh pada ujung sambungan dengan *end-plate*. Leleh juga terjadi pada *end-plate* yang tertarik akibat beban yang bekerja.



Gambar 4.49 Pola Kegagalan Variasi PS-3

Pada Gambar 4.49 dapat dilihat bahwa mode kegagalan spesimen PS-2 terjadi pada baut sisi kanan (2 baut) dimana tidak terdapat pemanjangan *end-plate* pada sisi tersebut, leleh terjadi pada badan dan sayap kolom, sementara untuk balok juga mengalami leleh pada ujung sambungan dengan *end-plate*. Leleh juga terjadi pada *end-plate* yang tertarik akibat beban yang bekerja.

Dari Gambar 4.47 hingga 4.49 di atas, dapat disimpulkan untuk variasi PS-1 mode kegagalan terjadi pada baut, leleh terjadi pada badan dan sayap kolom, sementara untuk balok relatif aman. Sedangkan untuk variasi PS-2 dan PS-3 kegagalan terjadi pada baut, leleh pada badan kolom, dan ujung badan balok. Hal ini dikarenakan tidak terdapat perpanjangan *end-plate (extended end-plate)* baik di sisi kanan pada variasi PS-2 ataupun di kedua sisinya pada PS-3. Pada spesimen PS-2 dan PS-3 mode kegagalan badan kolom diakibatkan adanya tekan secara transversal pada step pemberian beban positif di akhir dan baut sisi kanan mengalami tarik di sisi luar, serta secara umum leleh juga terjadi pada *end-plate*.



*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## BAB 5

### KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan dari hasil analisa yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut :

1. Dari nilai daktilitas yang telah dianalisa, dapat disimpulkan bahwa spesimen PS-1 paling mampu mempertahankan kestabilan saat mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup. Dari penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwa tambahan panjang *end-plate* mampu menambah nilai daktilitas jika diterapkan pada struktur baja.
2. Hasil analisa kekakuan rotasi, dapat disimpulkan bahwa spesimen PS-1 memiliki nilai kekakuan rotasi yang paling besar, maka spesimen PS-1 paling kaku jika dibandingkan dua spesimen yang lain. Artinya bahwa sambungan tipe PS-1 paling mampu menahan besarnya gaya yang bekerja/diterima oleh struktur. Hal inipun juga dipengaruhi oleh *end-plate* yang diperpanjang pada kedua sisinya.
3. Mengacu pada hasil analisis yang telah dilakukan, rasio energi disipasi relatif pada ketiga spesimen lebih besar dari 1/8 (0.125). Namun jika dibandingkan antar spesimen, maka spesimen SP-1 memiliki nilai rasio disipasi relative ( $\beta$ ) paling besar yaitu sebesar 0.246, artinya bahwa spesimen PS-1 paling mampu menyerap energi yang dialami terhadap beban luar yang bekerja. Spesimen PS-1 paling stabil dalam menerima beban saat terjadinya level perpindahan maksimum.
4. *Extended End-Plate* mempengaruhi besarnya nilai *displacement* yang terjadi. Jika sambungan menggunakan *extended end-plate*, maka nilai *displacement* lebih kecil jika dibandingkan dengan sambungan yang tidak menggunakan *Extended End-Plate*. Maka pada sambungan yang menggunakan *Extended End-Plate* akan lebih kecil kemungkinan untuk mengalami *displacement* yang besar yang dapat mengakibatkan keruntuhan.

