



TESIS - RC185401

**STUDI ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN KAKU
(RIGID CONNECTION) BALOK - KOLOM BAJA TIPE
EXTENDED END PLATE DENGAN METODE ELEMEN
HINGGA**

**OKTAVIA ULLY ARTHA SILALAH
03111750020012**

Dosen Pembimbing
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D
Bambang Pisceca, ST., MT., Ph.D

Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2019



TESIS - RC185401

**STUDI ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN KAKU
(*RIGID CONNECTION*) BALOK - KOLOM BAJA TIPE
EXTENDED END PLATE DENGAN METODE ELEMEN
HINGGA**

**OKTAVIA ULLY ARTHA SILALAH
03111750020012**

**Dosen Pembimbing
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D
Bambang Pisceca, ST., MT., Ph.D**

**Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2019**



TESIS - RC185401

**THE ANALYSIS STUDY OF RIGID CONNECTION -
STEEL BEAM COLUMN CONNECTION OF EXTENDED
END PLATE TYPE WITH FINITE ELEMENT METHOD**

**OKTAVIA ULLY ARTHA SILALAH
03111750020012**

**Supervisor
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D
Bambang Pisceca, ST., MT., Ph.D**

**Civil Engineering Department
Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2019**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

OKTAVIA ULLY ARTHA SILALAH

NRP: 03111750020012

Tanggal Ujian : 20 Maret 2019

Periode Wisuda : September 2019

Disetujui oleh:

Pembimbing

1. Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D
NIP: 197301281998021002



2. Bambang Pisceca, ST., MT., Ph.D
NIP: 198403182008121002



Penguji

3. Data Iranata, ST., MT., Ph.D
NIP: 198004302005011002



4. Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D
NIP: 198308082008121005



Kepala Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan



Tri Joko Wahyu Adi, ST., MT., Ph.D
NIP: 197404202002121003

**STUDI ANALISIS SAMBUNGAN KAKU
(RIGID CONNECTION) BALOK – KOLOM BAJA
TIPE EXTENDED END PLATE DENGAN
METODE ELEMEN HINGGA**

Nama : Oktavia Ully Artha Silalahi
NRP : 03111750020012
Pembimbing : Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D
Bambang Piscesa, ST., MT., Ph.D

ABSTRAK

Sambungan adalah elemen yang sangat penting dalam desain dan konstruksi bangunan tahan gempa. Kegagalan atau keruntuhan bangunan pasca gempa ditentukan oleh kualitas sambungan. Pemilihan sambungan yang tepat sangat diperlukan untuk menjamin terjadinya sendi plastis pada daerah balok.

Studi ini membahas tentang perilaku dari sambungan baja tipe *Extended End Plate* saat diberi beban siklik dengan menggunakan software berbasis metode elemen hingga ABAQUS 6.14. Pemodelan ini meliputi variasi nilai pratarik baut, penambahan pengaku dan tanpa pengaku pada badan kolom. Dengan adanya studi ini, diharapkan pula pemodelan sambungan balok - kolom baja tipe *Extended End Plate* yang memenuhi syarat baik kuat maupun daktail pada bangunan untuk daerah gempa kuat dapat diperoleh dengan baik.

Gang Shi et al (2006), melakukan tes eksperimental untuk sambungan dari rangka baja *end-plate* dengan beberapa variasi dari sambungan baja. Studi ini akan melakukan pemodelan yang kemudian hasilnya akan dibandingkan dari moment – rotasi, nilai kekakuan rotasi dan mode kegagalan. Spesimen yang dianalisis dari eksperimental ada dua spesimen yaitu spesimen JD2 dan spesimen JD4.

Pemodelan yang digunakan *welded plate I-Shaped* untuk dimensi kolom $300 \times 250 \times 8 \times 12$ mm dan dimensi balok $300 \times 200 \times 8 \times 12$ mm, ketebalan pengaku kolom 12 mm, ketebalan pengaku *extended end plate* 10 mm. Hasil dari studi spesimen JD2 yaitu nilai M_u sebesar 335.86 KNm sedangkan nilai θ_u sebesar 0.042 rad. Spesimen JD4 yaitu nilai M_u sebesar 287.58 KNm sedangkan nilai θ_u sebesar 0.037 rad. Nilai kekakuan rotasi spesimen JD2 sebesar 68733 KNm/rad dan JD4 sebesar 36175 KNm/rad. Adapun dari segi mode kegagalan kedua spesimen menunjukkan kegagalan yang sama. Untuk nilai energi disipasi spesimen JD2 sebesar 70712.75 KNmm dan JD4 sebesar 51662.30 KNmm. Serta ditinjau pula dari nilai faktor daktilitas dimana nilai spesimen JD2 sebesar 2.99 dan nilai JD4 sebesar 2.84 yang nilai di atas masuk kategori daktilitas parsial dengan memenuhi syarat $1.5 < \mu < 5$.

Hasil pemodelan di atas jika dibandingkan dengan hasil dari eksperimen yang digunakan tidak memiliki selisih yang signifikan. Hasil pemodelan dengan program bantu *finite element* merupakan sebuah pendekatan sehingga hasilnya tidak sama persis dengan hasil eksperimen yang dilakukan. Persyaratan model sambungan balok - kolom diharapkan dapat digunakan pada struktur yang tahan gempa. Berdasarkan hasil pemodelan yang dilakukan, pemodelan pada sambungan memiliki kemampuan daktilitas yang baik.

Kata kunci : *Extended end plate*, metode elemen hingga, pembebanan siklik, sambungan baja

ANALYSIS OF RIGID CONNECTION – STEEL BEAM COLUMN CONNECTION OF EXTENDED END PLATE TYPE WITH FINITE ELEMENT METHOD

Name : Oktavia Ully Artha Silalahi
Student ID : 03111750020012
Advisor : Budi Suswanto, S.T. M.T. Ph.D.
Bambang Piscesa, S.T. M.T. Ph.D.

ABSTRACT

Connections are a very important element in the design and construction of earthquake resistant buildings. Post-earthquake building failure or collapse is determined by the quality of the connection. The selection of the right connection is very necessary to ensure the occurrence of plastic joints in the beam area.

This study discusses the behavior of Extended End Plate type steel connections when given cyclic loads using software based on ABAQUS 6.14 finite element method. This modeling includes variations in value of the pretension of bolts, the addition of stiffeners and without stiffeners on the body of the column. This study, it is expected that the Extended End Plate type steel column modeling that meets both strong and ductile requirements in buildings for strong earthquake areas can be obtained properly.

Gang Shi et al (2006), conducted an experimental test for the connection of steel frame end - plate with several variations of steel joints. This study will do modeling which then results will be compared from moment - rotation, rotational stiffness value and failure mode. Specimens analyzed from the experimental were two specimens, namely JD2 specimen and JD4 specimen.

The modeling used I-Shaped welded plate for column dimensions $300 \times 250 \times 8 \times 12$ mm and beam dimensions $300 \times 200 \times 8 \times 12$ mm, column stiffness thickness 12 mm, thickness of 10 mm extended end plate stiffener. The results of the JD2 specimen study are Mu values of 335.86 KNm while the value of ϕ_u is 0.042 rad. The JD4 specimen is your value of 287.58 KNm while the value of ϕ_u is 0.037 rad. The stiffness values of JD2 specimen were 68733 KNm/rad and JD4 were 36175 KNm/rad. As for the failure mode, the two specimens showed the same failure. For the energy value of the dissipation of JD2 specimen of 70712.75 KNmm and JD4 of 51662.30 KNmm. Also reviewed from the value of ductility factor where the value of JD2 specimen is 2.99 and the value of JD4 is 2.84 for which the above values are categorized as partial ductility by fulfilling the requirements of $1.5 < \mu < 5$.

The results of the modeling above when compared with the results of the experiments used do not have a significant difference. The modeling results with the auxiliary program finite element is an approach so that the results are not exactly the same as the results of the experiments conducted. The requirements for beam - column connection models are expected to be used in earthquake-

resistant structures. Based on the results of the modeling performed, modeling on the joint has good ductility.

Key words : Cyclic loading, extended end plate, finite element method, steel connection

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan tuntunannya sehingga tesis dengan judul “**Studi Analisis Perilaku Sambungan Kaku (*Rigid Connection*) Balok – Kolom Baja Tipe *Extended End Plate* dengan Metode Elemen Hingga**” dapat diselesaikan dengan baik.

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang Struktur pada Departemen Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu selama studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, khususnya kepada :

1. Bapak Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing pertama dan dosen wali, atas bimbingan, arahan, dukungan serta waktunya dalam penyelesaian tesis ini.
2. Bapak Bambang Piscesa, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing kedua, atas bimbingan, dukungan serta waktunya dalam penyelesaian tesis ini.
3. Seluruh staf pengajar dan staf administrasi pascasarjana yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan pelayanan administrasi selama penulis menjalani proses belajar.
4. Kedua orang tua saya, Bapak Maralus Silalahi dan Ibu Jenti Hutapea, ka’Nofry dan bg’Josua, serta seluruh keluarga besar Silalahi – Hutapea yang telah memberikan semangat, nasehat dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.
5. Teman-teman seangkatan struktur 2017, yang selalu menyemangati dan mendorong penyelesaian tesis ini.
6. Semua yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulisan tesis ini masih banyak terdapat kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik demi penyempurnaan tesis ini maupun penulisan karya ilmiah yang mungkin penulis lakukan di masa-masa mendatang sangat diharapkan.

Akhir kata, penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan terutama dalam bidang Struktur.

Surabaya, Maret 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan	i
Abstrak	iii
Kata Pengantar	vii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xiii
Daftar Tabel	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Studi	5
BAB II Tinjauan Pustaka	
2.1 Umum	7
2.2 Kriteria Desain Struktur	7
2.3 Perencanaan Sambungan.....	8
2.3.1 Sambungan Momen	8
2.3.2 Macam-Macam Sambungan Tipe <i>End-Plate</i>	10
2.3.3 Sambungan Balok - Kolom Baja	11
2.3.3.1 Sambungan Las	11
2.3.3.2 Sambungan Baut Mutu Tinggi (HTB)	13
2.3.3.2.1 Pendahuluan	13
2.3.3.2.2 Alat Penyambung Baut Mutu Tinggi	13
2.3.3.2.3 Perincian Baut Mutu Tinggi dan Prosedur Kemasannya	14
2.3.3.2.4 Beban Leleh dan Penarikan Baut	16
2.3.3.2.5 Teknik Pemasangan Baut Mutu Tinggi	17
2.3.3.2.6 Kekuatan dan Perilaku Baut Mutu Tinggi	20
2.3.4 Tipe Sambungan Balok - Kolom Baja <i>End - Plate</i>	23

2.4 Investigasi Eksperimental	24
2.5 Pemodelan Sambungan antara Balok-Kolom Baja.....	29
BAB III Metodologi Penelitian	
3.1 Umum	31
3.2 Bagan Alir Penyelesaian Tesis.....	31
3.3 Metodologi Pengerjaan Tesis	32
3.3.1 Studi Literatur	33
3.3.2 Pemodelan 3D FEM Hasil Eksperimental	33
3.4 Kontrol Penampang dan Sambungan.....	35
3.4.1 Kuat Rencana	35
3.4.2 Kontrol Sambungan	36
3.4.2.1 Syarat Sambungan Tahan Gempa.....	36
3.4.2.2 Menghitung M^*_{pc}	37
3.4.2.3 Menghitung M^*_{pc}	38
3.4.2.4 Kontrol Panel Zone	38
3.4.3 Sambungan.....	39
3.4.3.1 Sambungan Las	39
3.4.3.2 Sambungan Baut	39
3.4.4 Pemodelan pada Masing-Masing Tipe Sambungan.....	39
3.4.4.1 Model - Model Sambungan	40
3.4.4.1.1 Model Sambungan Eksperimental	40
3.4.5 Analisis Hasil Pemodelan Sambungan	49
3.5 Hasil Kesimpulan Penelitian	50
3.6 Jadwal Pengerjaan Tesis	50
BAB IV Pembahasan	
4.1 Data Pemodelan	51
4.2 Metode <i>Finite Element</i>	52
4.2.1 Pemodelan	52
4.2.2 Pembebanan	53
4.2.3 <i>Boundary Condition</i>	55
4.2.4 <i>Interaction</i>	55
4.2.5 <i>Mesh</i>	57

4.2.6 <i>Job</i>	57
4.3 Hasil Pemodelan Sambungan dengan Program Bantu Abaqus	58
4.3.1 Verifikasi Hasil Metode FE dengan Hasil Eksperimen	58
4.3.1.1 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik Tipe JD2.....	58
4.3.1.2 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik Tipe JD4.....	59
4.3.2 Analisa Hasil Model Sambungan.....	60
4.3.2.1 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik Tipe JD2.....	60
4.3.2.2 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik Tipe JD4.....	62
4.3.3 Daktilitas	65
4.3.4 <i>Envelope Curve</i>	66
4.3.5 Kekakuan Siklus (K_c)	67
4.3.6 Disipasi Energi.....	67
4.3.7 Mode Kegagalan / Pola Keruntuhan	70
4.4 Verifikasi Hasil Eksperimen	71
4.5 Pemodelan Lanjutan.....	74
BAB V Kesimpulan	77
DAFTAR PUSTAKA	79

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva momen - rotasi (M- θ)	9
Gambar 2.2 Ukuran las sudut	12
Gambar 2.3 Dimensi penentu untuk baut (a) A ₃₂₅ dan (b) A ₄₉₀	15
Gambar 2.4 Hub. tipikal untuk beban dan rotasi mur pada baut A ₄₃₂₅ dan A ₄₉₀	16
Gambar 2.5 Hubungan tegangan dan regangan pada baut.....	19
Gambar 2.6 Pemindahan beban pada sambungan baut mutu tinggi	22
Gambar 2.7 Kehancuran pada sambungan baut mutu tinggi	22
Gambar 2.8 Tipe sambungan balok - kolom menggunakan baut <i>end - plate</i>	23
Gambar 2.9 Konfigurasi sambungan	23
Gambar 2.10 Sambungan <i>extended end plate</i>	24
Gambar 2.11 Model pembebanan sambungan balok - kolom	24
Gambar 2.12 Test spesimen dan susunan pembebanan	25
Gambar 2.13 Test set-up yang dilakukan	26
Gambar 2.14 Mode kegagalan dari spesimen	27
Gambar 2.15 Kurva momen - rotasi dari tiap spesimen	27
Gambar 2.16 Detail sambungan untuk spesimen JD2 dan JD4	30
Gambar 3.1 Bagan alir penyelesaian metodologi	31
Gambar 3.2 Model sambungan spesimen JD2 dan JD4	40
Gambar 3.3 Tampilan muka program bantu FE ABAQUS 6.14.....	42
Gambar 3.4 Kolom profil I	43
Gambar 3.5 Baut M20	43
Gambar 3.6 <i>End - plate</i> , t = 20 mm	43
Gambar 3.7 <i>Column stiffener</i> , t = 12 mm	44
Gambar 3.8 <i>Extended end plate stiffener</i> , t = 10 mm	44
Gambar 3.9 Hubungan tegangan – regangan baja	45
Gambar 3.10 <i>Section manager</i>	46
Gambar 3.11 <i>Input property</i> pada <i>part</i>	47
Gambar 3.12 <i>Layout</i> sambungan hasil <i>assembly</i>	47
Gambar 3.13 Sistem pembebanan.....	48

Gambar 3.14 <i>Mesh</i> pada model sambungan	49
Gambar 4.1 Tipe sambungan spesimen JD2.....	52
Gambar 4.2 Tipe sambungan spesimen JD4.....	52
Gambar 4.3 Kolom baja pada modul <i>part</i>	53
Gambar 4.4 Sambungan pada modul pembebanan.....	53
Gambar 4.5 Step pemodelan	54
Gambar 4.6 Pembebanan pada program ABAQUS.....	54
Gambar 4.7 <i>Boundary condition</i> pada pemodelan.....	55
Gambar 4.8 Interaksi antara flange kolom dengan <i>column stiffener</i>	56
Gambar 4.9 Interaksi antara flange kolom dengan <i>end - plate</i>	56
Gambar 4.10 Pemilihan jenis <i>mesh</i>	57
Gambar 4.11 Hasil <i>S mises</i> 361 pada model sambungan tipe JD2.....	58
Gambar 4.12 Hasil <i>S mises</i> 408 pada model sambungan tipe JD4.....	59
Gambar 4.13 <i>Hysteresis loop</i> spesimen JD2.....	59
Gambar 4.14 <i>Hysteresis loop</i> spesimen JD4.....	60
Gambar 4.15 Hasil <i>S mises</i> 7 pada model sambungan tipe JD2.....	60
Gambar 4.16 Hasil <i>S mises</i> detail 1 JD2.....	61
Gambar 4.17 Hasil <i>S mises</i> 112 pada model sambungan tipe JD2.....	61
Gambar 4.18 Hasil <i>S mises</i> detail 2 JD2.....	61
Gambar 4.19 Hasil <i>S mises</i> 361 pada model sambungan tipe JD2.....	62
Gambar 4.20 Hasil <i>S mises</i> detail 3 JD2.....	62
Gambar 4.21 Hasil <i>S mises</i> 17 pada model sambungan tipe JD4.....	63
Gambar 4.22 Hasil <i>S mises</i> detail 1 JD4.....	63
Gambar 4.23 Hasil <i>S mises</i> 60 pada model sambungan tipe JD4.....	63
Gambar 4.24 Hasil <i>S mises</i> detail 2 JD4.....	64
Gambar 4.25 Hasil <i>S mises</i> 408 pada model sambungan tipe JD4.....	64
Gambar 4.26 Hasil <i>S mises</i> detail 3 JD4.....	64
Gambar 4.27 <i>Envelope curve</i> pemodelan JD2 dan JD4.....	66
Gambar 4.28 Grafik <i>hysteretic energy</i> pemodelan JD2.....	68
Gambar 4.29 Grafik <i>hysteretic energy</i> pemodelan JD4.....	68
Gambar 4.30 <i>Hysteretic energy</i> pemodelan JD2	69
Gambar 4.31 <i>Hysteretic energy</i> pemodelan JD4	69

Gambar 4.32 Mode kegagalan dari spesimen JD2 (a) eksperimental (b) ABAQUS.....	70
Gambar 4.33 Mode kegagalan dari specimen JD4 (a) eksperimental (b) ABAQUS	71
Gambar 4.34 Perbandingan <i>hysteresis loop</i> eksperimen dengan pemodelan JD2.....	73
Gambar 4.35 Perbandingan <i>hysteresis loop</i> eksperimen dengan pemodelan JD4.....	73
Gambar 4.36 Perbandingan % pratarik baut spesimen JD2.....	74
Gambar 4.37 Perbandingan % pratarik baut spesimen JD4.....	74

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipe model sambungan	9
Tabel 2.2 Ukuran minimum las sudut	11
Tabel 2.3 Sifat – sifat baut	14
Tabel 2.4 Dimensi baut mutu tinggi A ₃₂₅ dan A ₄₉₀	15
Tabel 2.5 Pratarik baut minimum, KN	18
Tabel 2.6 Torsi maksimum baut yang dianjurkan	18
Tabel 2.7 Syarat pratarik dengan pengencangan tangan	19
Tabel 2.8 Detail sambungan spesimen <i>extended end plate</i>	25
Tabel 3.1 Material properties dan spesimen model	34
Tabel 3.2 Penentuan parameter sambungan	34
Tabel 3.3 Model yang dianalisis	35
Tabel 3.4 Ukuran minimum las sudut	39
Tabel 3.5 Ukuran variasi baut	39
Tabel 3.6 Rekapitulasi dari model lanjutan	41
Tabel 3.7 Nilai tegangan – regangan baut mutu tinggi ($f_u = 1160$ MPa, $f_y = 995$ MPa).....	45
Tabel 3.8 Nilai tegangan – regangan baut mutu tinggi ($f_u = 536.6$ MPa, $f_y = 345$ MPa)	46
Tabel 3.9 Jadwal pengerjaan tesis	50
Tabel 4.1 Spesimen pemodelan ABAQUS	51
Tabel 4.2 Faktor daktilitas pemodelan JD2 dan JD4	65
Tabel 4.3 Nilai rasio energi disipasi	70
Tabel 4.4 Verifikasi eksperimen dengan pemodelan JD2	72
Tabel 4.5 Verifikasi eksperimen dengan pemodelan JD4	72
Tabel 4.6 Verifikasi nilai kekakuan rotasi JD2 dan JD4	72

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan aktivitas kegempaan yang sangat tinggi. Menurut *United States Geological Survey - National Earthquake Information Center* (USGS - NEIC), tercatat untuk wilayah Kepulauan Indonesia dalam rentang waktu antara tahun 1973 – 2009 terjadi 8.260 kejadian gempa dengan magnituda $M > 5,0$ SR (Lina, 2010). Salah satu dampak yang diakibatkan oleh gempa tersebut yaitu merusak infrastruktur salah satunya bangunan gedung. Oleh karena itu, regulasi perencanaan bangunan terkait dengan aktivitas kegempaan di Indonesia sudah mulai digunakan sejak tahun 1983 dan telah diperbaharui pada tahun 2002 dan 2012. Mengingat lokasi kejadian yang tidak bisa diperkirakan secara akurat dan kebutuhan wilayah yang mendesak, usaha untuk mengurangi dampak gempa dilakukan dengan perencanaan dan pembangunan gedung yang tahan terhadap gempa.

Salah satu kerusakan yang sering terjadi pada gedung bertingkat akibat gempa adalah pada sambungan balok – kolom pada struktur baja. Kejadian gempa di Northridge pada tahun 1994 menjadi bukti bahwa kegagalan yang signifikan terjadi pada struktur sambungan balok - kolom baja. Studi yang dilakukan menunjukkan bahwa kegagalan getas yang terjadi pada sambungan lebih besar daripada probabilitas kegagalan yang direncanakan sebelumnya (Vahid et al., 2014). Kegagalan desain sambungan serta besarnya ketidakcocokan antara perilaku yang dianalisis dan perilaku aktual, akan membuat sambungan memiliki keterbatasan kemampuan dalam menerima beban (Billina, 2017). Setelah kejadian gempa tersebut, banyak para peneliti melakukan tes eksperimental untuk menginvestigasi perilaku dari kegagalan sambungan. Salah satu alternatif yang telah berkembang di kalangan engineer pada saat itu dengan menggunakan sambungan baut *end-plate* (Jalal et al., 2014).

Menurut *American Institute of Steel Construction (AISC)*, Sambungan baut *end-plate* sebagai salah satu sambungan yang mampu menahan momen besar akibat beban yang terjadi. Penggunaan sambungan tersebut juga sudah secara meluas digunakan pada gedung bertingkat struktur baja (Mehdi et al., 2014). Adapun tipe sambungan baut *end-plate* ada dua macam yaitu *flush end plate* dan *extended end plate*. Pada studi analisis ini, tipe sambungan yang akan dianalisis perilakunya adalah sambungan balok-kolom baja dengan menggunakan tipe *extended end plate*. Sambungan *extended end plate* adalah salah satu tipe sambungan dari jenis sambungan semirigid. Sambungan semirigid memiliki kekakuan mendekati sambungan rigid akan tetapi mempunyai fleksibilitas seperti halnya pada *simple connection* (Anis Saggaff dkk, 2010).

Penggunaan sambungan tipe *extended end plate* menjadi populer akhir-akhir ini. Selain memiliki performa yang baik dalam menahan beban yang terjadi, tipe ini juga dalam pelaksanaannya di lapangan memiliki kemudahan dalam hal fabrikasi dan ereksi (Abbas et al., 2018). Sambungan baut *extended end plate* ini juga diatur di ANSI 2010/AISC 358. Setelah gempa di Northridge California, banyak literatur yang membahas mengenai perilaku sambungan baut tipe *extended end plate* akibat gempa yang terjadi. Hasil menunjukkan bahwa sambungan yang dimodelkan dengan tipe *extended end plate* memiliki tingkat daktilitas yang tinggi dan kemampuan yang baik dalam menerima energi disipasi yang besar (Elsayed, 2011). Untuk mendapatkan daktilitas yang tinggi dari sambungan *extended end plate*, beberapa parameter seperti tebal *end-plate* yang digunakan, diameter baut, mutu baut, konfigurasi baut, ketebalan las serta pemasangan pengaku/*stiffener* pada *end-plate* dan kolom sangat berpengaruh dalam menentukan perilaku sambungan tersebut (Bouchair et al., 2012).

Selain itu, sambungan tipe *extended end plate* perlu ditinjau perilakunya dengan memberikan beban siklik untuk mengetahui batas inelastik pada keseluruhan sambungan sesuai dengan parameter yang digunakan (Ghobarah et al., 1990). Selain tes secara eksperimental yang dapat dilakukan pada sambungan, test secara analisis non-linier dengan metode elemen hingga yang berbasis komputer juga menjadi alternatif yang sudah banyak digunakan untuk meninjau

perilaku sambungan. Selain tidak memakan waktu yang lama, juga lebih ekonomis, menghemat waktu dan memudahkan dalam membuat variasi tipe sambungan untuk dianalisis perilakunya pada keadaan batas. Penggunaan dengan metode elemen hingga non-linier dapat memperluas interpretasi untuk membandingkan hasil dan observasi penelitian eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya (Mohamed et al., 2016).

Dalam studi ini akan dibahas tentang perilaku dan kinerja dari sambungan baut *extended end plate* dengan menggunakan balok – kolom baja profil I dengan variasi gaya pra-tarik baut dan dengan dan tanpa penambahan pengaku pada *end-plate* dan kolom yang digunakan. Sambungan yang akan dianalisis nantinya akan dibebani beban monotonik dan beban siklik dengan menggunakan analisis numerik. Untuk parameter lain seperti, tebal *end-plate*, diameter baut dan jumlah baut yang digunakan mengacu pada eksperimental yang dilakukan (Gang Shi et al., 2006). Adapun hasil dari studi analisis yang akan didapatkan nantinya yaitu berupa kurva hubungan momen - rotasi untuk mendapatkan (distribusi tegangan, regangan dan deformasi) yang kemudian akan dibandingkan dengan data ekperimental yang tersedia. Dengan adanya studi ini, diharapkan pemodelan sambungan balok – kolom baja dengan tipe *Extended End Plate* memenuhi syarat baik kuat maupun daktail pada bangunan untuk daerah gempa kuat. Adapun *software* yang digunakan dalam memodelkan sambungan tersebut yaitu *software* ABAQUS 6.14.

1.2 Perumusan Masalah

1.2.1 Permasalahan Utama

Bagaimana merencanakan bentuk sambungan yang efektif dan efisien pada sambungan balok - kolom baja profil I dengan tipe *Extended End Plate*?

1.2.2 Detail Permasalahan

1. Bagaimana memodelkan tipe sambungan *Extended End Plate* (dengan penambahan pengaku dan tanpa pengaku pada *end-plate*) dengan menggunakan *Software* ABAQUS 6.14?

2. Bagaimana mengetahui pembebanan yang terjadi pada pemodelan sambungan antara balok dengan kolom baja profil I dengan menggunakan *Software ABAQUS 6.14*?
3. Bagaimana perilaku (distribusi tegangan, regangan dan deformasi) yang terjadi pada sambungan *Extended End Plate* (dengan penambahan pengaku dan tanpa pengaku pada *end-plate*) dengan menggunakan *Software ABAQUS 6.14*?
4. Bagaimana pola histerisis pada pembebanan siklik yang didapatkan dengan menggunakan *Software ABAQUS 6.14*?
5. Bagaimana kesimpulan dari hubungan momen - rotasi yang menjadi output dari analisis numerik jika dibandingkan dengan data ekperimental yang digunakan?
6. Bagaimana pengaruh variasi nilai gaya pra-tarik baut (*pretension bolt*) pada pemodelan lanjutan?

1.3 Tujuan

Tujuan utama dari Tesis ini adalah dapat merencanakan bentuk sambungan yang efektif dan efisien pada sambungan balok - kolom baja profil I dengan tipe *Extended End Plate*.

Tujuan secara detail dari pembahasan Tesis ini adalah :

1. Memodelkan tipe sambungan *Extended End Plate* (dengan penambahan pengaku dan tanpa pengaku pada *end-plate*) dengan menggunakan *Software ABAQUS 6.14*.
2. Mengetahui pembebanan yang terjadi pada pemodelan sambungan antara balok dengan kolom baja profil I dengan menggunakan *Software ABAQUS 6.14*.
3. Mengetahui perilaku (distribusi tegangan, regangan dan deformasi) yang terjadi pada sambungan *Extended End Plate* (dengan penambahan pengaku dan tanpa pengaku pada *end-plate*) dengan menggunakan *Software ABAQUS 6.14*.
4. Mengetahui pola histerisis pada pembebanan siklik yang didapatkan dengan menggunakan *Software ABAQUS 6.14*.

5. Menarik kesimpulan dari hubungan momen dengan rotasi yang menjadi output dari analisis numerik jika dibandingkan dengan data ekperimental yang digunakan (Gang Shi et al, 2006).
6. Mengetahui pengaruh variasi nilai gaya pra-tarik baut (*pretension bolt*) pada pemodelan lanjutan.

1.4 Batasan Masalah

Lingkup pembahasan yang akan dianalisa mencakup :

1. Hanya dilakukan pemodelan pada bagian sambungan balok - kolom baja dengan bantuan software FE yaitu ABAQUS 6.14.
2. Profil yang digunakan untuk balok - kolom baja menggunakan profil I.
3. Jenis sambungan menggunakan sambungan las dan baut mutu tinggi (HTB) dengan penambahan pengaku dan tanpa pengaku pada tipe *Extended End Plate* yang dimodelkan.
4. Tidak melakukan penelitian secara eksperimen.
5. Tidak meninjau aspek ekonomis.

1.5 Manfaat Studi

Manfaat yang dapat diberikan Tesis ini adalah sebagai berikut :

1. Pemodelan struktur dengan program elemen hingga dapat menjadi alternatif penelitian yang mengurangi waktu dan biaya selain penelitian eksperimental di laboratorium.
2. Memberikan informasi bahwa *Finite Element Method* yang disimulasikan dengan baik dengan menggunakan tipe *Extended End Plate* dapat memberikan performa sambungan dengan kualitas baik yang tahan terhadap gempa.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Desain dan analisis perilaku serta kinerja struktur berdasarkan konsep *Performance Based Earthquake Engineering* (PBEE) telah cukup sering dilakukan kajian di Indonesia meski masih dalam tahapan modeling. Pada aplikasi riil dalam kaitan suatu proses tahapan desain disebabkan belum adanya ketentuan untuk melakukan tinjauan *performance* elemen struktur hasil desain (Yunalia, 2008). Kebutuhan akan evaluasi perilaku dan kinerja pada elemen struktur terutama struktur sambungan balok - kolom di masa depan, akan menjadi tuntutan seiring dengan hasil riset - riset terbaru mengenai kegagalan sambungan akibat potensi bahaya gempa yang terjadi (Vahid et al., 2014).

Dalam perencanaan struktur tahan gempa diisyaratkan dengan ketat bahwa sambungan harus direncanakan lebih kuat daripada komponen yang disambung, untuk menjamin bahwa selama gempa terjadi, pelelehan tidak terjadi pada bagian sambungan, tetapi dibagian yang memang telah direncanakan leleh pada elemen struktur tertentu. Dalam SNI 1729:2015 dinyatakan bahwa sambungan pada struktur pemikul gempa harus mengakomodasi terjadinya penyerapan energi yang baik pada sendi plastis sesuai dengan kinerja struktur yang direncanakan. Kinerja ini dinyatakan dengan besaran sudut rotasi plastis yang terbentuk diantara sumbu balok dan sumbu kolom.

Maka dalam perencanaan bangunan struktur tahan gempa harus diperhitungkan dampak dan gaya lateral, dalam hal ini gaya yang diakibatkan oleh gempa bumi yang bersifat siklik (bolak - balik) yang dialami oleh struktur. Adapun dalam perencanaan tersebut, struktur harus dapat memiliki daktilitas yang memadai di daerah sambungan (Sumarwan, 2010).

2.2 Kriteria Desain Struktur

Suatu struktur dapat tersusun dari beberapa elemen, dengan sifat atau karakteristik yang berlainan. Berdasarkan elemen - elemen penyusunnya, struktur

dapat dibedakan menjadi 4 macam yaitu Struktur Balok - Kolom, Struktur *Trusses* (Struktur Rangka Batang), Struktur *Frame* (Struktur Rangka Kaku), dan Struktur *Shell* (meliputi *plate*, *Shell* dan *Membran*).

Struktur yang dibentuk dengan cara meletakkan elemen kaku horizontal di atas elemen kaku vertikal adalah struktur yang umum dijumpai. Elemen horizontal (balok) memikul beban yang bekerja secara transversal dari panjangnya dan mentransfer beban tersebut ke kolom vertikal yang menumpunya. Kolom tersebut dibebani secara aksial oleh balok, kemudian mentransfer beban itu ke tanah. Kolom-kolom menerima gaya terpusat, umumnya dari ujung - ujung balok. Jadi, jelas ada hubungan yang erat antara pola dari sistem tumpuan yang membentang vertikal dan sistem tumpuan yang membentang horizontal (Schodek, 1999).

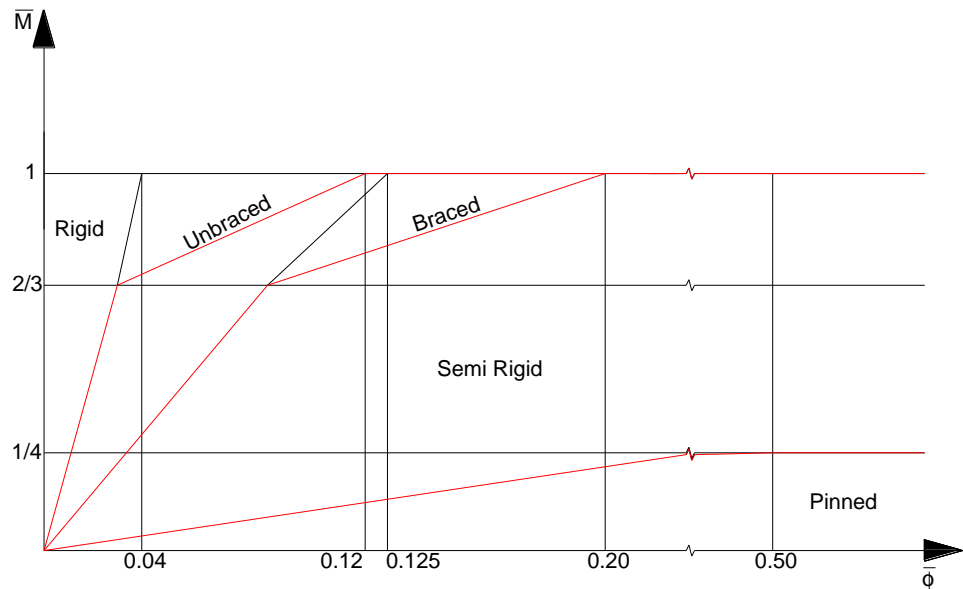
2.3 Perencanaan Sambungan

2.3.1 Sambungan Momen (*Moment Connections*)

Pada umumnya, kurva momen - rotasi dari sebuah sambungan dapat memberikan beberapa sifat atau karakteristik sebagai berikut :

1. Kekakuan dari sebuah sambungan diidentifikasi dari kemiringan kurva.
2. Perilaku sambungan pada umumnya adalah non-linier, dimana kekakuan menurun sedangkan rotasi meningkat.
3. Secara teori, kekakuan awal mempunyai angka yang sama dengan kekakuan setelah dibebani.
4. Kekakuan dari titik kumpul adalah indikasi dari nilai momen kapasitas yang dapat diambil dari nilai tertinggi pada kurva momen – rotasi.
5. Pada *Gambar 2.1*, daktilitas meningkat seiring meningkatnya rotasi.

Daktilitas dari sambungan adalah indikasi dari kapasitas rotasi yang didapat dari titik kumpul sebelum terjadi kehilangan kekuatan secara signifikan. Sebuah sambungan dapat dinyatakan *ductile* (elastis) jika memenuhi syarat bahwa rotasi yang terjadi lebih besar dari 0.03 radians.



Gambar 2.1 Kurva momen – rotasi (M-Ø)
 Sumber : Valerio et al., 2012

Tabel 2.1 Tipe Model Sambungan

Momen of global analysis	Classification of joint		
	elastic	nominally pinned	rigid
rigid-plastic	nominally pinned	full-strength	partial-strength
elastic-plastic	nominally pinned	rigid and full-strength	semi-rigid and partial strength semi-rigid and full strength rigid and partial strength
Type of joint model	simple	continuous	semi-continuous

Sumber : Valerio et al., 2012

Menurut (Anton Soekiman dkk, 2010) Berdasarkan sifat kekakuannya (*rigidity*), metode perencanaan rangka juga dapat diklasifikasi meliputi, *simple connection*, *rigid* dan *semi-rigid*.

1. Simple Connection

Sambungan balok - kolom diasumsikan sederhana (*simple*) dan tidak terjadi momen lentur. Hubungan struktur pada titik diasumsikan sebagai titik kumpul yang terjepit (*pinned*).

2. *Rigid Connection* (Sambungan Kaku)

Sambungan balok dan kolom diasumsikan kaku dan geometri sambungan diubah dengan aplikasi beban yang bekerja pada struktur yang mampu meneruskan semua momen ujung dari balok ke kolom. Secara teori tidak ada rotasi relatif pada rangka dalam titik kumpul dikarenakan kekakuan yang sangat tinggi.

3. *Semi Rigid Connection*

Sambungan *semi rigid* didesain fleksibel tetapi memenuhi syarat - syarat kekakuan seperti sambungan *rigid* tetapi tidak terjepit. Sambungan *semi rigid* dirancang kaku seperti sambungan *rigid* namun mampu meneruskan momen dan reaksi (geser dan gaya normal). Nilai dari rotasi sambungan *semi rigid* lebih kecil dari pada *simple connection*.

2.3.2 Macam - Macam Sambungan Tipe *End-Plate*

Sambungan momen untuk tipe *end-plate* dibagi menjadi tiga bentuk :

1) *Flush end plate connections*

Pada umumnya untuk sambungan *flush end plate*, *end-plate* sambungan dibuat setinggi penampang balok kemudian dilas pada penampang balok dan dibuat pada flens kolom (Anton Soekiman dkk, 2010).

2) *Extended end plate connections*

Untuk sambungan *extended end plate*, *end-plate* dibuat lebih panjang dari tinggi penampang balok, pada perpanjangan bagian atas dipasang baut momen untuk memperkuat sambungan terhadap beban dinamik. Sambungan *extended end plate* memiliki kekakuan dan *moment resistance* yang lebih besar dari pada sambungan *flush end plate* (Anton Soekiman dkk, 2010).

3) *Welded connections*

Selain menggunakan baut, sambungan dapat juga menggunakan las (Anton Soekiman dkk, 2010).

2.3.3 Sambungan Balok Kolom Baja

2.3.3.1 Sambungan Las

Jenis las yang sering dijumpai antara lain las tumpul, las sudut, las baji dan pasak. Dalam penelitian ini, jenis las akan digunakan adalah las sudut.

Ukuran las sudut ditentukan oleh panjang kaki. Panjang kaki harus ditentukan sebagai panjang t_{w1} dan t_{w2} , dari sisi yang terletak di sepanjang kaki segitiga yang terbentuk dalam penampang melintang las Gambar 2.2. 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.

Ukuran minimum las sudut selain dari las sudut yang digunakan untuk memperkuat las tumpul, ditetapkan sesuai Tabel 2.2 kecuali bila ukuran las tidak boleh melebihi tebal bagian yang tertipis dalam sambungan.

Tabel 2.2 Ukuran Minimum Las Sudut

Ketebalan Material dari Bagian Paling Tipis yang Tersambung, in. (mm)	Ukuran Minimum Las Sudut, in. (mm)
Sampai dengan ¼ (6)	1/8 (3)
Lebih besar dari ¼ (6) sampai dengan ½ (13)	3/16 (5)
Lebih besar dari ¼ (13) sampai dengan ¾ (19)	1/4 (6)
Lebih besar dari ¾ (19)	5/16 (8)

* Dimensi kaki las sudut. Las pas tunggal harus digunakan.
Catatan : Lihat pasal J2.2b untuk ukuran maksimum las sudut.

Ukuran maksimum las 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.

Las sudut memikul gaya terfaktor per satuan panjang las, R_u , harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi R_{nw} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan,

$$\phi_f R_{nw} = 0.75 t_t (0.6 f_{uw}) \text{ (las)} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\phi_f R_{nw} = 0.75 t_t (0.6 f_u) \text{ (bahan dasar)} \dots\dots\dots(2.3)$$

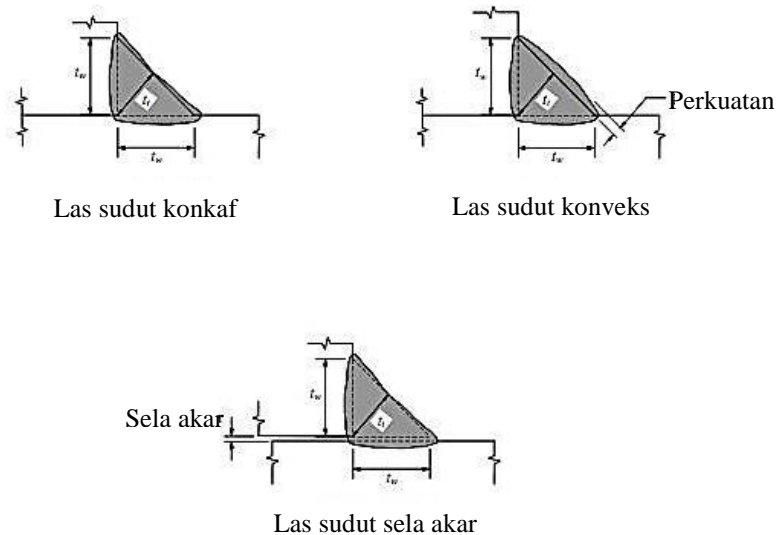
Keterangan :

$\phi_f = 0.75$: adalah faktor tahanan untuk fraktur

f_{uw} : adalah kuat tarik logam las (MPa)

f_u : adalah kuat tarik logam logam dasar (MPa)

t_t : adalah tebal rencana las (mm)



Gambar 2.2 Ukuran las sudut
Sumber : SNI 1729:2002

2.3.3.2 Sambungan Baut Mutu Tinggi (HTB)

2.3.3.2.1 Pendahuluan

Baut yang digunakan pada eksperimental ini, 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*). Menurut SNI 1729:2002, sambungan friksi adalah sambungan yang menggunakan baut mutu tinggi yang dikencangkan untuk menimbulkan tarikan baut minimum yang disyaratkan sedemikian rupa sehingga gaya – gaya geser rencana disalurkan melalui jepitan yang bekerja dalam bidang kontak dan gesekan yang ditimbulkan antara bidang – bidang. Dalam pemasangannya, sambungan baut mutu tinggi dengan menggunakan slip kritis ini akan diberi *pretension* yang disyaratkan sebesar 70% dari kekuatan tarik minimum baut.

2.3.3.2.2 Alat Penyambung Baut Mutu Tinggi

Alat sambung baut mutu tinggi berkekuatan leleh minimal 372 MPa yang mampu mengatasi slip antara dua elemen baja yang disambung pada struktur rangka batang memikul gaya aksial. Baut mutu tinggi harus diberi tegangan awal relatif lebih besar dalam batas praktis dengan menggunakan prosedur putaran mur. Kekuatan alat sambung baut mutu tinggi ditentukan oleh dimensinya, tipe baut, kekuatan leleh (*Tensile Strength*), panjang ulir di dalam elemen pelat dan putaran tarik awal.

Baut kekuatan tinggi dikencangkan untuk menimbulkan tegangan tarik yang ditetapkan pada baut sehingga terjadi gaya jepit pada sambungan. Oleh karena itu, pemindahan beban kerja yang sesungguhnya pada sambungan terjadi akibat adanya gesekan pada potongan yang disambung. Sambungan dengan baut mutu tinggi dapat direncanakan sebagai tipe gesek, bila daya tahan slip yang tinggi dikehendaki.

Tabel 2.3 Sifat - Sifat Baut

Identifikasi ANSI/ASTM	Diameter Baut Inci (mm)	Beban Leleh, a Metode Pengukuran b Panjang, ksi (MPa)	Beban Leleh, a Metode Kekuatan c Leleh ksi (MPa)	Kekuatan Tarik Minimum, ksi (MPa)
A307d, baja karbon rendah Mutu A dan B	¼ sampai 4 (6,35 sampai 104)	-	-	60
A325e, baja berkekuatan tinggi	½ sampai 1 (12,7 sampai 25,4)	85 (585)	92 (635)	120 (825)
Tipe 1, 2, dan 3	1 sampai 1	74	81	105
Tipe 1, 2, dan 3	(28,6 sampai 38,1)	(510)	(560)	(725)
A490f, baja berkekuatan tinggi	¼ sampai 1 (6,35 sampai 25,4)	85 (585)	92 (635)	120 (825)
(Catatan: Pemakaiannya dibatasi oleh AISC hanya untuk baut yang lebih besar dari 1½ inci serta untuk batang berulir dan baut angkur)	1 sampai 1 (28,6 sampai 38,1)	74 (510)	81 (560)	105 (725)
	1 sampai 3 (6,35 sampai 76,2)	55 (380)	58 (400)	90 (620)
A490g, 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

2.3.3.2.3 Perincian Baut Mutu Tinggi dan Prosedur Kemasannya

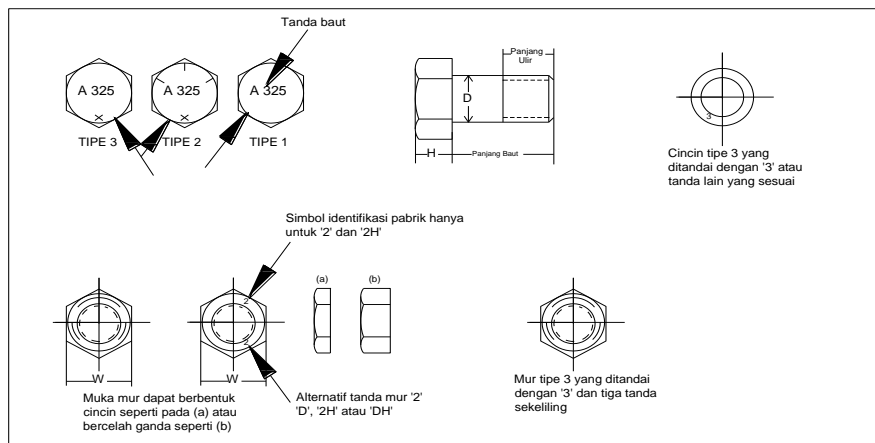
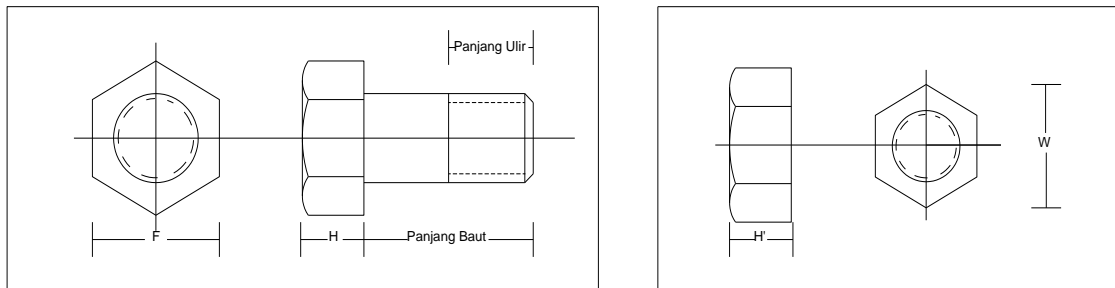
Baik baut A₃₂₅ yang paling banyak dipakai, maupun baut A₄₉₀ yang kadang-kadang digunakan merupakan baut kepala segi enam yang tebal. Baut ini ditunjukkan dengan identifikasi ASTM dan simbol pabrik yang ditulis dipuncak kepala baut. Keduanya memiliki mur segi enam tebal yang diberi tanda standar dan simbol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