5. *Extended End-Plate* mempengaruhi besarnya beban lateral yang dapat dipikul. Jika sambungan menggunakan *Extended End-Plate* maka akan dapat memikul beban lateral yang lebih besar, artinya bahwa sambungan tersebut lebih stabil dan kuat dalam menahan beban yang bekerja.
6. Perilaku yang dihasilkan dari ketiga spesimen dalam pemodelan Abaqus memiliki mode kegagalan yang hampir sama. Variasi PS-1 mengalami kegagalan pada baut dan leleh pada badan kolom, sementara untuk variasi PS-2 dan PS-3 selain terjadi kegagalan pada baut, leleh terjadi pada badan kolom dan balok. Secara umum leleh juga terjadi pada *end-plate*, secara spesifik terletak pada area kontakannya dengan balok. Hal ini membuktikan bahwa performa sambungan dengan menggunakan pemanjangan *end-plate* lebih baik jika dibandingkan dengan sambungan yang tidak menggunakan pemanjangan *end-plate*.
7. Adapun hasil dari beban lateral dan *displacement*, dimana beban lateral maksimal untuk spesimen PS-1 sebesar 98884.8 N pada *displacement* 48.58 mm, untuk spesimen PS-2 sebesar 83009.5 N pada *displacement* 58.749 mm, dan untuk spesimen PS-3 sebesar 74982.6 N pada *displacement* 70.286 mm. Ini menunjukkan bahwa kapasitas beban lateral spesimen PS-1 lebih besar dari kapasitas beban spesimen untuk variasi yang lainnya.
8. Perbandingan energi disipasi pada semua spesimen yang dianalisis menghasilkan spesimen PS-1 memiliki *potential energy* yang lebih besar daripada spesimen lainnya yakni sebesar 2208.752 kN.mm, disusul PS-2 sebesar 2075.095 kN.mm, dan PS-3 sebesar 2435.136 kN.mm. Dari ketiganya maka variasi spesimen PS-1 memiliki kemampuan yang lebih besar untuk menjaga stabilitasnya dibandingkan variasi spesimen yang lain.
9. Nilai momen rotasi untuk setiap variasi memiliki perbedaan. Nilai momen untuk variasi spesimen PS-1 sebesar 136.398 N.mm, untuk spesimen PS-2 sebesar 114.995 N.mm, dan untuk spesimen PS-3 sebesar 106.473 N.m. Sedangkan nilai rotasi masing-masing variasi ialah untuk PS-1 sebesar 0.0345 rad, untuk spesimen PS-2 sebesar 0.0417 rad, dan untuk spesimen PS-3 sebesar 0.0449 rad.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Institut of Steel Construction (AISC) 360. (2016). **“Specification of Structural Steel Buildings.”** American National Standards Institute (ANSI).
- AISC, **Seismic Provisions for Structural Steel Buildings** (Chicago, Illinois) 2005.
- Augusto H, Silva L.S, Rebelo C, Castro J.M. 2017. **Cyclic behaviour characterization of web panel components in bolted end-plate steel joints.** Journal of Constructional Steel Research 133 (2017) 310–333.
- Bahaz A. S, Amara, J.P. Jaspart, Demonceau J.F. 2017. **Analysis of the Behaviour of Semi Rigid Steel End Plate Connections.** EDP Sciences 02058.
- Diaz C, Martí P, Victoria M, Querin O.M. 2011. **Review On The Modelling Of Joint Behaviour In Steel Frames.** Journal of Constructional Steel Research 67 (2011) 741–758.
- Doh S.I, Chin S.C, Fakh K.A. 2018. **Behavior of Extended End-Plate Steel Beam to Column Connections.** The Open Civil Engineering Journal 250-262.
- Eladly. 2019. **Behaviour Of Stainless Steel Beam-To-Column Bolted Connection Part 1: Simplified FE Model.** Journal of Constructional Steel Research 164 (2020) 105784
- Elsabbagh A, Sharaf T, Nagy S, ElGhandour M. 2019. **Behavior of extended end-plate bolted connections subjected to monotonic and cyclic loads.** Engineering Structures 190 (2019) 142–159.
- Gödrich L, Wald F, Kabeláč J, Kuřiková M. 2019. **Design finite element model of a bolted T-stub connection component.** Journal of Constructional Steel Research 157 (2019) 198–206.
- Haghollahi A, 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 Vo. 4 No.1.
- Ismail R.E.S. Fahmy, Khalifa, dan Mohamed. 2015. **Numerical Study on Ultimate Behaviour of Bolted End-Plate Steel Connections.** Latin American Journal of Solid and Structures.
- Liu X, Ataei A, Bradford M.A. 2017. **Computational Modelling Of The Moment-Rotation Relationship For deconstructable Flush End Plate Beam-To-Column Composite Joints.** Journal of Constructional Steel Research 129 (2017) 75–92.

- Cormak Mc, Jack C. 2002. **“Desain Beton Bertulang-Edisi Kelima-Jilid 1.”**  
Erlangga: Jakarta.
- Salmon C. G, Johnson J.E. 1997. **Struktur Baja Desain dan Perilaku Jilid 1.**  
Erlangga: Jakarta
- Silviana. 2017. **Studi Kekuatan Sambungan Batang Tarik Pelat Baja Dengan Alat Sambung Baut.** Jurnal Inotera ISSN 2581-1274.
- Standar SNI 1726-2012., **“Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung.”**, Badan Standarisasi Nasional, 2012
- Standar SNI 1729-2015., **“Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung.”** Badan Standarisasi Nasional, 2015.
- Standar SNI 03-1729-2002., **“Tata Cara Perencanaan Sambungan baut Pada Struktur Baja.”** Badan Standarisasi Nasional, 2015.
- Zhao Y, Bu Y, Wang Y. 2019. **Study Of Stainless Steel Bolted Extended End-Plate Joints Under Seismic Loading.** Thin-Walled Structures 144 (2019) 106255.

## BIODATA PENULIS



**Yehezkiel Septian Yoganata**, penulis dilahirkan di Kediri, 5 September 1991, merupakan anak kedua dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Saka Nira PG Ngadiredjo Kediri, SDN Purwokerto 1 Ngadiluwih-Kediri, SMP Negeri 1 Ngadiluwih-Kediri, dan SMA Negeri 4 Kota Kediri. Setelah lulus dari pendidikan SMA pada tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan jenjang diploma 3 di jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang. Penulis mendapatkan gelar Ahli Madya (A.Md) pada tahun 2013 setelah menyelesaikan pendidikan diploma 3 dengan membuat Tugas Akhir yang berjudul “Perencanaan Ulang Rumah Susun Pondok Pesantren Al-Amin Kota Kediri.” Pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan jenjang sarjana (S1) di Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S.T) setelah menyelesaikan pendidikan sarjana di tahun 2016 dengan menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Perbandingan Perilaku Bangunan Menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen, Sistem Rangka Bresing Konsentrik, dan Sistem Rangka Bresing Konsentrik Menggunakan Outrigger”. Pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan jenjang Pascasarjana (S2) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya program studi Teknik Sipil, bidang keahlian Struktur dan terdaftar dengan NRP. 03111650020011.

Email : [nata.yehezkiel@gmail.com](mailto:nata.yehezkiel@gmail.com)