Tabel 2.4 Dimensi Baut Mutu Tinggi A₃₂₅ dan A₄₉₀

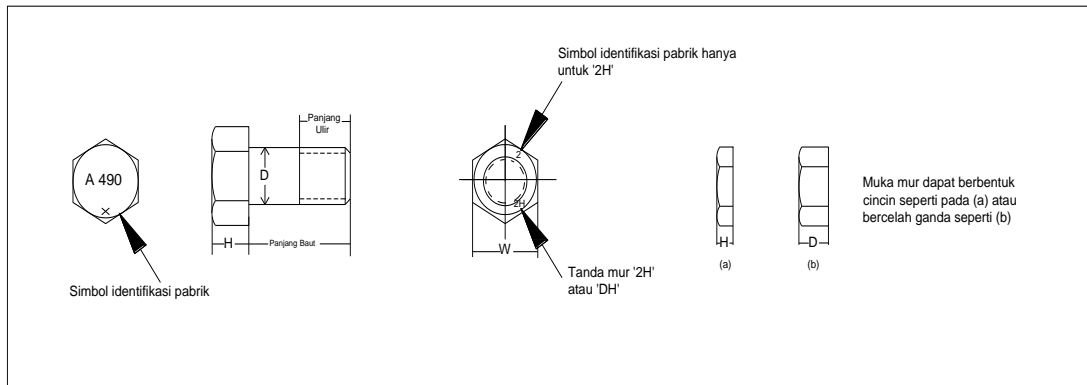
DIMENSI BAUT						DIMENSI MUR					
Diameter		F		H		Pjg Ulir		W		H'	
inc	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm
1/2	12.7	3/8	22.2	5/16	7.9	1	25.4	3/8	22.2	31/64	12.3
5/8	15.9	17/16	27.0	15/54	9.9	5/4	31.8	17/16	27.0	39/64	15.5
3/4	19.1	5/4	31.8	15/32	11.9	11/8	34.9	5/4	31.8	47/64	18.7
7/8	22.2	23/16	36.5	35/54	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 : Charles G Salmon, 1986

Adapun contoh dimensi penentu baut untuk baut mutu tinggi A₃₂₅ dan A₄₉₀ dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



(a)

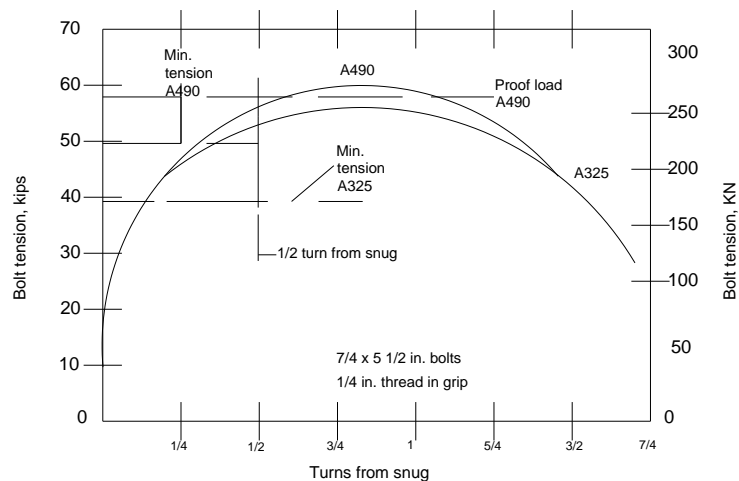


(b)

Gambar 2.3 Dimensi penentu untuk baut (a) A₃₄₅, (b) A₄₉₀
 Sumber : Charles G Salmon, 1986

2.3.3.2.4 Beban Leleh dan Penarikan Baut

Syarat utama dalam pemasangan baut mutu tinggi ialah memberikan gaya pratarik yang memadai dan tidak menyebabkan kehancuran pada baut. Bahan baut menunjukkan tegangan – regangan yang tidak memiliki titik leleh yang jelas.



Gambar 2.4 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.

2.3.3.2.5 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 $\pm 30\%$ dengan variasi rata-rata sebesar $\pm 10\%$. 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 2.5 Pratarik Baut Minimum, 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

Tabel 2.6 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

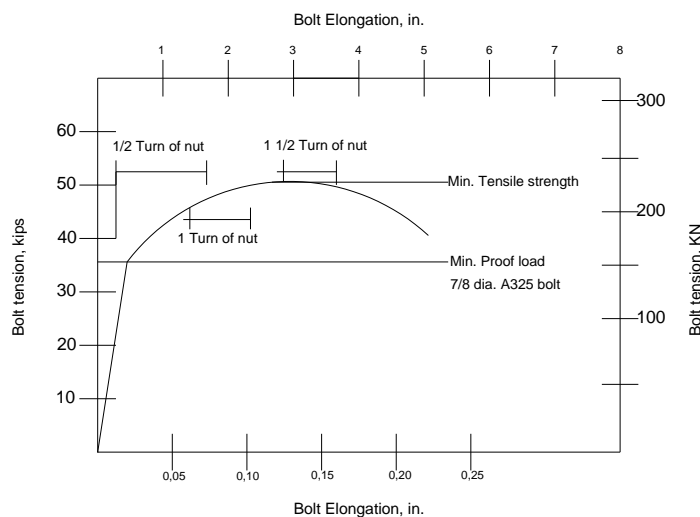
Pada pemasangan sambungan baut mutu tinggi yang diberi *pretension* dapat menggunakan tangan / manual (*turn of nut*) yang dilakukan dengan persyaratan gaya tarik baut tercapai dan pratarik yang menggunakan kunci manual (*turn of nut*) dapat dilihat pada Tabel 2.7 di bawah ini :

Tabel 2.7 Syarat Pratarik dengan Pengencangan Tangan

Panjang Baut (Bagian bawah kepala baut sampai ujung baut)	Posisi permukaan luar bagian yang dibaut		
	Semua permukaan tegak lurus terhadap sumbu baut	Satu permukaan tegak lurus terhadap sumbu baut dan lainnya miring	Semua permukaan miring
$\leq 4d$	$\frac{2}{3}$ putaran	$\frac{1}{2}$ putaran	$\frac{2}{3}$ putaran
$4d < l \leq 8d$	$\frac{1}{2}$ putaran	$\frac{2}{3}$ putaran	$\frac{5}{8}$ putaran
$8d < l \leq 12d$	$\frac{2}{3}$ putaran	$\frac{5}{8}$ putaran	1 putaran

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 2.5 Hubungan tegangan dan regangan pada baut
Sumber : Charles G Salmon, 1986

Secara teoritis cara *turn of nut* mudah dilakukan dalam praktiknya di lapangan. Seperti sambungan yang berupa sampel relatif kecil dan terpisah, maka diperlukan suatu platform khusus yang berfungsi memegang kepala baut mutu tinggi agar tidak ikut berputar ketika mur/nut dilakukan pengencangan ulang.

Metode indikator tarikan langsung adalah metode paling baru untuk menarik baut. Alat yang dipakai adalah cincin pengencang dengan sejumlah tonjolan pada salah satu murnya. Cincin dimasukkan di antara kepala baut dan bahan yang digenggam, dengan bagian tonjolan menumpu pada sisi bawah kepala baut sehingga terdapat celah akibat tonjolan tersebut. Pada saat baut dikencangkan, tonjolan – tonjolan tertekan dan mendesak sehingga akhirnya mengecil. Tarikan baut ditentukan dengan mengukur lebar celah yang ada. Tarikan baut yang baik akan menghasilkan lebar celah sekitar 0.38 mm.

2.3.3.2.6 Kekuatan dan Perilaku Baut Mutu Tinggi

Sebagian besar sambungan struktural menggunakan baut harus dapat mencegah terjadinya gerakan material yang akan disambung dalam arah tegak lurus terhadap panjang baut. Pada kasus seperti ini baut disebut mengalami geser. Kapasitas pikul beban atau kekuatan pikul desain sebuah baut yang mengalami geser tunggal sama dengan hasil kali antara luas penampang melintang dan tegangan geser ijin :

$$P_{geser} = A_b \cdot \bar{\tau}_b \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

P_{geser} = kekuatan geser

A_b = luas penampang melintang baut

$\bar{\tau}_b$ = tegangan geser ijin baut

Untuk meninjau kekuatan baut, selain yang ditinjau baut itu sendiri juga perlu ditinjau kekuatan pelat disekitar lubang baut. Jika pelat tidak kuat maka lubang pada pelat akan berubah bentuk dari bulat menjadi oval. Pada bidang kontak antara baut dan pelat terjadi tegangan yang disebut sebagai tegangan tumpu.

$$P_{tp} = d.t.\tau \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

P_{tp} = kekuatan tumpu

d = diameter lubang

$\bar{\tau}_{tp}$ = tegangan tumpu

t = tebal pelat terkecil antara yang disambung dengan penyambungan

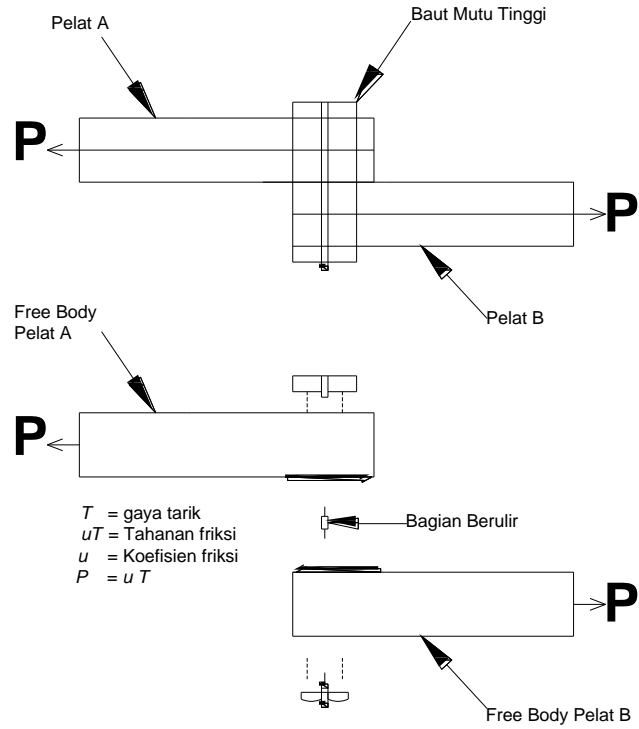
Pada sambungan jenis tumpu dianggap bautnya mengalami geser dan beban yang disalurkan berdasarkan tahanan geser baut selain menumpu pada bagian - bagian yang disambung. Penyambungan jenis tumpu dapat didesain dengan ulir baut terletak di dalam atau di luar bidang geser.

Beban dipindahkan dari satu batang ke batang lainnya melalui sambungan antara batang tersebut. Karena tarikan awal pada baut mutu tinggi cukup besar sehingga gaya gesek yang timbul mampu memindahkan seluruh beban, maka desakan baut terhadap sisi lubang umumnya tidak terjadi pada kondisi beban kerja. Diagram benda bebas untuk perpindahan beban pada sambungan baut kekuatan tinggi dilihat pada gambar di bawah ini.

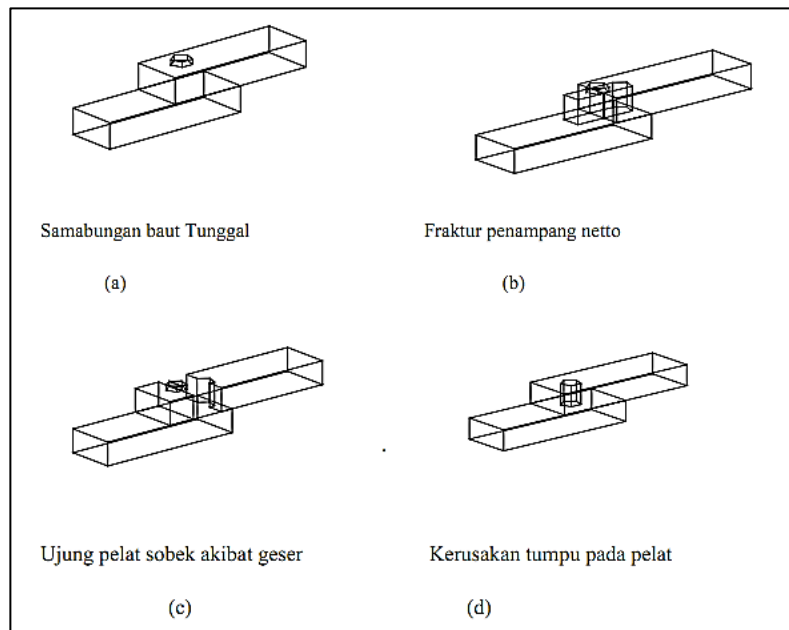
Perpindahan gaya geser dan profil ke penyambung sebagian besar melalui baut dan sebagian lagi melalui gesekan antara pelat (*friction*). Semakin kuat mur diputar maka semakin menyatu profil dengan pelat penyambung dan semakin besar pula gaya yang didistribusikan melalui gesekan pelat tersebut. Hal ini terjadi terutama pada baut mutu tinggi yang sanggup memberikan gaya tarik awal sehingga pelat menjadi sangat rapat.

Bila gesekan sendiri mampu memindahkan beban, setiap alat penyambung yang digunakan menyalur beban yang sama besar (asalkan material dan ukuran sama). Namun, jika beban sedemikian besar hingga tahanan gesek tidak mampu memindahkannya, maka tepi lubang akan mengalami desakan. Pada saat sambungan berada diambang kehancuran, gaya gesek hanya sedikit pengaruhnya terhadap ragam kehancuran (*failure mode*). Sebaliknya kekuatan pelat bersama kekuatan tarik dan kekuatan

geser baut akan menentukan kekuatan sambungan. Ragam kehancuran yang mungkin terjadi diperlihatkan pada Gambar 2.7 di bawah ini.



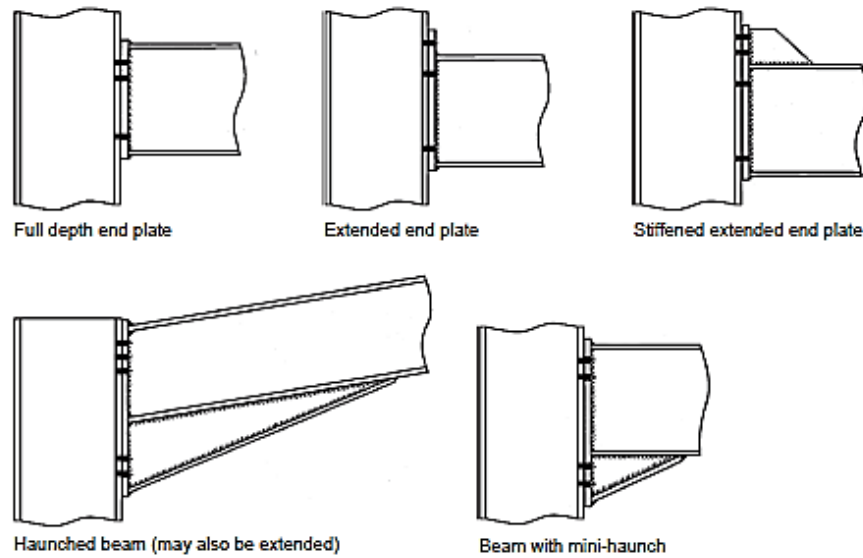
Gambar 2.6 Pemindahan beban pada sambungan baut mutu tinggi
 Sumber : Charles G Salmon, 1986



Gambar 2.7 Kehancuran pada sambungan baut mutu tinggi
 Sumber : Charles G Salmon, 1986

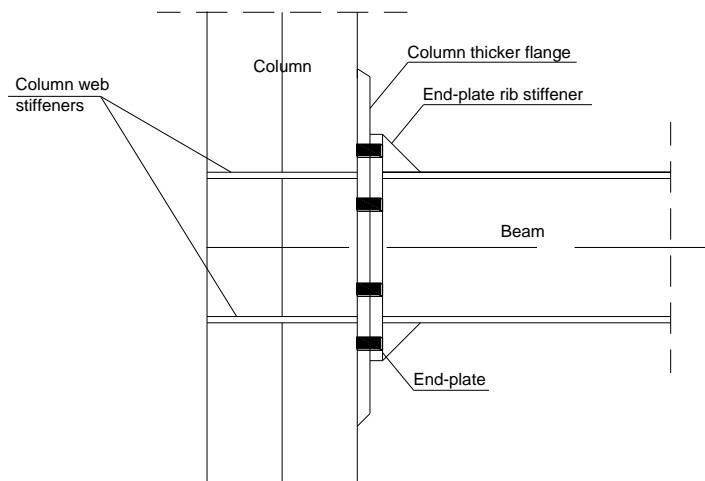
2.3.4 Tipe Sambungan Balok - Kolom Baja *End-Plate*

Tipe sambungan balok-kolom tipe *end-plate* yang digunakan dalam struktur baja (BCSA, 2013) :



Gambar 2.8 Tipe sambungan balok - kolom menggunakan baut *end plate*
Sumber : *Joints in Steel Construction, Moment-Resisting Joints to Eurocode 3*, 2013

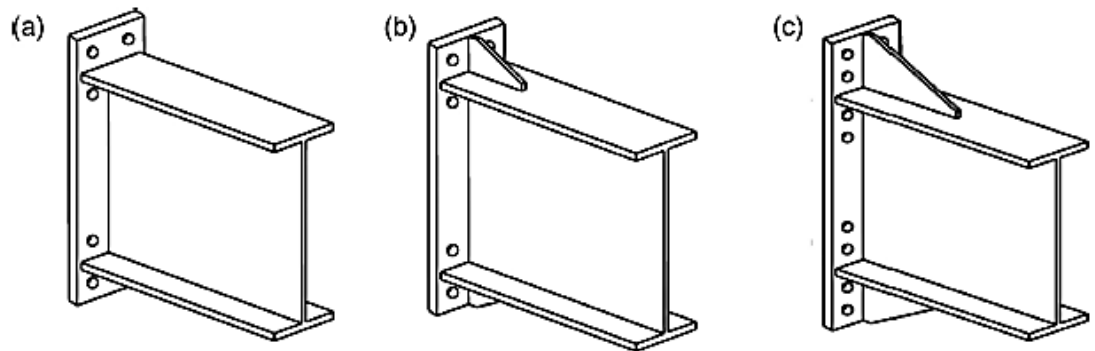
Pada Gambar 2.9 ditunjukkan konfigurasi sambungan balok - kolom baja dengan menggunakan *end-plate* dan pengaku / *stiffener*.



Gambar 2.9 konfigurasi sambungan
Sumber : Ismail et al., 2016

2.4 Investigasi Eksperimental (sambungan antara balok – kolom baja)

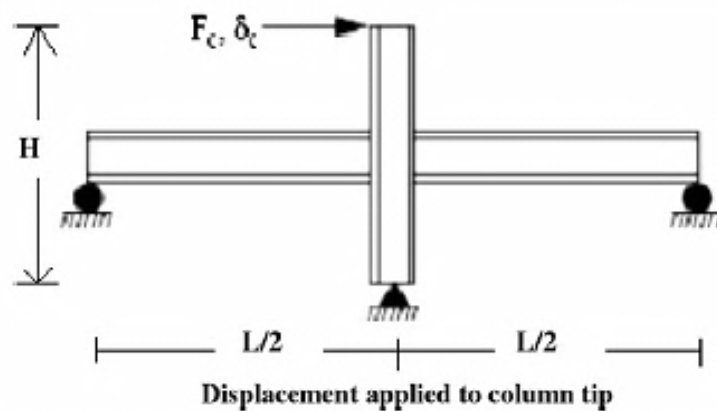
Berikut ini adalah beberapa penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan perilaku sambungan antara balok - kolom baja.



Gambar 2.10 Sambungan *extended end plate* (a) 4 baut tanpa pengaku, (b) 4 baut dengan pengaku, (c) 8 baut dengan pengaku

Sumber : Morrison et al., 2017

Pada Gambar 2.10, penelitian secara eksperimental dilakukan dengan menggunakan sambungan *extended end plate* dengan menggunakan alat sambung baut. Adapun variasi yang digunakan juga dengan penambahan pengaku dan tanpa pengaku.



Gambar 2.11 Model pembebanan sambungan balok - kolom

Sumber : Elsayed et al., 2011

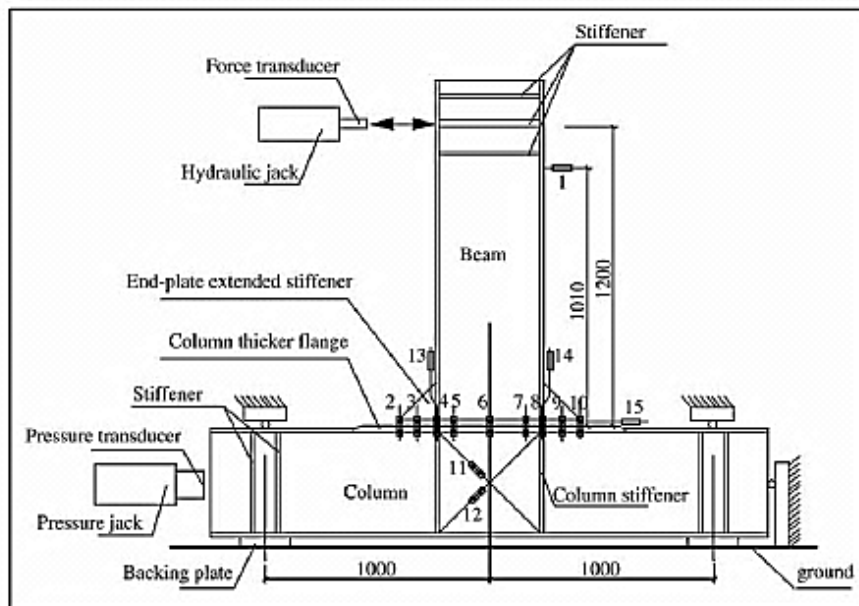
Pada Gambar 2.11, model pembebanan sambungan balok - kolom yang digunakan pada penelitian Elsayed et al. (2011) menggunakan perletakan rol pada elemen balok sedangkan pada kolom menggunakan perletakan sendi. Pada studi analisis ini, perletakan hanya pada kolom saja menggunakan perletakan rol - sendi.

Untuk studi analisis ini, model sambungan yang akan digunakan untuk memverifikasi hasil pemodelan ini yang kemudian menjadi acuan untuk pengembangan pemodelan lain adalah menggunakan penelitian Gang Shi et al. (2006).

Tabel 2.8 Detail Sambungan Spesimen *Extended End Plate*

Specimen number	Connection type	End-plate thickness (mm)	Bolt diameter (mm)	Number of bolts	Column stiffener	End-plate stiffener
JD1	Flush	20	20	6	Yes	-
JD2	Extended	20	20	8	Yes	Yes
JD3	Extended	20	20	8	Yes	No
JD4	Extended	20	20	8	No	Yes
JD5	Extended	25	20	8	Yes	Yes
JD6	Extended	20	24	8	Yes	Yes
JD7	Extended	25	24	8	Yes	Yes
JD8	Extended	15	20	8	Yes	Yes

Sumber : Gang Shi et al., 2006



Gambar 2.12 Test spesimen dan susunan pembebanan

Sumber : Gang Shi et al., 2006

Gambar 2.12 menampilkan perpindahan transduser untuk mengukur deformasi yang terjadi. No.1 digunakan untuk mengamati perpindahan pada titik pembebanan. No.2 - 10 mengukur deformasi relatif antara *end-plate* dan sayap kolom. No.11 dan 12 mengukur deformasi geser dalam pada panel zone. No.13 dan 14 untuk mengatur permukaan sayap kolom dan posisinya diletakkan dipusat garis, dimana digunakan nantinya untuk mengukur deformasi geser dari panel zone tersebut. No.15 mengukur slip antara *end-plate* dan sayap kolom.



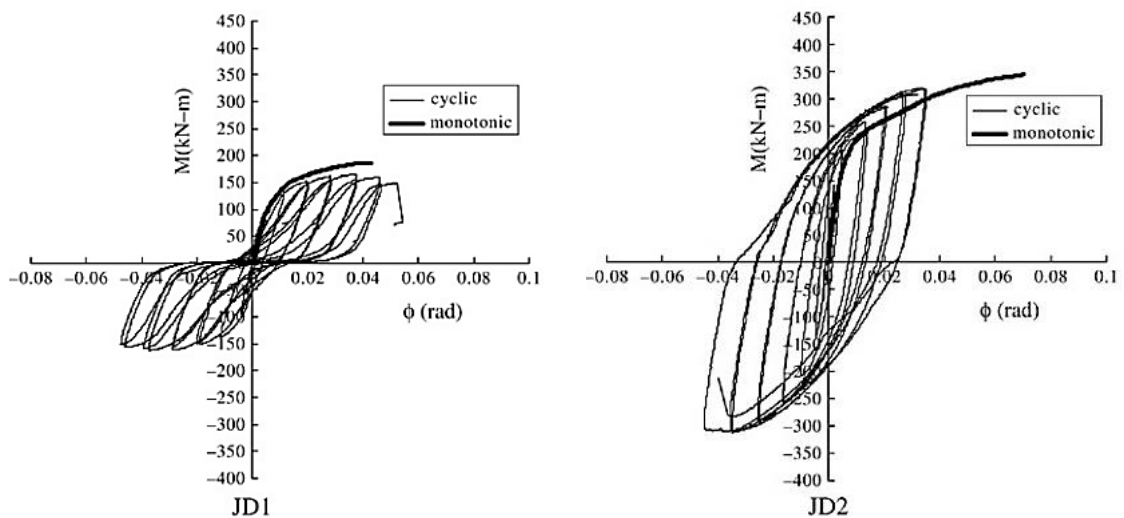
Gambar 2.13 Test set-up yang dilakukan
Sumber : Gang Shi et al., 2006

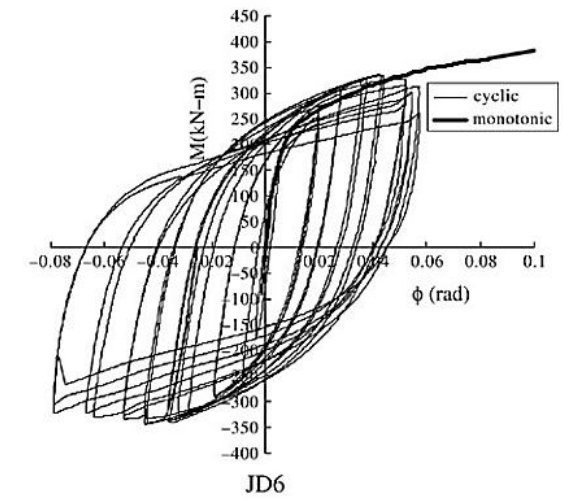
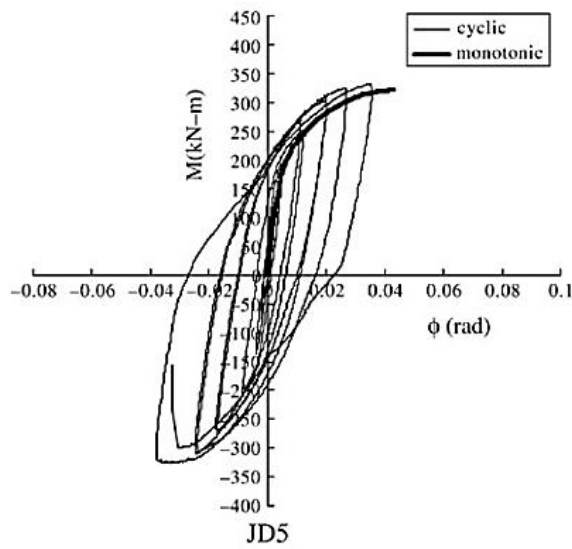
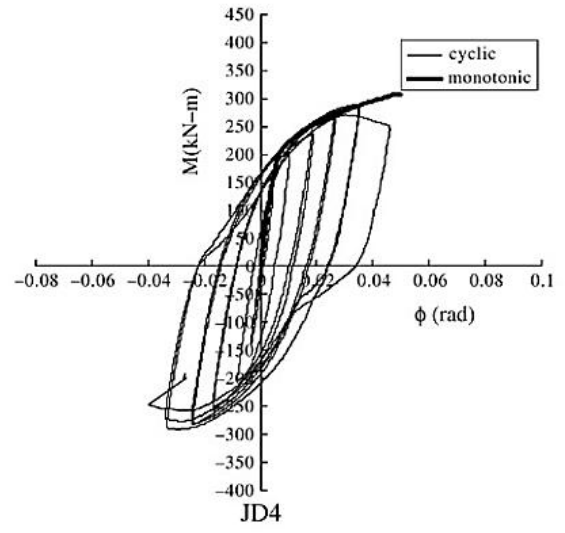
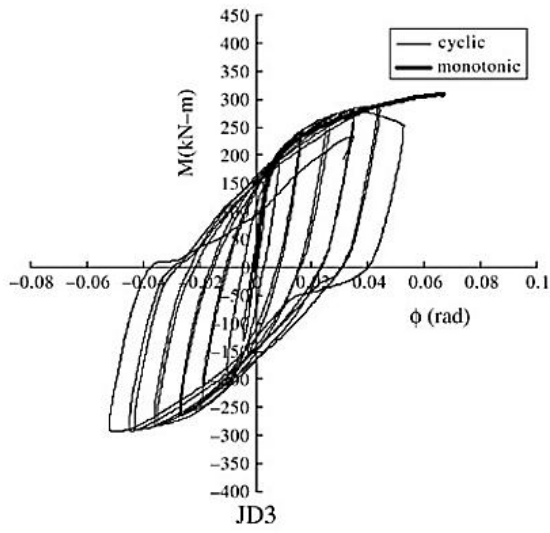
Pada Gambar 2.8 menunjukkan test eksperimental yang dilakukan pada spesimen JD2. Semua baut yang digunakan pada spesimen ini dikencangkan yang dikalibrasikan menggunakan metode kunci torsi. Kunci torsi disesuaikan untuk membandingkan gaya torsi dengan gaya tarik aksial yang bekerja. Nantinya pada sambungan yang akan dianalisis akan ada kontak permukaan antara *end-plate* dan sayap kolom yang kemudian terjadi mekanisme slip yang nilai koefisien diberikan sebesar 0.44.

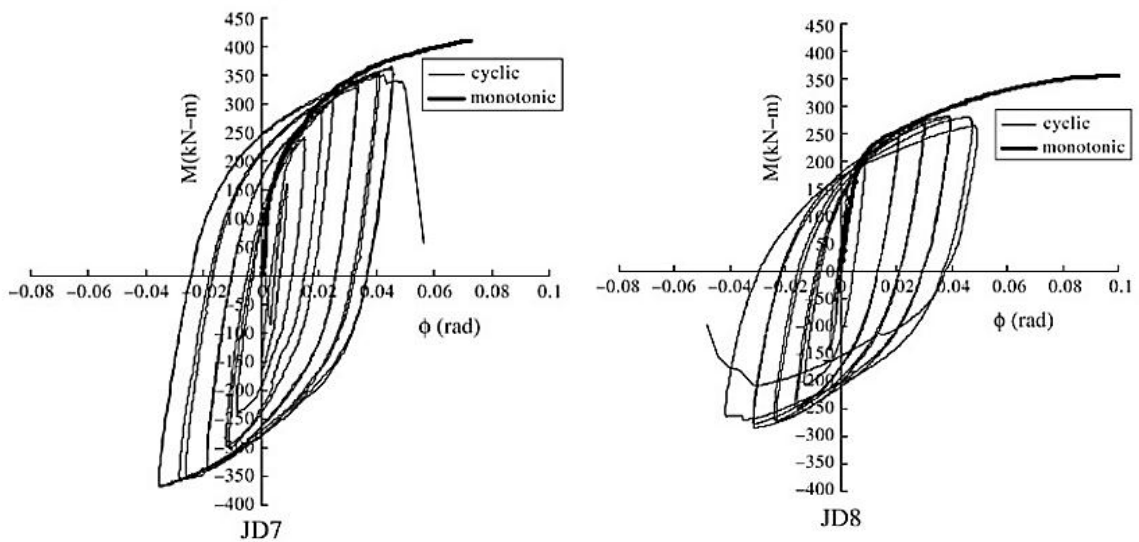


Gambar 2.14 Mode kegagalan dari spesimen
 Sumber : Gang Shi et al., 2006

Gambar 2.14 menunjukkan model kegagalan yang terjadi untuk delapan spesimen yang dilakukan pada test eksperimental. Adapun pada penelitian ini akan diambil dua sampel spesimen yaitu JD2 dan JD4 yang nantinya akan diverifikasi menggunakan software ABAQUS 6.14. Kemudian hasil dari analisis numerik yang dilakukan akan dibandingkan dengan hasil test eksperimental. Dilihat apakah kegagalan yang terjadi sesuai dengan model kegagalan pada eksperimental.





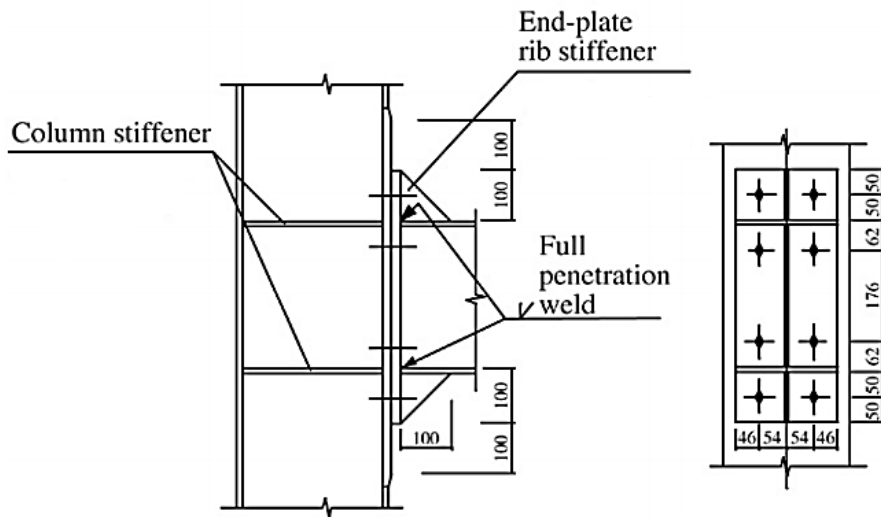


Gambar 2.15 Kurva momen – rotasi dari tiap spesimen
 Sumber : Gang Shi et al., 2006

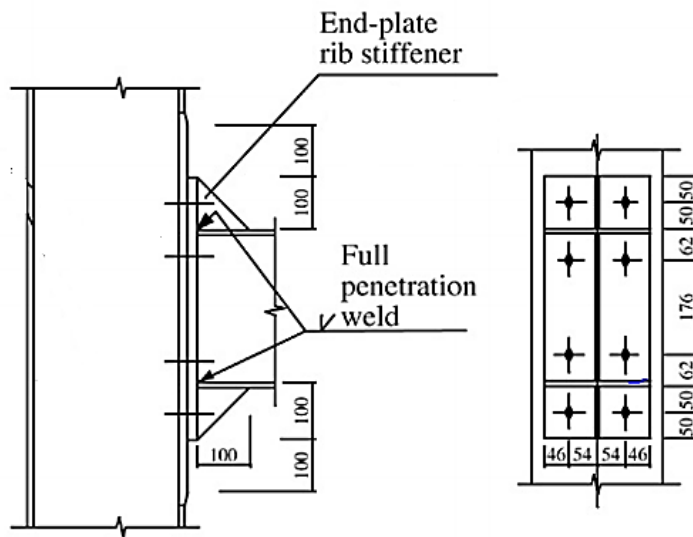
Gambar 2.15 menunjukkan hasil kurva histerisis dari delapan spesimen yang dilakukan. Adapun kurva spesimen untuk tipe JD2 dan JD4 nantinya akan dibandingkan dengan hasil numerik dari program Abaqus 6.14 yang didapat. Kurva momen - rotasi tersebut adalah kontribusi geser yang terjadi pada panel zone di kolom dan terjadinya rotasi gap akibat deformasi relatif antara *end-plate* dan sayap kolom.

2.5 Pemodelan Sambungan antara Balok – Kolom Baja

Pemodelan yang akan dilakukan pada penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan Gang Shi et al., 2006. Dalam penelitian ini menggunakan dua variasi tipe spesimen yang telah dilakukan Gang Shi et al dan menggunakan metode perhitungan elemen hingga. Pemodelan dilakukan dengan memodelkan penambahan pengaku kolom dan tanpa pengaku kolom dalam program elemen hingga secara 3D solid model. Pemodelan dapat dilihat pada Gambar 2.16. Perletakan pada pemodelan terletak pada kedua ujung kolom, yaitu sendi dan rol.



(a)



(b)

Gambar 2.16 Detail sambungan untuk spesimen (a) JD2 dan (b) JD4
 Sumber : Gang Shi et al., 2006

BAB III

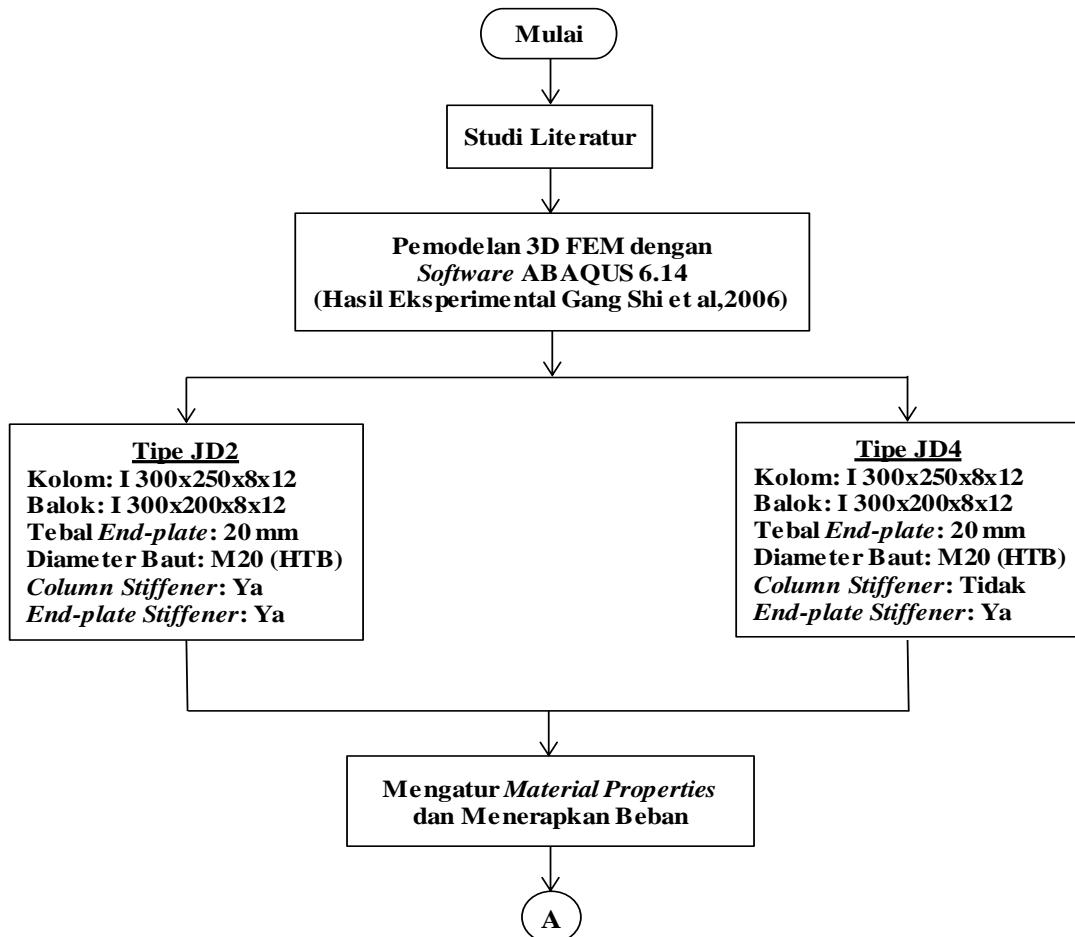
METODOLOGI

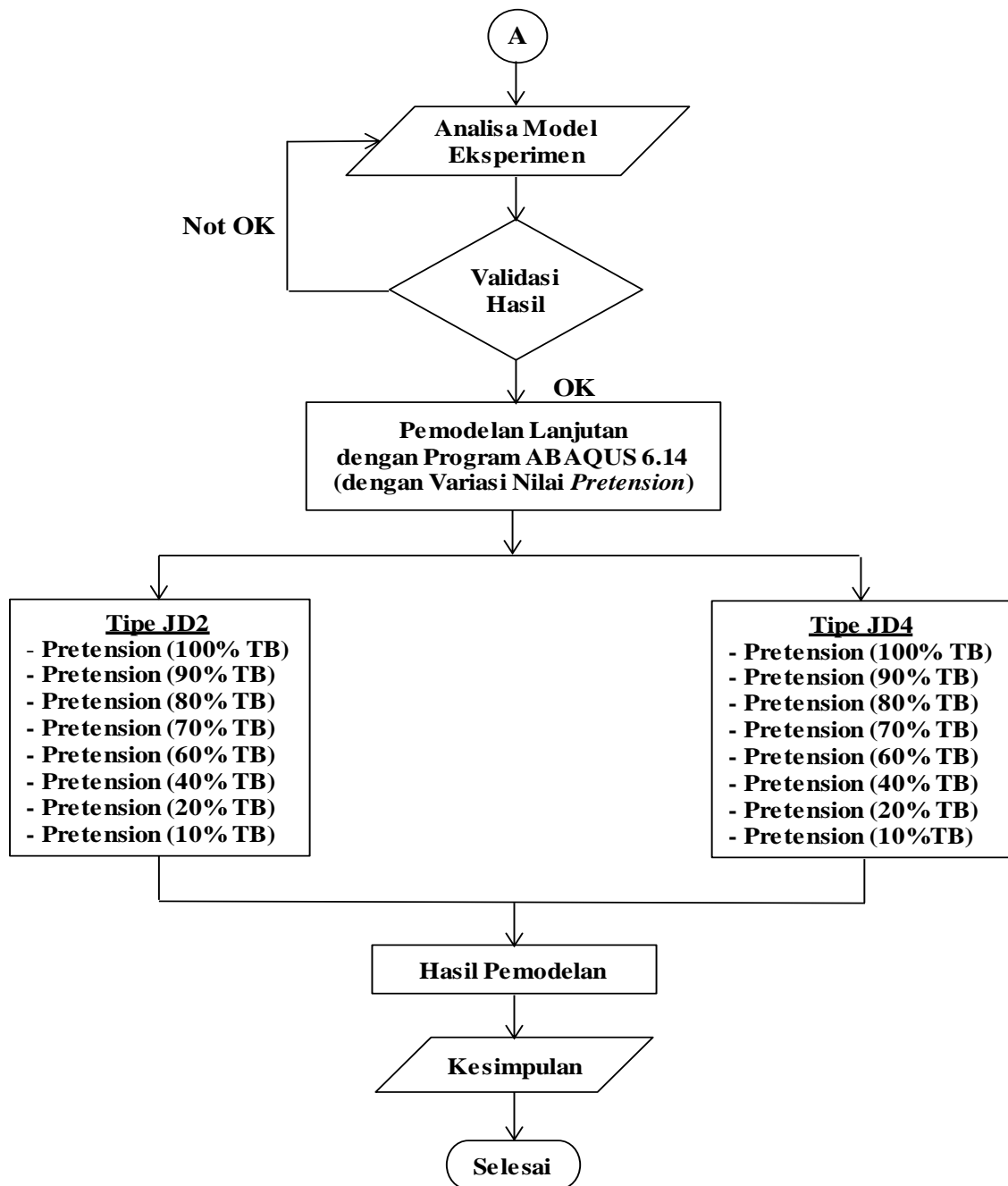
3.1 Umum

Studi analisis tesis ini bertujuan untuk mempelajari kekuatan dari sambungan momen tipe pelat ujung (*End Plate Connection*) dengan menggunakan sistem sambungan yang menggunakan model *extended*. Studi analisis ini dimulai dari pengumpulan literatur dan pedoman perancangan sampai mendapatkan kesimpulan dari analisa struktur yang akan disajikan.

3.2 Bagan Alir Penyelesaian Tesis

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mengerjakan tesis ini adalah sebagai berikut :





Gambar 3.1 Bagan alir metodologi

3.3 Metodologi Pengerjaan Tesis

Dari diagram alur di atas dapat dijelaskan metodologi yang digunakan dalam penyusunan adalah sebagai berikut :

3.3.1 Studi Literatur

Studi pada tesis ini bertujuan untuk mengetahui efek penggunaan sambungan struktur baja plat ujung tipe *extended*, dimana model penyambungan momen menggunakan tipe *end-plate*. Tahap ini mempelajari literatur-literatur yang berkaitan dan relevan dengan masalah penelitian yang diambil, terutama pada bagian metode-metode analisis yang digunakan. Sumber-sumber referensi ini dapat berupa buku teks, jurnal ilmiah, *proceeding* dan peraturan Standar Nasional maupun Internasional. Studi literatur ini tidak hanya berhenti sampai pada tahap awal saja, tetapi terus berlangsung selama proses penelitian.

Proses dan Tahap Studi :

1. Penelitian diawali dengan perencanaan data-data yang akan dibutuhkan dalam proses perhitungan, seperti dimensi profil yang akan digunakan, dimensi sambungan pelat yang akan digunakan, jenis jenis material bahan yang digunakan serta baut yang akan digunakan.
2. Perhitungan pembebanan dalam sambungan digunakan sesuai data beban yang digunakan pada eksperimental Gang Shi et al, 2006 dan Meng Wang et al, 2013 dengan memperhitungkan keruntuhan yang akan terjadi dalam sambungan yang akan dibebani.
3. Akhir dari studi analisis ini adalah untuk memperoleh perbandingan mengenai daktilitas yang baik ketika menerima energi dissipasi yang besar pada lokasi rawan gempa kuat dan keekonomisan penggunaan sambungan baja tipe *extended end plate*, karena proses pengerjaan sambungan ini juga dapat mengukur tingkat kemudahan dalam hal pemasangan di lapangan.

3.3.2 Pemodelan 3D FEM Hasil Eksperimental (Gang Shi, et al., 2006)

Proses dan Tahap Pengerjaan:

- Melakukan pemodelan pada program ABAQUS 6.14
- Mengatur *material properties* dan menerapkan beban
- Melakukan analisis FEM *Nonlinier structural*
- Mendapatkan hasil (validasi).

Hasil eksperimental dari Gang Shi et al ini menjadi acuan dalam pemodelan. Hasil eksperimen ini dianggap sebagai perilaku yang sebenarnya terjadi pada jenis sambungan akibat beban siklik.

Spesifikasi dan ukuran sambungan dapat dilihat pada tabel 3.1 di bawah ini. 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.

Tabel 3.1 Material Properties dan Spesimen Model

Material	fy	fu	Modulus Elastisitas (E)
	MPa	MPa	MPa
Steel (t < 16 mm)	391	559	190707
Steel (t > 16 mm)	363	573	204228
Bolts (M20)	995	1160	204228

Tabel 3.2 Penentuan Parameter Sambungan

Detail Sambungan

Tipe Sambungan	<i>Extended</i>
Dimensi Kolom	300x250x8x12
Dimensi Balok	300x200x8x12
Tebal <i>End Plate</i> (mm)	20
Tebal <i>Column Stiffener</i> (mm)	12
Tebal <i>Extended End Plate Stiffener</i> (mm)	10
Mutu Baja	Q345
Mutu Baut	Grade 10.9
Diameter Baut (mm)	M20
Las	E70XX
<i>Pretension Bolt</i>	Ya

Tabel 3.3 Model yang Dianalisis

Nama Model	Model Sambungan	Tebal <i>End Plate</i> (mm)	Diameter Baut (mm)	Mutu Baut	Column Stiffener	Extended End Plate Stiffener
Tipe JD2	Eksterior Joint	20	M20	Grade 10.9	Ya	Ya
Tipe JD4	Eksterior Joint	20	M20	Grade 10.9	Tidak	Ya

Material yang digunakan pada pemodelan pengembangan yang dianalisis adalah baja. Sedangkan untuk berat jenis yang digunakan sebesar 7850 kg/m³.

3.4 Kontrol Penampang dan Sambungan

3.4.1 Kuat Rencana

Desain komponen struktur untuk mendapatkan kuat rencana dikontrol berdasarkan SNI 1729:2015 agar dapat memikul gaya - gaya yang terjadi. Perencanaan komponen struktur dilakukan untuk mengetahui besar tegangan kritis dan faktor ketahanan pada sambungan yang ditinjau dari kekuatan tarik, tekan, lentur dan geser yang terjadi.

a. Komponen struktur tanpa elemen langsing

- Tekuk Lentur

$$\phi_c = 0.90$$

Tegangan kritis, F_{cr} yang ditentukan sebagai berikut:

a) Bila $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{E/F_y}$ (atau $\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$).....(3.1)

$$F_{cr} = [0.658^{F_y/F_e}] F_y$$

b) Bila $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{E/F_y}$ (atau $\frac{F_y}{F_e} > 2.25$).....(3.2)

$$F_{cr} = 0.877 F_e$$

Keterangan :

F_e = tegangan tekuk kritis elastis yang ditentukan sesuai persamaan (MPa)

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \dots\dots\dots(3.3)$$

- Tekuk Torsi dan Tekuk Torsi-Lentur dari Komponen Struktur Tanpa Elemen Langsing

b. Komponen struktur dengan elemen langsing

a) Bila $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{E/QF_y}$ (atau $\frac{QF_y}{F_e} \leq 2.25$).....(3.4)

$$F_{cr} = Q[0.658^{QF_y/F_e}]F_y$$

b) Bila $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{E/QF_y}$ (atau $\frac{QF_y}{F_e} > 2.25$).....(3.5)

$$F_{cr} = 0.877F_e$$

Keterangan :

F_e = tegangan tekuk elastis, dihitung dengan menggunakan persamaan (3.3) untuk komponen struktur simetris ganda, ksi (MPa).

Q = faktor reduksi bersih yang menghitung untuk semua elemen tekan langsing;

= 1.0 untuk komponen struktur tanpa elemen langsing untuk elemen tekan merata.

= $Q_s Q_a$ untuk komponen struktur dengan penampang elemen langsing untuk elemen dalam tekan merata.

3.4.2 Kontrol Sambungan

3.4.2.1 Syarat Sambungan Tahan Gempa

Berdasarkan SNI 1729:2015 tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung dan SNI 1729:2002 tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung Pasal 15.7.6. Perbandingan momen kolom terhadap momen balok. Hubungan berikut ini harus dipenuhi pada sambungan balok-kolom. Adapun rumus konsep *Strong Column Weak Beam* adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Sigma M_{pc}}{\Sigma M_{pb}} > 1 \dots\dots\dots(3.6)$$

Keterangan :

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

ΣM_{pb} adalah jumlah momen-momen balok pada pertemuan as balok dan as kolom. ΣM_{pb} ditentukan dengan menjumlahkan proyeksi kuat lentur nominal balok di daerah sendi plastis pada as kolom. Diperkenankan untuk mengambil $\Sigma M_{pb} = (1.1 R_y M_p - M_y)$, dengan M_y adalah momen tambahan akibat amplifikasi gaya geser dari lokasi sendi plastis ke as kolom. Sebagai alternatif, diperkenankan untuk menentukan ΣM_{pb} dari hasil pengujian atau dengan analisis rasional berdasarkan pengujian. Bila sambungan dibuat menggunakan penampang balok yang direduksi maka diperkenankan untuk mengambil $\Sigma M_{pb} = (1.1 R_y M_p - M_y)$, dengan Z adalah modulus plastis minimum pada penampang balok yang direduksi

- A_g adalah luas penampang bruto kolom (mm²)
- 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 (mm³)

3.4.2.2 Menghitung M^*_{pc}

$$Z_c = Z_x = Z_y = (0.5 \times d \times (2 \times tw) \times 0.5 \times d) + (d - 2 \times tw) \times tw \times 0.5 \times (d - tw) \dots \dots (3.7)$$

$$\Sigma M^*_{pc} = 2 \times (Z_c \times (f_y - \frac{N_{uc}}{A_g})) \dots \dots \dots (3.8)$$

3.4.2.3 Menghitung M^*_{pb}

$$Z_x = 2 \times ((b-2xc) \times tf) \times (0.5 \times d - (0.5 \times tf)) + (((0.5 \times d) - tf)^2 / 2 \times tw) \dots \dots \dots (3.9)$$

$$\Sigma M^*_{pb} = 1.1 \times R_y \times f_y \times Z_x + M_y \dots \dots \dots (3.10)$$

Dimana :

$R_y = 1.5$ untuk mutu baja BJ 41 ke bawah (lebih lunak)
 $= 1.3$ untuk mutu baja BJ 50 ke atas (lebih keras)

3.4.2.4 Kontrol Panel Zone

Berdasarkan SNI 1729:2002 tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung Pasal 15.7.3. Daerah panel pada sambungan balok ke kolom (badan kolom sebidang dengan badan kolom).

Kuat geser : gaya geser terfaktor V_u pada daerah panel ditentukan berdasarkan momen lentur balok sesuai dengan kombinasi pembebanan (15.3-1) dan (15.3-2). Namun V_u 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 :

$$\text{Bila } Nu \leq 0.75N_y, \phi_v V_n = 0.6 \phi_v f_y d_c t_p \left[1 + \frac{3b_{cf} \times t_{cf}^2}{d_b d_c t_p} \right] \dots \dots \dots (3.11)$$

Berdasarkan SNI 1729:2002 tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung Pasal 15.7.3.2. Tebal daerah panel : ketebalan masing-masing pelat badan penampang kolom atau pelat pengganda pada daerah panel, ditetapkan menurut persamaan berikut :

$$t \geq (d_z + w_z) / 90 \dots \dots \dots (3.12)$$

Keterangan :

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

3.4.3 Sambungan

3.4.3.1 Sambungan Las

Ukuran minimum las sudut dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 3.4 Ukuran Minimum Las Sudut

Ketebalan Material dari Bagian Paling Tipis yang Tersambung, in. (mm)	Ukuran Minimum Las Sudut, ^[a] in. (mm)
Sampai dengan 1/4 (6)	1/8 (3)
Lebih besar 1/4 (6) sampai dengan 1/2 (13)	3/16 (5)
Lebih besar 1/2 (13) sampai dengan 3/4 (19)	1/4 (6)
Lebih besar dari 3/4 (19)	5/16 (8)

3.4.3.2 Sambungan Baut

Ukuran sambungan baut dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 3.5 Ukuran Variasi Baut

Ukuran Baut, mm	Baut A325M	Baut A490M
M16	91	114
M20	142	179
M22	176	221
M24	205	257
M27	267	334
M30	326	408
M36	475	595

*Sama dengan 0,70 dikalikan kekuatan tarik minimum baut, dibulatkan mendekati kN, seperti disyaratkan dalam spesifikasi untuk baut ASTM A325M dan A490M dengan ulir UNC.

3.4.4 Pemodelan Pada Masing – Masing Tipe Sambungan

Pemodelan pada sambungan dilakukan dengan *software* ABAQUS 6.14. Pemodelan ini meliputi penggambaran struktur, pendefinisian material elemen struktur balok, kolom dan pelat sambung, pendefinisian beban dan *boundary condition*, proses melakukan interaksi antar elemen-elemen struktur hingga proses

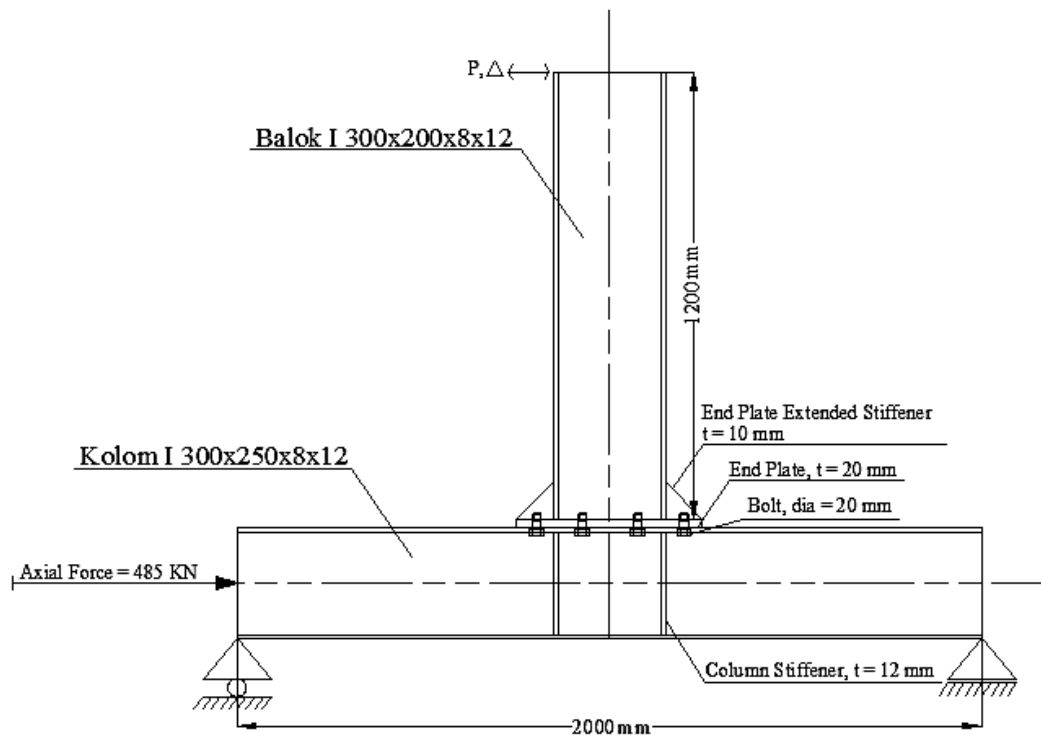
meshing, input beban yang bekerja serta menjalankan analisis pemodelan dan pembacaan hasil analisis pemodelan tersebut.

3.4.4.1 Model – model Sambungan

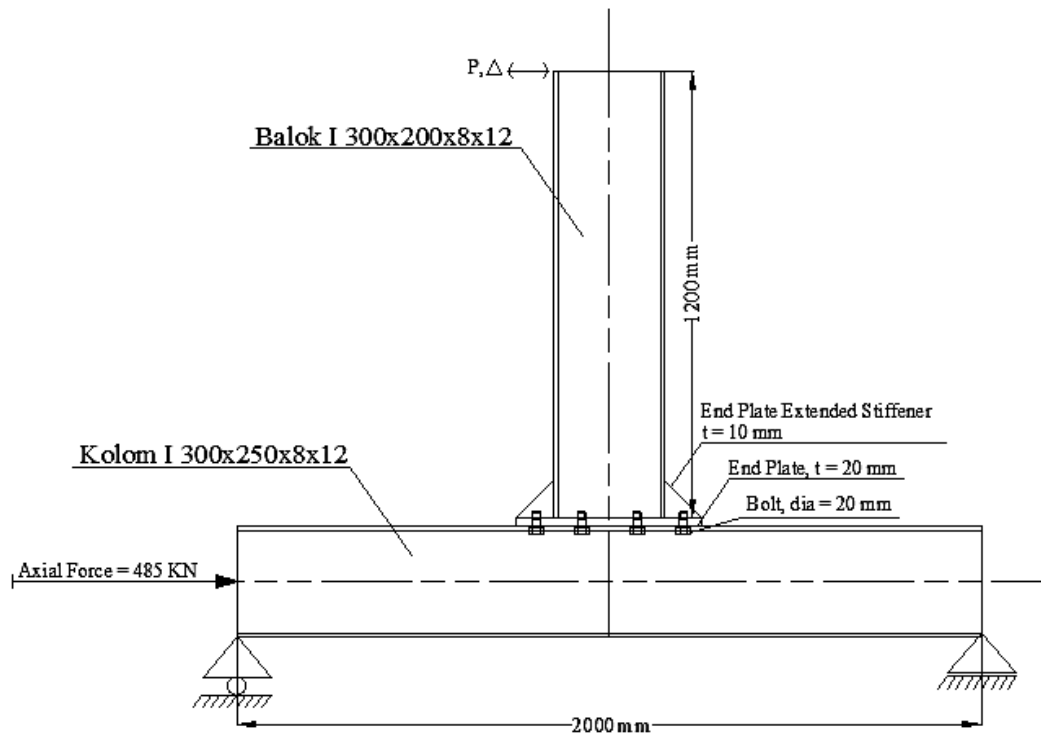
Pada tesis ini, terdapat dua tipe sambungan dari eksperimental yang akan dianalisis dan untuk lanjutan pemodelan menggunakan tipe sambungan yang sama dengan memvariasikan gaya pratarik pada baut mutu tinggi yang digunakan, kemudian dimodelkan dan dianalisis hubungan antara kuat tarik dan penambahan panjang yang terjadi akibat pengaruh gaya pratarik baut.

3.4.4.1.1 Model Sambungan Ekperimental

1. Spesimen JD2



2. Spesimen JD4

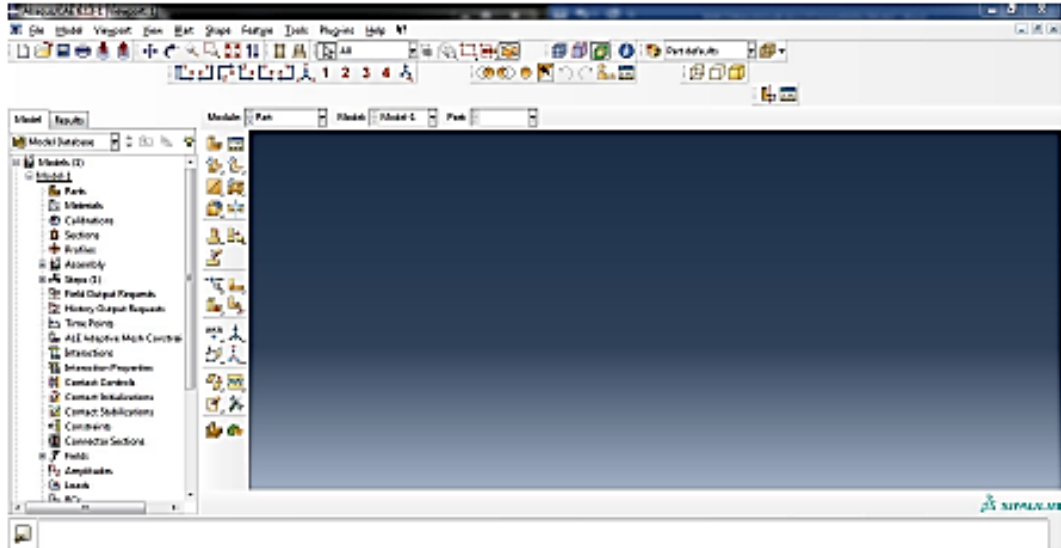


Gambar 3.2 Model sambungan spesimen JD2 dan JD4

Tabel 3.6 Rekapitulasi dari Model Lanjutan

Nama Model	% Pretension
Tipe JD2	100%
	90%
	80%
	70%
	60%
	40%
	20%
	10%
Tipe JD4	100%
	90%
	80%
	70%
	60%
	40%
	20%
	10%

Model pada program bantu *finite element* dibuat dengan langkah - langkah sebagai berikut :



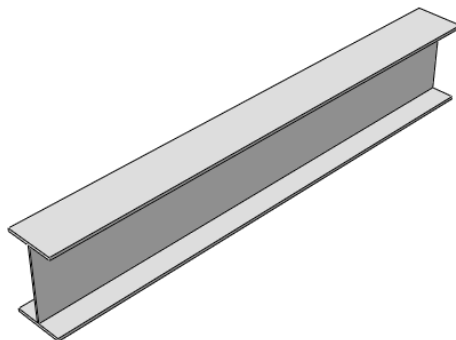
Gambar 3.3 Tampilan muka program bantu FE ABAQUS 6.14

1. Modul *Part*

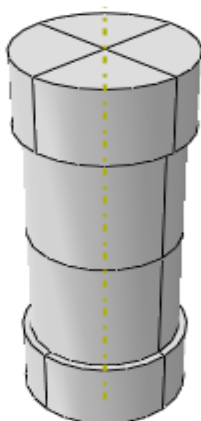
Modul dan bentuk geometri dari komponen digambarkan pada modul part. Data geometri model dapat dilihat pada tabel 3.3.

Modul geometri tipe eksperimental dan tipe model lanjutan dibuat pada modul part menggunakan Solid-Extrusion. Diambil elemen struktur kolom profil I 300x250x8x12 pada model tipe JD2 sebagai contoh.

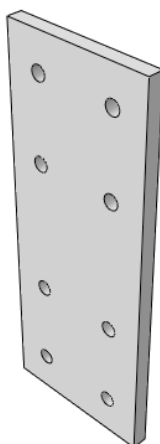
- *Name* = kolom profil I
- *Create Part*
- *Modelling Space* > 3D
- *Type* > *Deformable*
- *Base feature, Shape* > *Solid, Type* > *Extrusion*
- *Continue* > *Create Lines: Connected* (300x250x8x12)
- *Done* > *Depth* : 2000



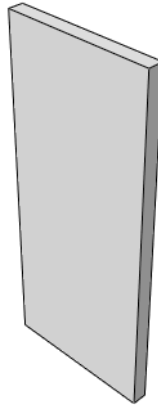
Gambar 3.4 Kolom profil I



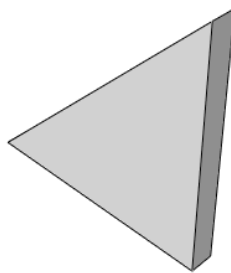
Gambar 3.5 Baut M20



Gambar 3.6 *End Plate*, $t = 20$ mm



Gambar 3.7 *Column Stiffener*, $t = 12$ mm



Gambar 3.8 *Extended End Plate Stiffener*, $t = 10$ mm

Setelah geometri dibuat pada modul part, selanjutnya mendefinisikan material yang akan digunakan pada sub-bab berikutnya.

2. Modul Property

Material pada komponen didefinisikan pada modul ini. Sifat dan karakteristik tiap material dimasukkan datanya ke dalam modul properti ini. Pada pemodelan ini, parameter yang akan didefinisikan adalah sebagai berikut:

a) *Density*

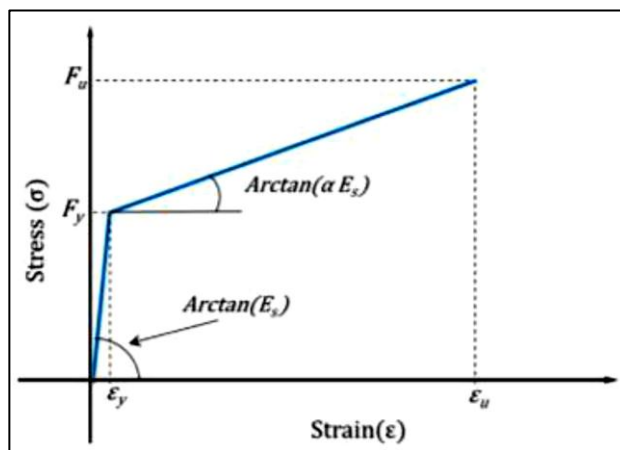
Density merupakan berat jenis dari material yang dimodelkan. Material dalam model ini adalah baja dengan nilai $density = 7850 \text{ kg/m}^3$.

b) *Elastic*

Nilai yang akan dimasukkan pada *property elastic* adalah nilai modulus elastisitas dan rasio *poisson*. Pada baja digunakan modulus elastisitas seperti pada tabel 3.1. Nilai rasio poisson sebesar 0.3.

c) *Plastic*

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



Gambar 3.9 Hubungan tegangan - regangan baja (Khanouki dkk, 2016)

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$f_s = \epsilon_s \cdot E_s \dots\dots\dots(3.14)$$

Tabel 3.7 Nilai Tegangan-Regangan Baut Mutu Tinggi ($f_u = 1160 \text{ MPa}$, $f_y = 995 \text{ MPa}$)

Tegangan (MPa)	Regangan	Regangan Inelastik
995	0	
995	0.0048	0.0952
1160	0.3	0.2944

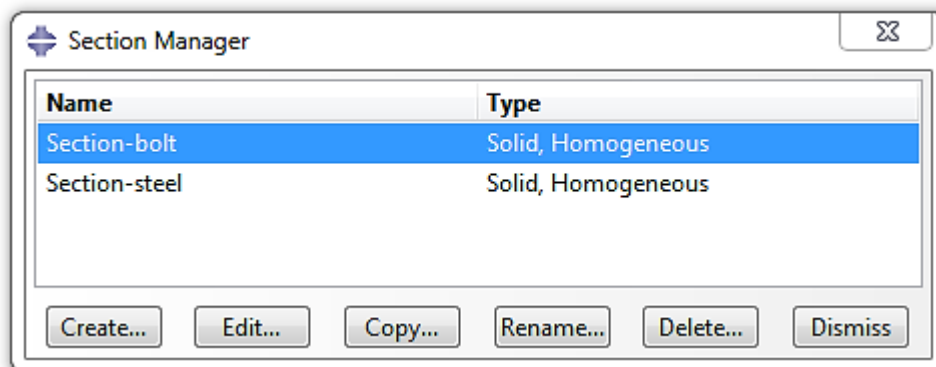
Tabel 3.8 Nilai Tegangan-Regangan Baja ($f_u = 536.6$ MPa, $f_y = 345$ MPa)

Tegangan (MPa)	Regangan	Regangan Inelastik
345	0	
345	0.0018	0.0982
536.60	0.3	0.2973

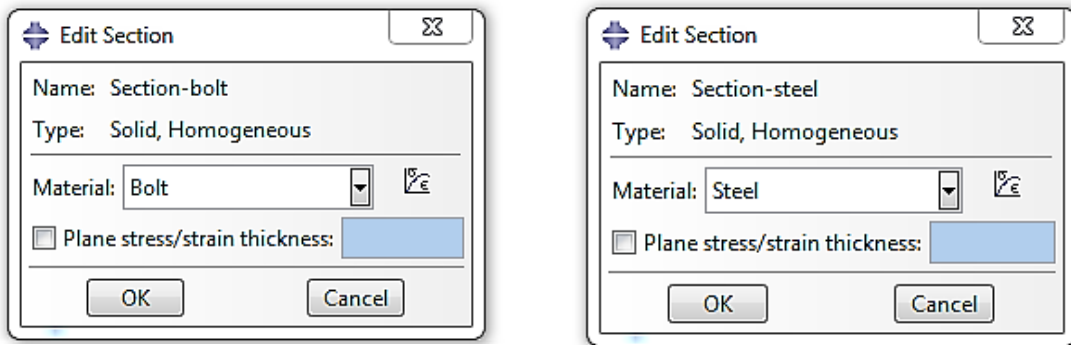
d) *Assign Section*

Pada tahap ini, material yang didefinisikan ditempatkan pada *part* sesuai dengan rencana pemodelan. *Assign section* untuk profil I adalah *Solid – Homogeneous*.

- *Create Section*
- *Name, Profil I*
- *Category > Solid, Type > Homogeneous*
- *Continue*
- *Material > Bolt, Steel*
- *OK*



Gambar 3.10 *Section manager*

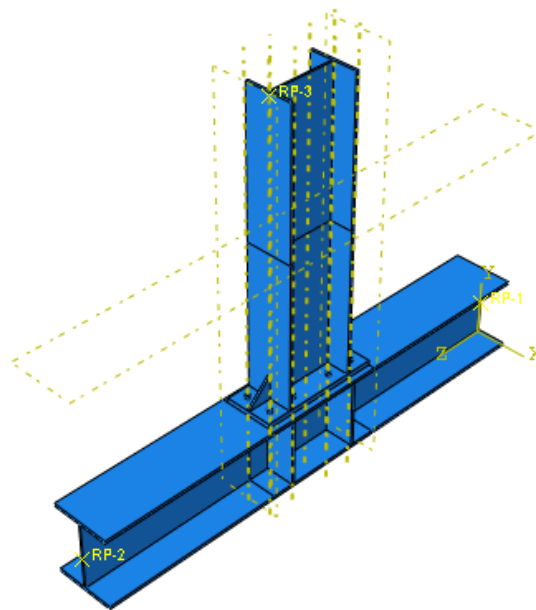


Gambar 3.11 *Input property pada part*

Geometri pada *part* telah dimasukkan pada properti material dan siap untuk dirangkai atau digabungkan menjadi satu kesatuan.

3. Modul *Assembly*

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



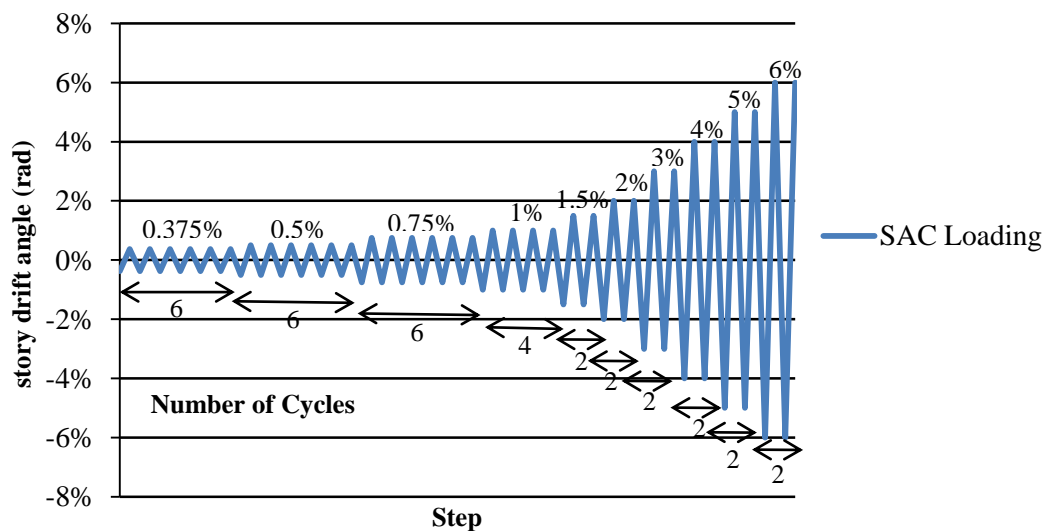
Gambar 3.12 *Layout sambungan hasil assembly*

4. Modul 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. Modul *Boundary Condition*

Boundary condition yang diterapkan pada model ini adalah perletakan rol pada ujung kiri kolom dan pada ujung kanan kolom menggunakan perletakan sendi. Untuk bebannya, digunakan beban siklik yang diambil dari *SAC loading protocol*, yaitu dengan diberi beban *displacement* diujung kedua balok tersebut dengan arah yang berbeda.

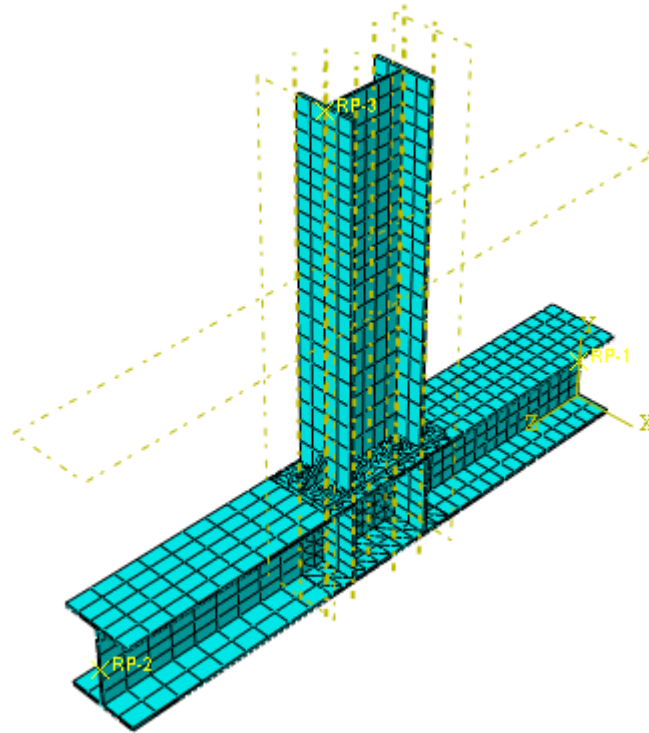


Gambar 3.13 Sistem pembebanan

Adapun sistem pembebanan pada Gambar 3.13 di atas adalah sistem pembebanan pada eksperimental yang juga sama digunakan pada pemodelan di ABAQUS. SAC loading pada pemodelan diinput dengan menggunakan modul amplitude.

6. Modul Mesh

Pada model ini nantinya akan dilakukan *meshing* dengan bentuk elemen *Hex* dengan ukuran 50 mm pada bagian *joint* balok – kolom, *end plate*, *column stiffener* dan bagian lainnya sebesar 80 mm. Mesh pemodelan ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Mesh pada model sambungan

3.4.5 Analisis Hasil Pemodelan Sambungan

Setelah sambungan dimodelkan dengan menggunakan *software* ABAQUS 6.14, 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.

3.5 Hasil Kesimpulan Penelitian

Berdasarkan analisa hasil pemodelan yang dilakukan pada masing-masing tipe sambungan menggunakan software ABAQUS 6.14, maka dapat ditarik kesimpulan ditinjau dari perilaku tegangan, regangan dan deformasi (momen-rotasi) dari seluruh studi yang telah dilakukan.

3.6 Jadwal Pengerjaan Tesis

Berikut adalah jadwal pengerjaan Tesis :

Tabel 3.9 Jadwal Pengerjaan Tesis

No.	Jenis kegiatan	Bulan ke					
		1	2	3	4	5	6
1	Studi Literatur						
2	Pemodelan Tipe Ekperimental JD2						
3	Pemodelan Tipe Eksperimental JD4						
4	Analisa (Verifikasi Model)						
5	Pemodelan Lanjutan						
6	Analisa Pemodelan (Momen–Rotasi)						
7	Penulisan Tesis						

BAB IV

PEMBAHASAN

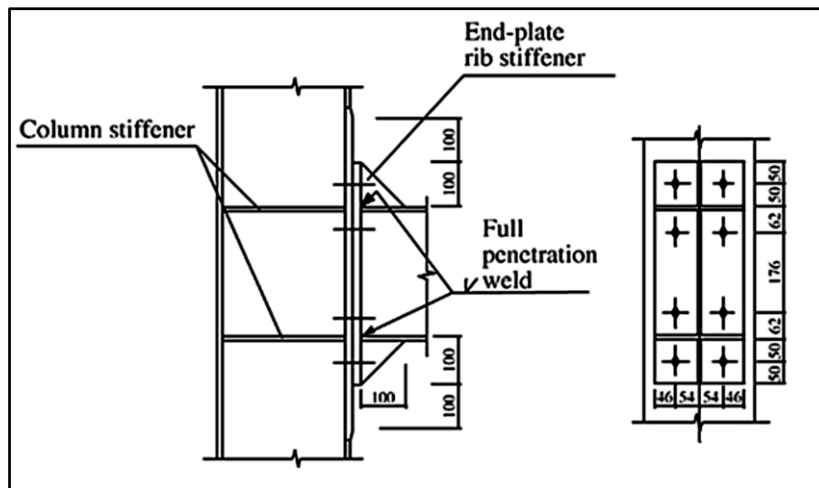
4.1 Data Pemodelan

Pemodelan yang menggunakan ABAQUS 6.14 secara 3D dari eksperimental yang telah dilaksanakan oleh Gang Shi et al (2006). Spesifikasi dan ukuran diambil sesuai detail eksperimen tersebut. Pemodelan ini menggunakan balok dan kolom baja. Balok dan kolom yang digunakan berbentuk *welded plate I shaped* dengan mutu baja *grade* Q345. Untuk pemodelan yang akan divalidasi di ABAQUS akan digunakan detail dan tipe spesimen JD2 dan JD 4. Tipe JD2 dan JD 4 menggunakan profil balok dan kolom yang sama, hanya saja tipe JD2 ada penambahan *column stiffener* sedangkan tipe JD4 tanpa *column stiffener*. Adapun parameter yang digunakan pada pemodelan yang akan dilakukan dapat dilihat pada tabel 4.1. Tabel 4.1 menunjukkan variasi spesimen yang digunakan dari pekerjaan eksperimental yang dikerjakan oleh Gang Shi et al. Pada Gambar 4.1 merupakan dua tipe sambungan yang digunakan pada pemodelan ABAQUS 6.14.

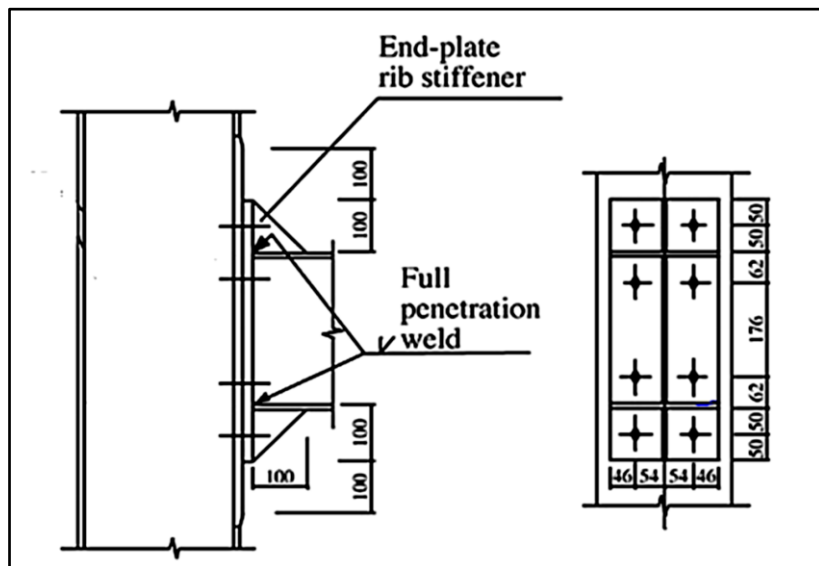
Tabel 4.1 Spesimen Pemodelan ABAQUS

Spesimen	Kolom (mm)	Balok (mm)	Sambungan
JD2	I 300 × 250 × 8 x 12	300 × 200 × 8 × 12	Bolt, M20 (8 bolts) <i>Extended Stiffener</i> ; t = 12 mm <i>End plate</i> ; t = 20 mm <i>Column Stiffener</i> ; t = 10 mm
JD4	I 300 × 250 × 8 x 12	300 × 200 × 8 × 12	Bolt, M20 (8 bolts) <i>Extended Stiffener</i> ; t = 12 mm <i>End plate</i> ; t = 20 mm

Hasil eksperimen yang dikerjakan oleh Gang Shi et al (2006) digunakan untuk memverifikasi atau mengkoreksi hasil dari pemodelan yang dilakukan agar hasil pemodelan dapat dikontrol terhadap hasil eksperimen yang sudah ada.



Gambar 4.1 Tipe sambungan spesimen JD2

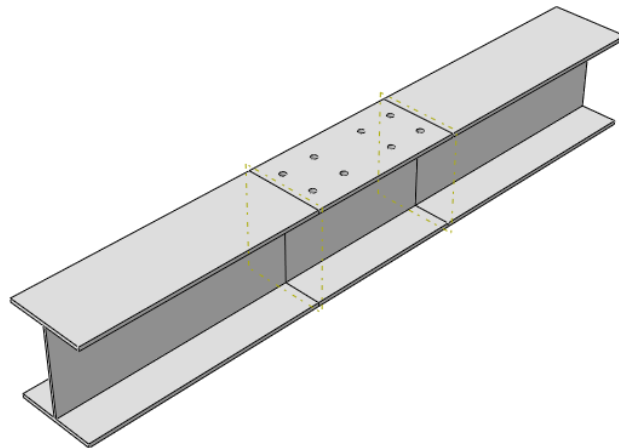


Gambar 4.2 Tipe sambungan spesimen JD4

4.2 Metode *Finite Element*

4.2.1 Pemodelan

Pemodelan yang dilakukan pada program bantu ABAQUS dengan solid 3D. Pemodelan menggunakan *welded plate I shaped*. Pemodelan balok - kolom baja, *end plate*, *column stiffener*, *extended stiffener* dan *bolts* dimodelkan pada bagian - bagian modul *part* seperti terlihat pada Gambar 4.3.

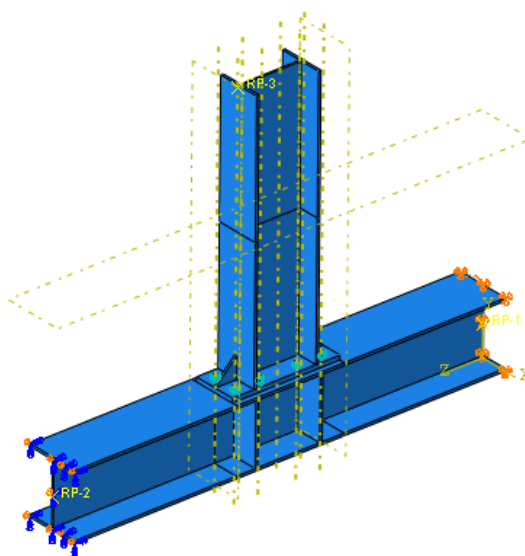


Gambar 4.3 Kolom baja pada modul *Part*

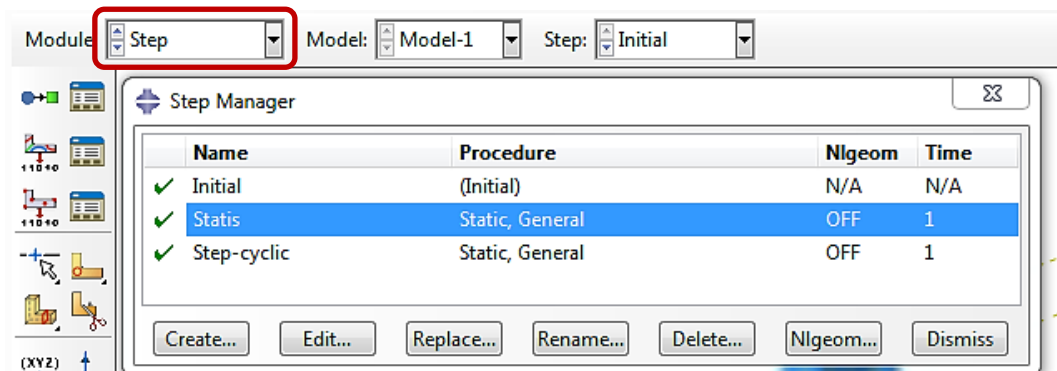
4.2.2 Pembebanan

Pembebanan yang terjadi pada pemodelan sesuai dengan eksperimen yang telah dilakukan (lihat Gambar 4.4). 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. Selain itu *output request* juga dapat dikonfigurasi disini sesuai kebutuhan.. Gambar 4.4 menunjukkan pemberian beban yang dilakukan pada pemodelan. Kemudian Gambar 4.5 step pembebanan.

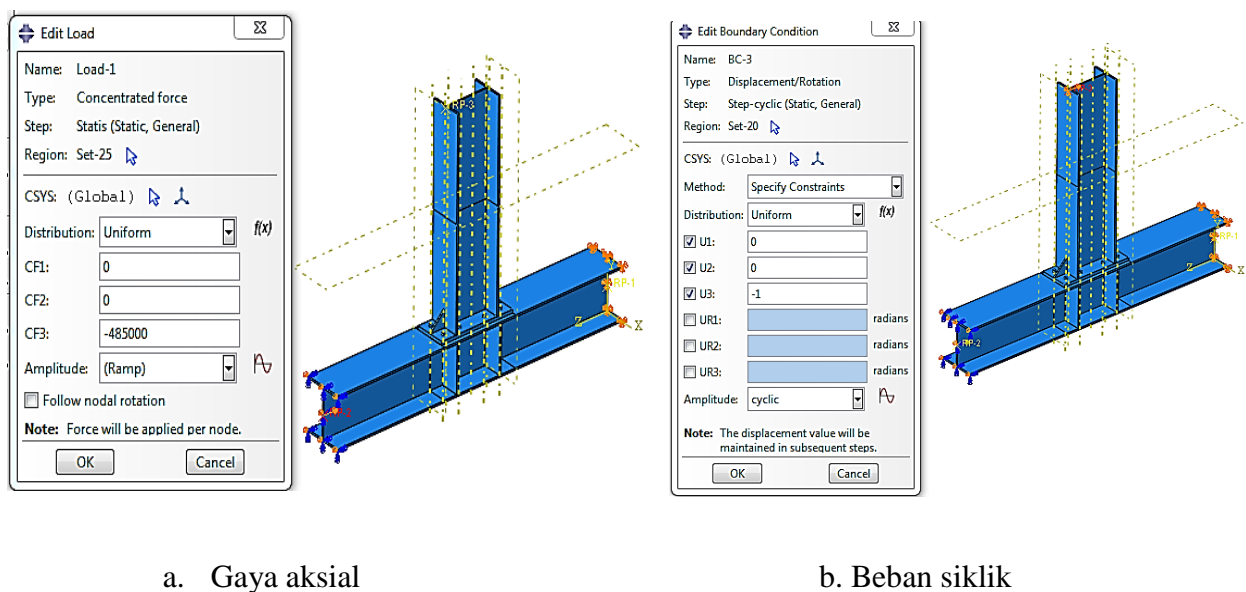


Gambar 4.4 Sambungan pada modul pembebanan



Gambar 4.5 Step pemodelan

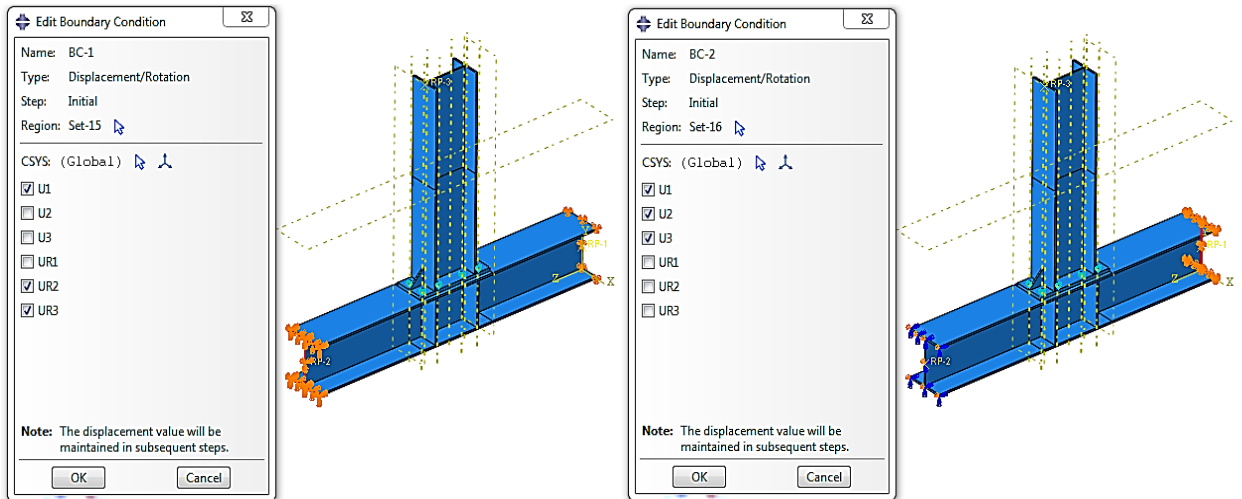
Setelah modul step, pembebanan dimasukkan sesuai dengan variasi bebannya. Untuk gaya aksial yang berada di ujung kiri kolom sebesar 485 KN, sedangkan untuk beban siklik (P, Δ) berada pada ujung balok. Prosedur pembebanan siklik seperti pada Gambar 4.6 (b). Pada ujung balok diberi beban siklik sesuai data pembebanan siklik seperti Gambar 3.13. Pada program ABAQUS gaya aksial dimodelkan dengan *concentrated load* di ujung kiri kolom. Beban siklik dimodelkan dengan *displacement/rotation* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pembebanan pada program ABAQUS

4.2.3 Boundary Condition

Boundary condition atau perletakan yang digunakan adalah rol dan sendi terlihat pada Gambar 4.7. Perletakan rol berada pada ujung kiri kolom, di dalam program ABAQUS memilih modul *boundary condition* XSYMM supaya mengunci arah X agar tidak dapat bergerak, sedangkan untuk perletakan sendi berada pada ujung kanan kolom berupa *pinned* dimana dapat mengunci pemodelan sehingga tidak bergerak ke arah X, Y ataupun Z. *Boundary condition* yang ada sudah sesuai dengan eksperimental sebelumnya seperti pada skema pemodelan Gambar 3.2.

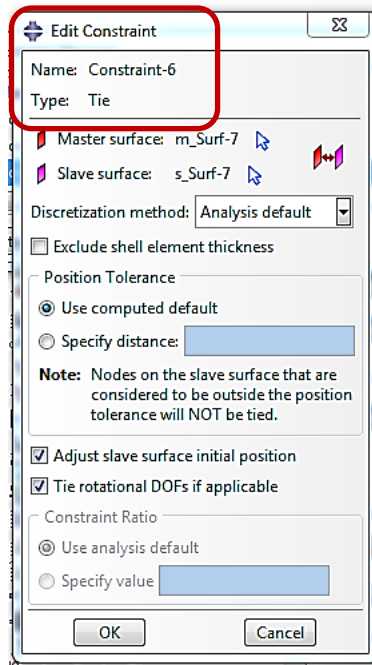


Gambar 4.7 *Boundary condition* pada pemodelan

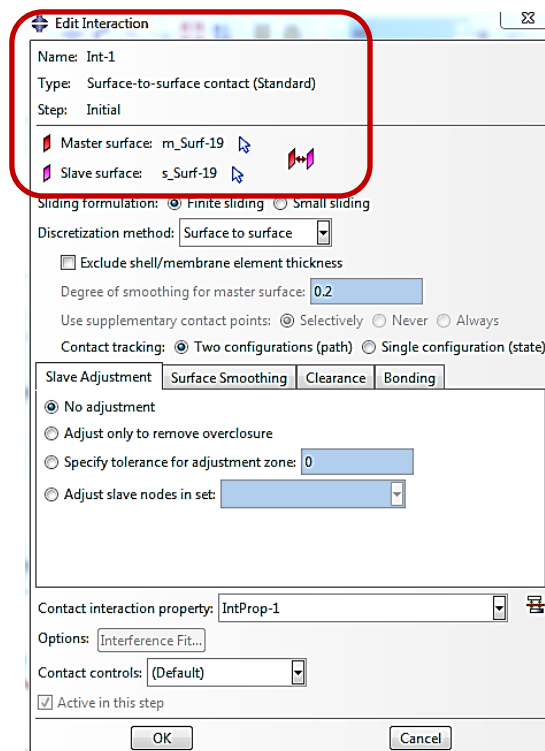
4.2.4 Interaction

Modul *Interaction* berfungsi untuk menentukan bidang kontak atau jenis interaksi yang dialami pemodelan. Interaksi pada flange balok dengan *end plate*, *extended stiffener* dengan flange balok, *extended stiffener* dengan *end plate*, *column stiffener* dengan web kolom, *column stiffener* dengan flange kolom menggunakan *constraints-tie* karena hubungan diantaranya bekerja secara utuh tanpa adanya slip yang terjadi. Interaksi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8. 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* dimana terdapat *friction* sebesar 0.138 dan terjadi slip yang dimana

koefisien sebesar 0.44. Untuk menentukan nilai gesekan yang terjadi antara baja seperti terlihat pada Gambar 4.9.



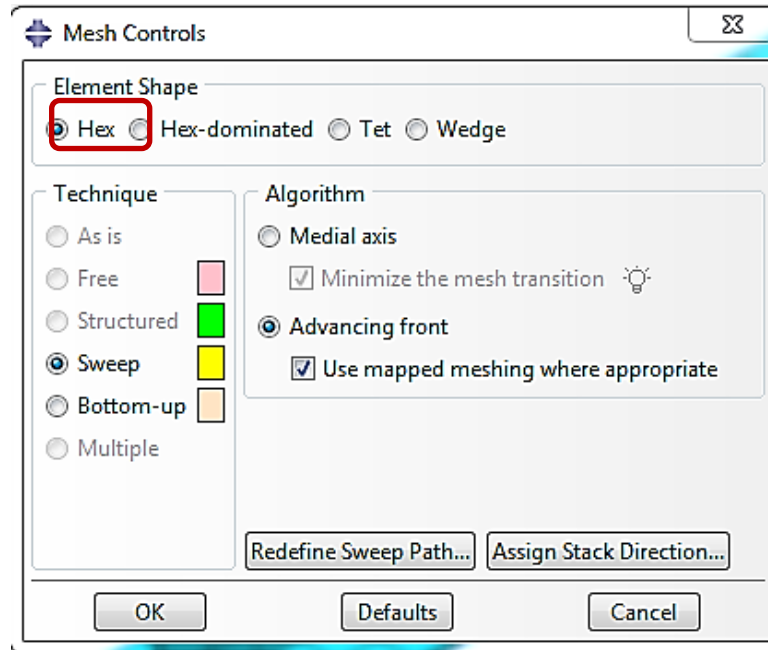
Gambar 4.8 Interaksi antara flange kolom dengan *column stiffener*



Gambar 4.9 Interaksi antara flange kolom dengan *end-plate*

4.2.5 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. Jenis mesh yang digunakan pada pemodelan adalah Hex. Pemilihan jenis mesh dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Pemilihan jenis mesh

4.2.6 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 *error message* di dalam *prompt area* maka bisa kembali ke modul sebelumnya untuk memperbaiki kesalahan yang terjadi selama proses iterasi numerik.

4.3 Hasil Pemodelan Sambungan dengan Program Bantu ABAQUS

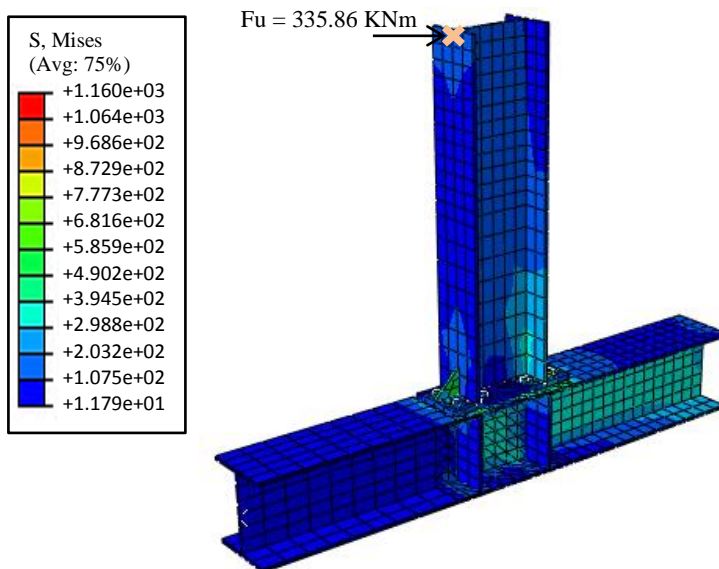
Dari data material dan pola pembebanan yang digunakan sebagai parameter *input* dalam program bantu ABAQUS, didapatkan hasil berupa *deformation shape* dan kurva siklik hubungan antara beban lateral dengan *displacement* yang kemudian akan diolah ke dalam bentuk hubungan momen dengan rotasi sesuai hasil eksperimental yang digunakan.

4.3.1 Verifikasi Hasil Metode *Finite Element* dengan Hasil Eksperimen

Sebelum studi parametrik dilakukan maka perlunya pembuktian (verifikasi) hasil dari model *finite element* (ABAQUS). Untuk memvalidasi keakuratan hasil pemodelan dengan program bantu *finite element*, dilakukan perbandingan hasil kurva Momen - Rotasi dari hasil pemodelan tipe JD2 dan JD4 dan hasil eksperimen.

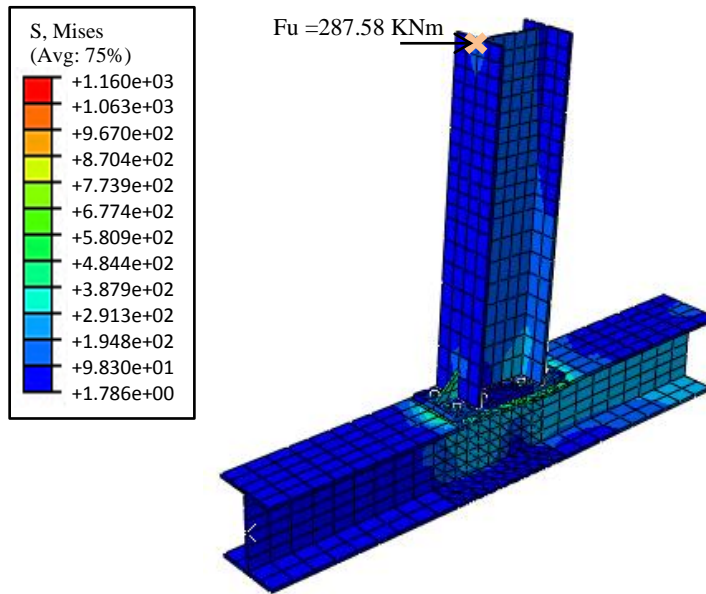
4.3.1.1 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik pada Tipe JD2

Gambar di bawah ini menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi akibat beban siklik pada model sambungan tipe JD2 pada step 361.



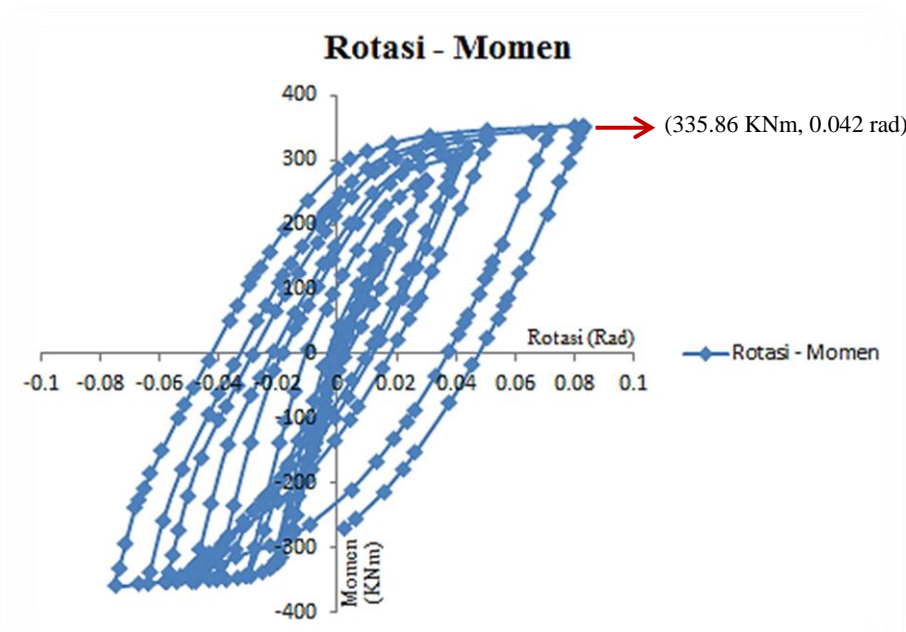
Gambar 4.11 Hasil S mises step 361 (-90.37 mm) pada model sambungan tipe JD2

4.3.1.2 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik pada Tipe JD4

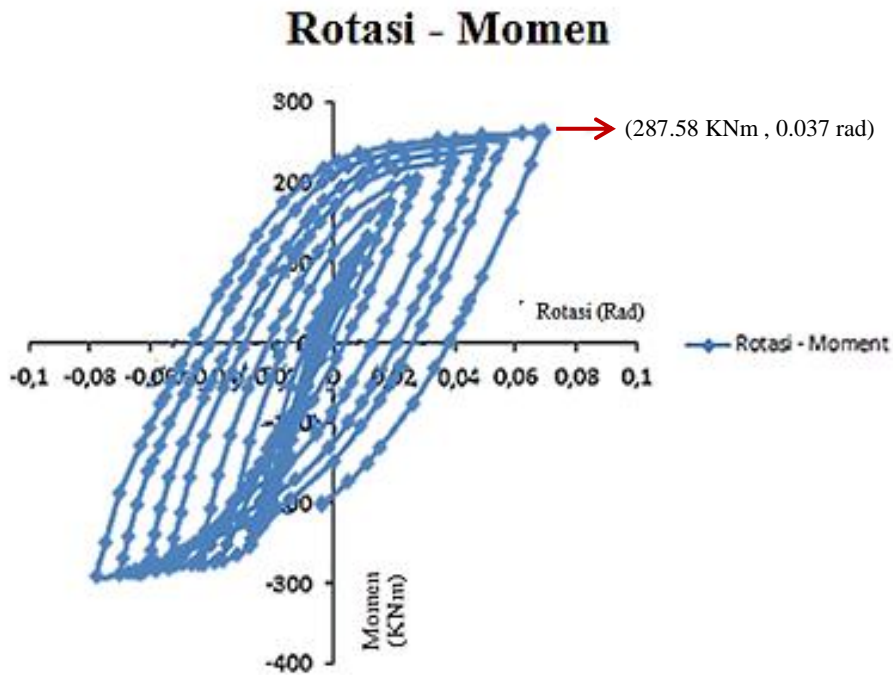


Gambar 4.12 Hasil S mises step 408 (-98.34 mm) pada model sambungan tipe JD4

Hasil dari pemodelan tersebut akan dibandingkan dengan hasil eksperimen yang digunakan sebagai acuan dalam kriteria desain sambungan. Hasil pemodelan dengan program bantu *finite element* merupakan sebuah pendekatan, sehingga hasilnya tidak sama persis dengan hasil penelitian atau eksperimen.



Gambar 4.13 *Hysteresis loop* spesimen JD2

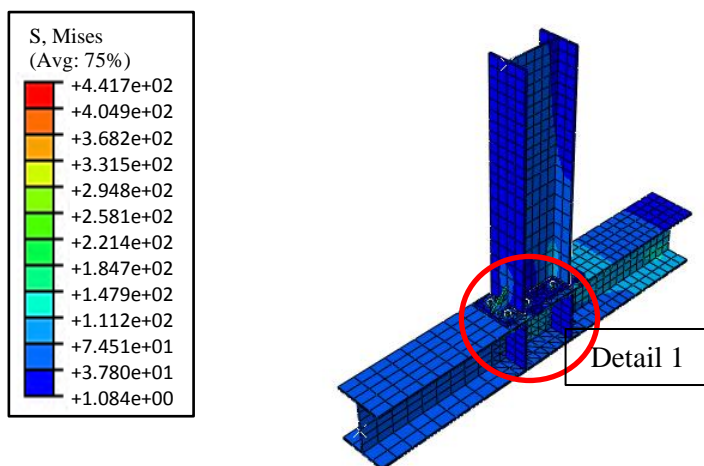


Gambar 4.14 *Hysteresis loop* spesimen JD4

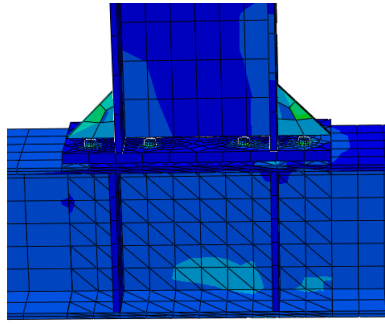
4.3.2 Analisa Hasil Model Sambungan

Pada sub-bab ini akan disajikan hasil kurva momen-rotasi pada masing-masing tipe sambungan untuk JD2 dan JD4 dengan menggunakan program bantu FE. Hasil analisis tersebut akan dibandingkan dengan hasil eksperimen yang sudah ada. Dari hasil verifikasi ini akan diketahui tingkat akurasi dari pemodelan dengan program bantu *finite element*.

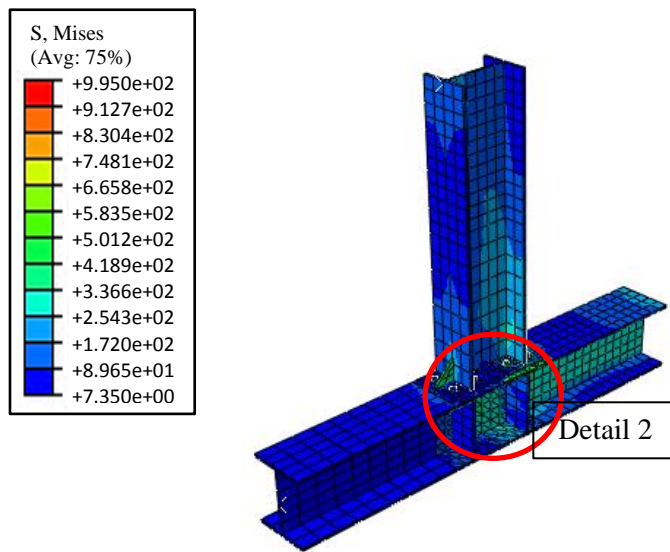
4.3.2.1 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik pada Tipe JD2



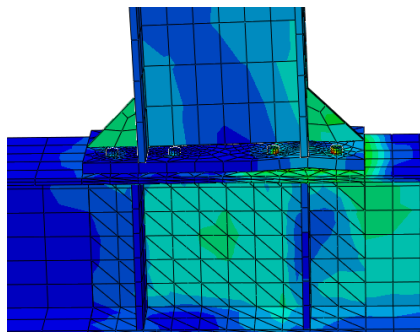
Gambar 4.15 Hasil S mises step 7 (5.81 mm) pada model sambungan tipe JD2



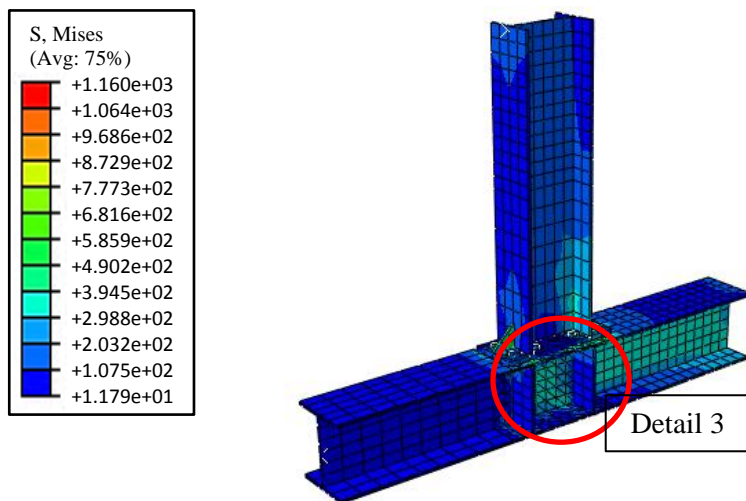
Gambar 4.16 Hasil S mises detail 1 JD2



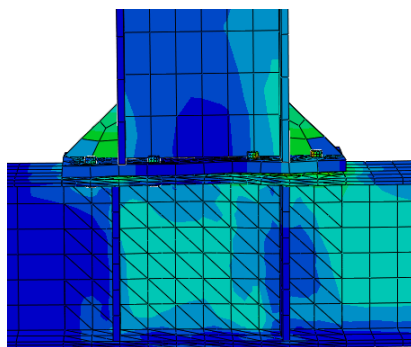
Gambar 4.17 Hasil S mises step 112 (21.33 mm) pada model sambungan tipe JD2



Gambar 4.18 Hasil S mises detail 2 JD2



Gambar 4.19 Hasil S mises step 361 (-90.37 mm) pada model sambungan tipe JD2

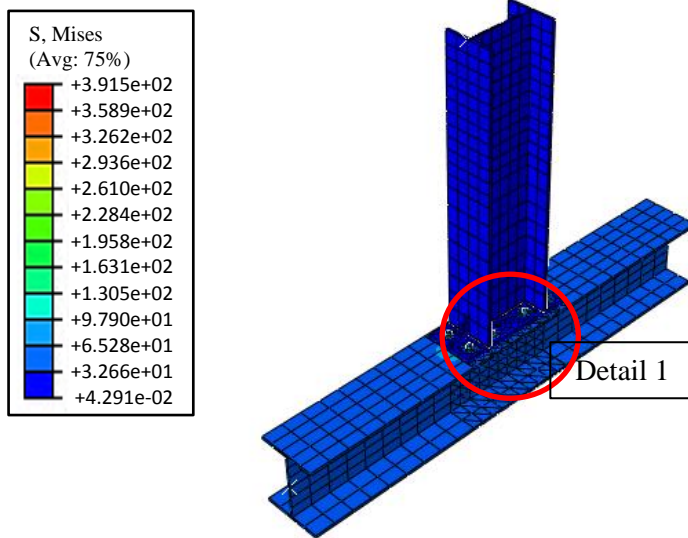


Gambar 4.20 Hasil S mises detail 3 JD2

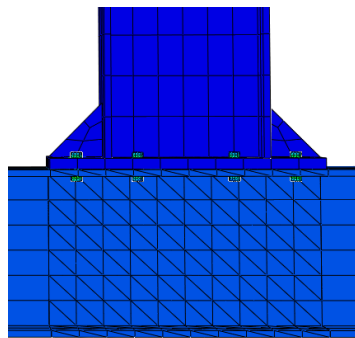
Gambar 4.15 - 4.20 di atas, menunjukkan distribusi tegangan dan mode kegagalan yang terjadi pada model sambungan tipe JD2. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa model sambungan JD2 mengalami leleh pertama di daerah flange balok dan di step 361 telah terjadi gagal di baut yang ditandai dengan tercapai tegangan ultimate sebesar 1160 MPa pada baut tersebut.

4.3.2.2 Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik pada Tipe JD4

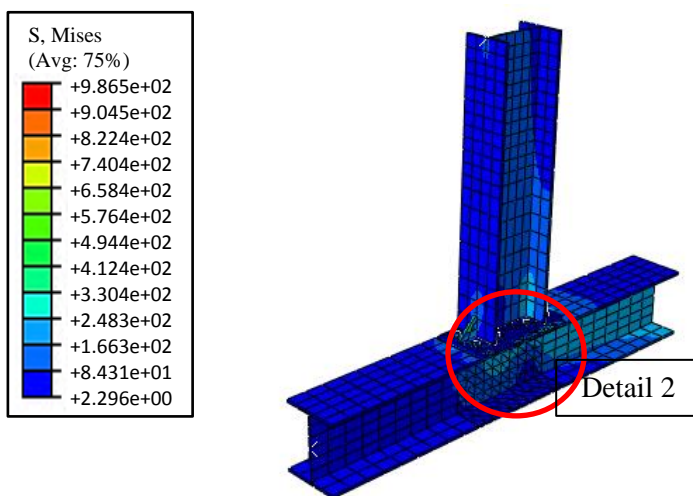
Gambar di bawah ini menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi akibat beban siklik pada model sambungan tipe JD4.



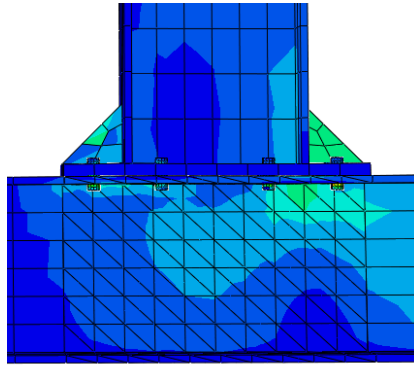
Gambar 4.21 Hasil S mises step 17 (4.74 mm) pada model sambungan tipe JD4



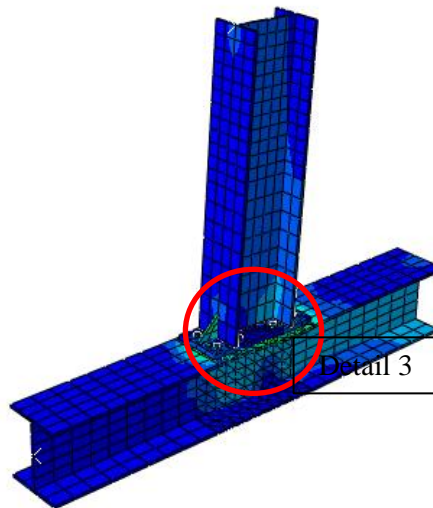
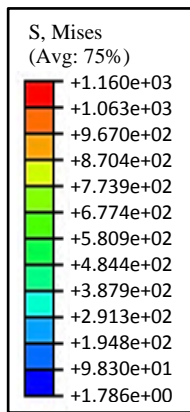
Gambar 4.22 Hasil S mises detail 1 JD4



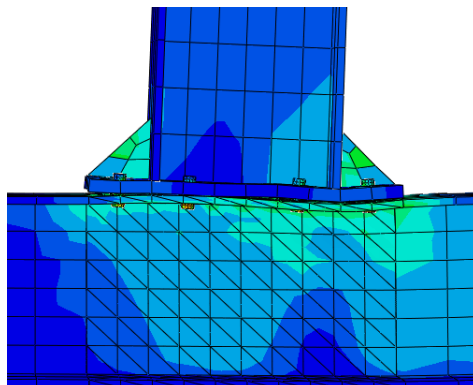
Gambar 4.23 Hasil S mises step 60 (27.07 mm) pada model sambungan tipe JD4



Gambar 4.24 Hasil S mises detail 2 JD4



Gambar 4.25 Hasil S mises step 408 (-98.34 mm) pada model sambungan Tipe JD4



Gambar 4.26 Hasil S mises detail 3 JD4

Gambar 4.21 – 4.26 di atas, menunjukkan distribusi tegangan dan mode kegagalan yang terjadi pada model sambungan tipe JD4. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa model sambungan dengan tipe JD4 mengalami kegagalan di panel zone (badan kolom) dan patah pada baut terlihat pada step 408.

Dari gambar distribusi tegangan model sambungan tipe JD2 dan JD4 di atas, dapat disimpulkan bahwa model sambungan dengan tipe JD2 memiliki performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan tipe JD4. Karena dengan adanya penambahan *column stiffener* tingkat kegagalan lebih sedikit dibandingkan tanpa *column stiffener*.

4.3.3 Daktilitas

Faktor daktilitas struktur gedung (μ) adalah rasio antara simpangan ultimit dan simpangan pada saat terjadinya leleh pertama, sebagaimana menunjukkan persamaan berikut ini (SNI 1726:2002) :

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \dots \dots \dots (4.1)$$

Hasil analisis dari masing-masing pemodelan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

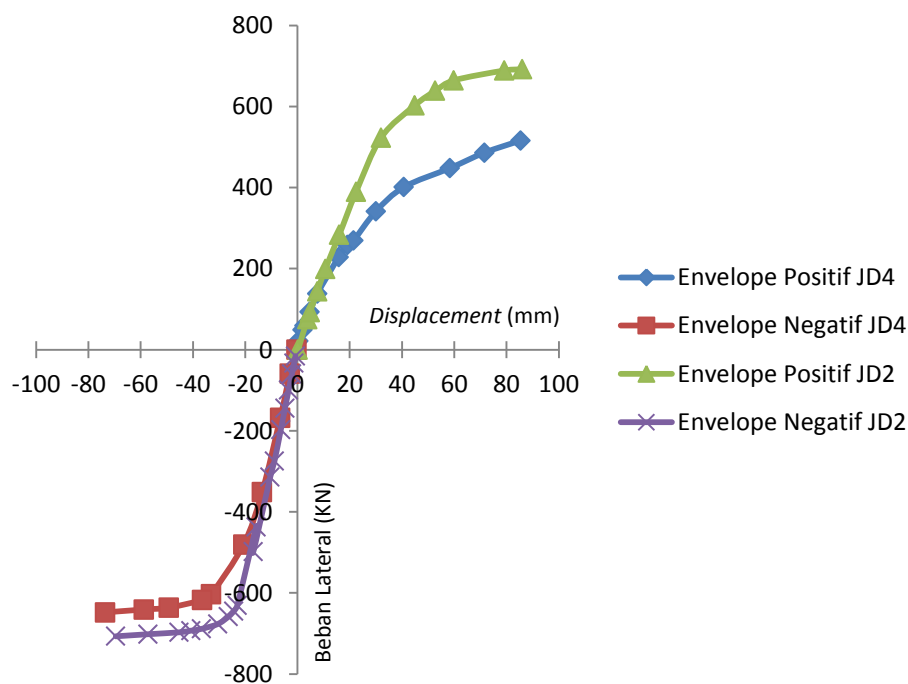
Tabel 4.2 Faktor Daktilitas Pemodelan JD2 dan JD4

No	Spesimen	Defleksi Failure	Defleksi Yield	Faktor Daktilitas
		Δ_u (mm)	Δ_y (mm)	μ
1	JD2	95.923	32.011	2.99
2	JD4	85.363	30.038	2.84

Dari Tabel 4.2 di atas menunjukkan bahwa faktor daktilitas spesimen JD2 sedikit lebih besar dibandingkan spesimen JD4 yaitu selisih 0.15. Hal ini terjadi karena penurunan beban puncak pada spesimen JD2 dan JD4 terjadi pada saat *drift ratio* yang sedikit berbeda. Dengan mengacu pada peraturan syarat SRPMK untuk daktilitas adalah daktilitas penuh, sedangkan daktilitas pada spesimen yang telah dilakukan adalah daktilitas parsial, dengan syarat sebesar $1.5 < \mu < 5$.

4.3.4 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 4.27. Hasil tersebut meunjukkan bahwa spesimen JD2 mengalami pencapaian beban lateral maksimum tekan dan tarik serta penurunan beban tekan dan tarik pada level *drift ratio* yang berbeda, bila dibandingkan spesimen JD4. Hal ini terjadi dikarenakan spesimen JD4 mengalami retakan awal pada pelat zone badan kolom sehingga sampai pada titik terjadi *buckling* pada tiap siklus pembebanan secara berurutan. Berbeda dengan spesimen JD2 yang tidak mengalami retak pada panel zone karena adanya penambahan pengaku kolom di badan kolom.



Gambar 4.27 *Envelope curve* pemodelan JD2 dan JD4

Dari Gambar 4.27 terlihat bahwa kapasitas beban lateral maksimal untuk spesimen JD2 sebesar 691.719 KN pada *displacement* 95.923 mm dan untuk spesimen JD4 sebesar 516.007 KN pada *displacement* 85.363 mm. Gambar 4.27 menunjukkan bahwa kapasitas beban lateral spesimen JD2 lebih besar dari

kapasitas beban spesimen JD4. Sehingga spesimen JD2 lebih mampu menahan beban lateral daripada spesimen JD4. Dari hasil tersebut terlihat bahwa spesimen JD2 lebih daktail bila dibandingkan dengan spesimen JD4.

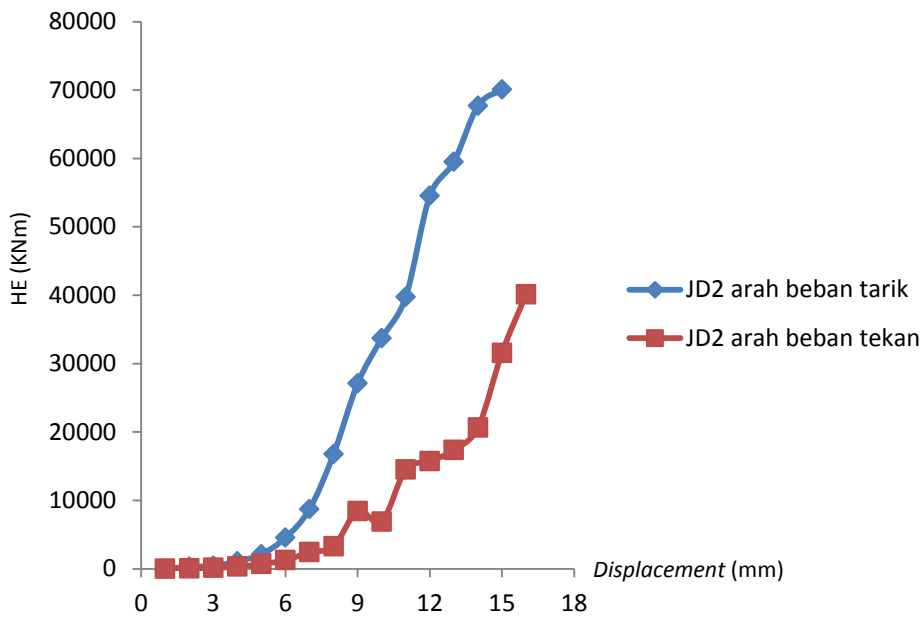
4.3.5 Kekakuan Siklus (Kc)

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. Dimana hasil kekakuan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

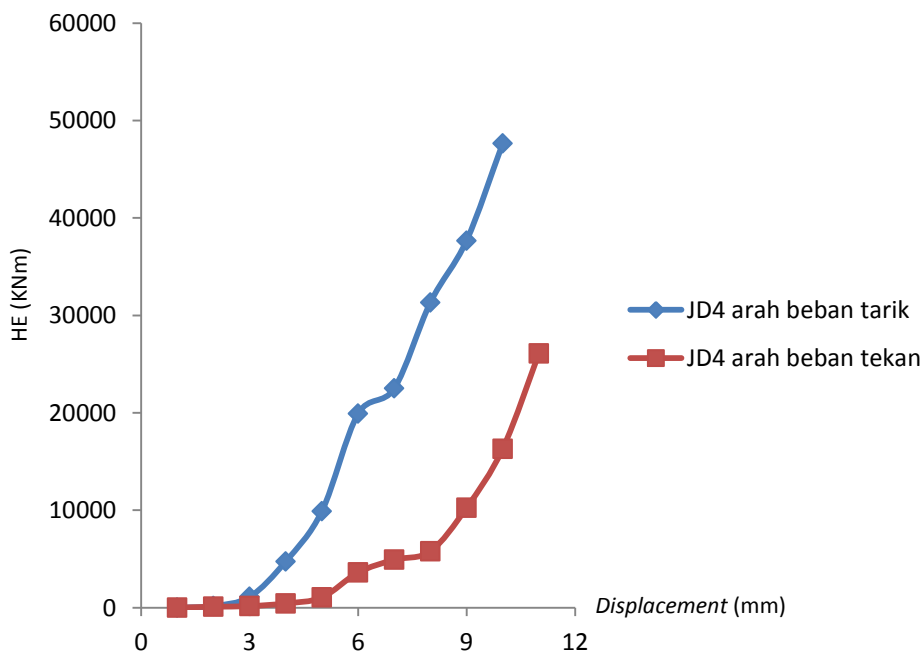
4.3.6 Disipasi Energi

Grafik energi disipasi setiap siklus pembebanan disajikan pada Gambar 4.34 dan 4.35. Grafik perbandingan energi disipasi spesimen JD2 dan JD4 terlihat pada setiap spesimen cenderung meningkat setiap adanya peningkatan level drift, tetapi untuk setiap siklus pengulangan pada setiap level drift yang sama besarnya energi disipasi cenderung menurun. Hal ini disebabkan karena perkembangan retak pada level drift yang sama relatif konstan atau hanya terjadi pelebaran retak dan patah pada elemen di lokasi yang sama.

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 4.28 dan Gambar 4.29.



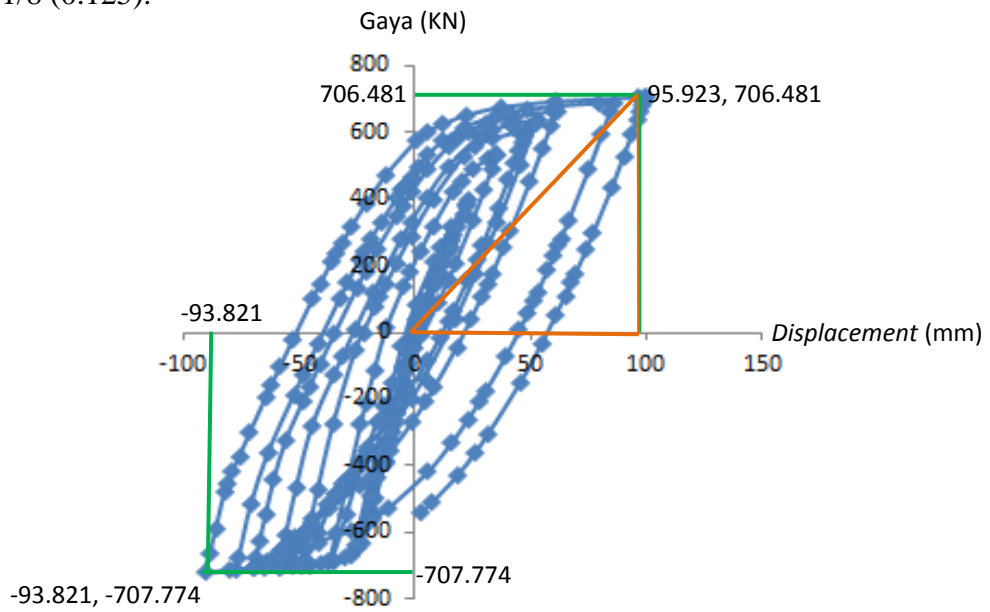
Gambar 4.28 Grafik *hysteretic energy* pemodelan JD2



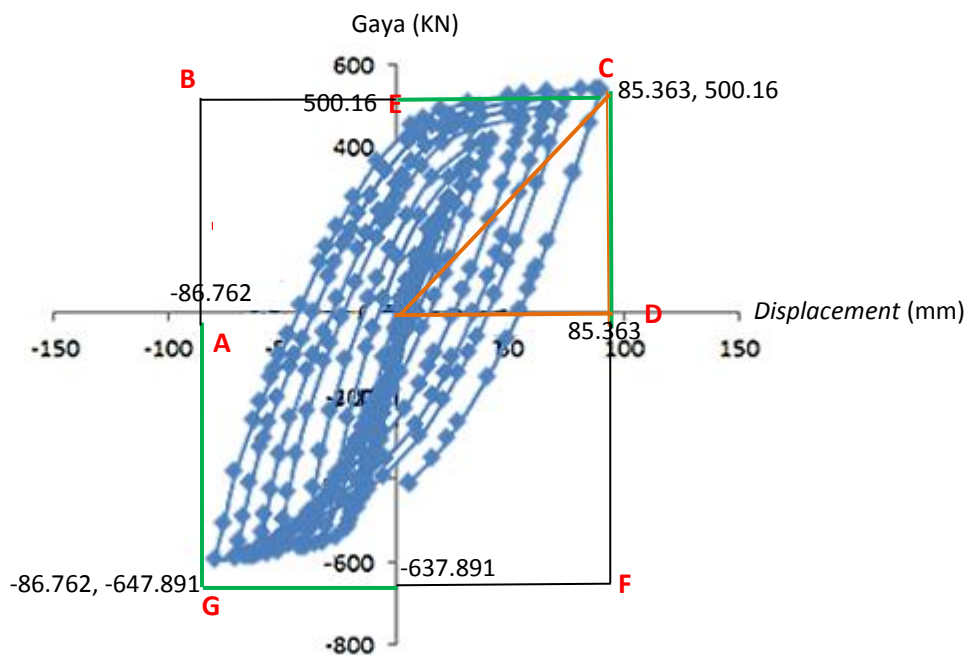
Gambar 4.29 Grafik *hysteretic energy* pemodelan JD4

Gambar 4.28 dan Gambar 4.29 di atas menunjukkan bahwa spesimen JD2 memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan spesimen JD4. Hal ini

juga masih berkaitan dengan serapan energi yang dialami oleh spesimen terhadap beban luar yang bekerja untuk setiap siklusnya. Untuk melihat kestabilan sistem 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).



Gambar 4.30 *Hysteretic energy* pemodelan JD2



Gambar 4.31 *Hysteretic energy* pemodelan JD4

Nilai rasio energi disipasi disajikan pada Tabel 4.3.

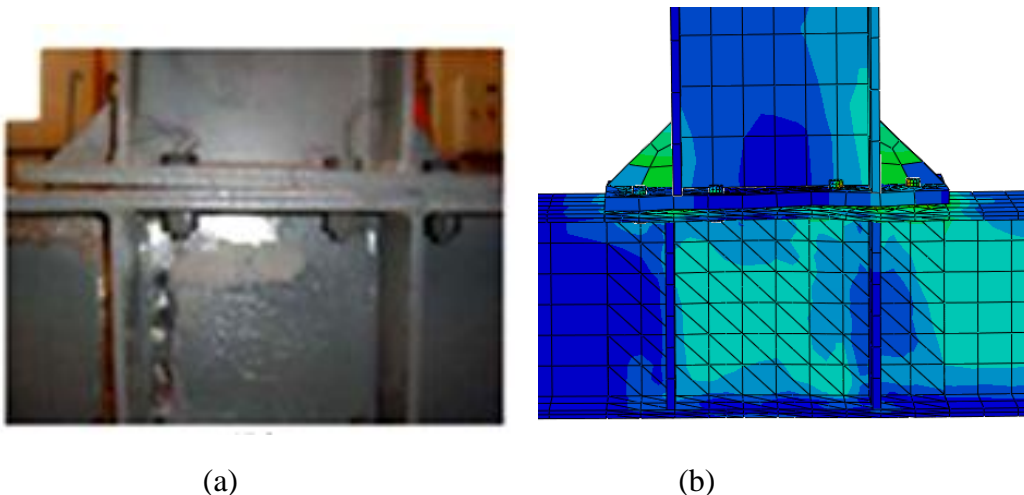
Tabel 4.3 Nilai Rasio Energi Disipasi

Spesimen	Luas Daerah siklik (KN.mm)	Luas daerah dibatasi oleh ABCD dan DFGA (KN.mm)	Rasio Energi disipasi relatif (β)
JD2	70712.75	138545.18	0.51
JD4	51662.30	113832.14	0.45

Mengacu pada hasil analisis yang telah dilakukan, rasio energi disipasi relatif pada spesimen JD2 dan JD4 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.

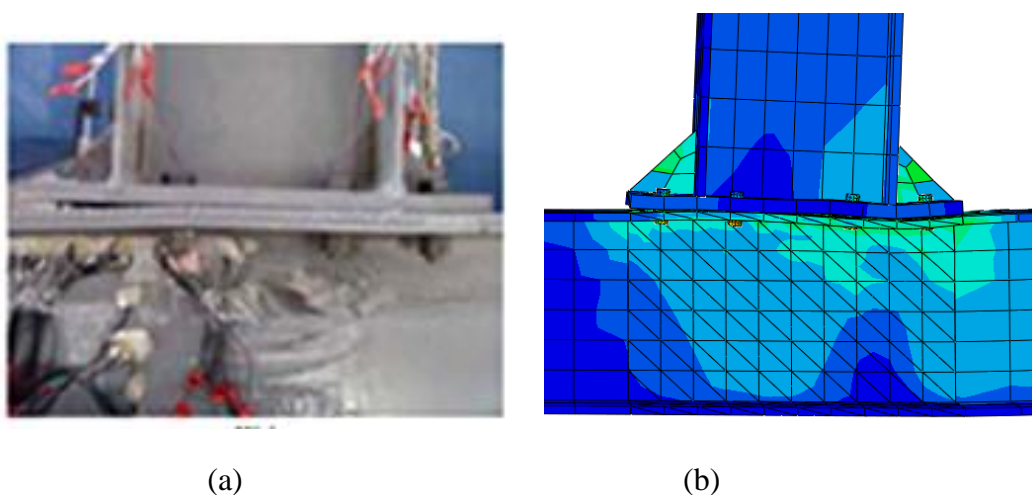
4.3.7 Mode Kegagalan / Pola Keruntuhan

Pengamatan pola kegagalan pada baut dan panel zone dimulai dari awal hingga akhir eksperimental yang dilakukan pada jurnal yang digunakan. Untuk spesimen sambungan baut JD2 sebesar 320.10 KNm yang mengakibatkan kegagalan terjadi pada baut. Sedangkan pada spesimen JD4 terjadi kegagalan pada baut yang ditandai patah pada baut dan terjadi *buckling* pada *panel zone* kolom.



Gambar 4.32 Mode Kegagalan dari spesimen JD2 (a) Eksperimental (b) ABAQUS

dari Gambar 4.32 di atas, mode kegagalan terjadi pada baut. Adapun perbedaan selisih bentuk geometri akibat kegagalan pada baut dari eksperimental dan ABAQUS tidak terlalu signifikan. Dari spesimen JD2 ada dua baut di daerah luar *extended plate* yang mengalami patah pertama kali.



Gambar 4.33 Mode Kegagalan dari spesimen JD4 (a) Eksperimental (b) ABAQUS

Dari Gambar 4.33 di atas mode kegagalan terjadi pada baut dan badan kolom. Ini diakibatkan karena kekakuan pada sayap kolom menurun secara signifikan karena tidak ada pengaku pada panel zone dan sayap kolom mengalami deformasi yang ditandai dengan perubahan rotasi pada sambungan tersebut. Pada spesimen JD4 mode kegagalan adalah pada badan kolom yang diakibatkan tekan secara transversal pada step pemberian beban positif di akhir dan satu baut mengalami tarik di sisi luar serta retak pada *end plate*. Adapun perbedaan selisih bentuk geometri akibat kegagalan pada baut dari eksperimental dan ABAQUS secara umum sama.

4.4 Verifikasi Hasil Eksperimen

Verifikasi ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi hasil dari ekperimental dari Gang Shi et al (2006) dengan program bantu *finite element*. Hasil pemodelan dengan program bantu *finite element* (ABAQUS) merupakan sebuah pendekatan. Sehingga hasilnya tidak sama persis dengan hasil penelitian atau eksperimen. Pada Tabel 4.4 di bawah ini menunjukkan nilai perbedaan antara

eksperimen dengan pemodelan tipe JD2. Dimana selisih nilai momen ultimate sebesar 15.76 KN dan nilai rotasi sebesar 0.002 rad. Sedangkan pada Tabel 4.5 menunjukkan perbedaan nilai pada tipe JD4. Dimana selisih nilai momen ultimate sebesar 1.82 KN dan nilai rotasi sebesar 0.003 rad.

Tabel 4.4 Verifikasi Eksperimen dan Pemodelan JD2

No.	Spesimen	Momen - Rotasi	
		Mu (KNm)	Ø (rad)
1	Eksperimen JD2	320.10	0.040
2	Pemodelan JD2	335.86	0.042
Selisih		15.76	0.002

Tabel 4.5 Verifikasi Eksperimen dan Pemodelan JD4

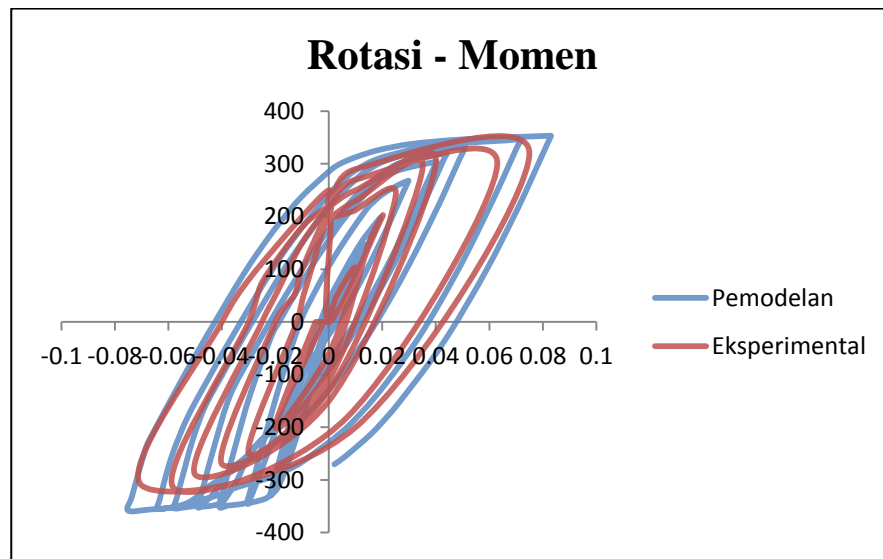
No.	Spesimen	Momen - Rotasi	
		Mu (KNm)	Ø (rad)
1	Eksperimen JD4	289.40	0.040
2	Pemodelan JD4	287.58	0.037
Selisih		1.82	0.003

Tabel 4.6 Verifikasi Nilai Kekakuan Rotasi JD2 dan JD4

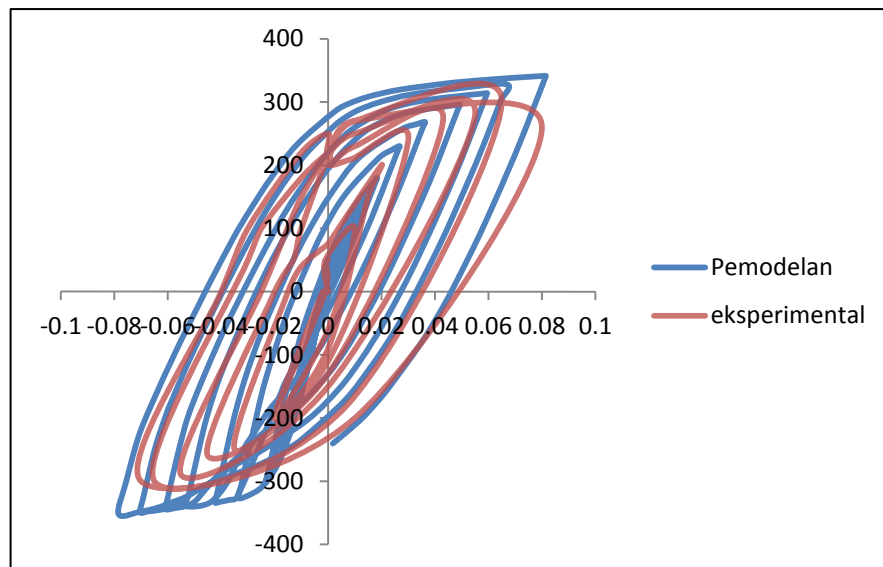
No	Spesimen	Eksperimen	Pemodelan
		<i>ki</i> (KNm/rad)	<i>ki</i> (KNm/rad)
1	JD2	68407	68733
2	JD4	35810	36175

Dari analisa *hyteresis loop*, pemodelan JD2 dan JD4 dengan eksperimen jauh berbeda pada Gambar 4.34 dan Gambar 4.35 tetapi nilai dari kurva tersebut telah mendekati dengan hasil eksperimen seperti yang telah dijelaskan di atas. Perbandingan analisa *hyteresis loop* pemodelan JD2 dengan eksperimen terlihat pada Gambar 4.24 dan untuk perbandingan analisa *hyteresis loop* pemodelan JD4 dengan eksperimen terlihat pada Gambar 4.29.

Hasil dari analisis dengan finite elemen memberikan nilai momen dan rotasi mendekati dengan hasil eksperimen. Perbedaan hasil ini bisa disebabkan karena adanya ketidaksempurnaan geometri dan material yang digunakan pada pemodelan *finite element*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pemodelan dengan menggunakan program bantu *finite element* dapat memprediksi perilaku sambungan dengan baik.



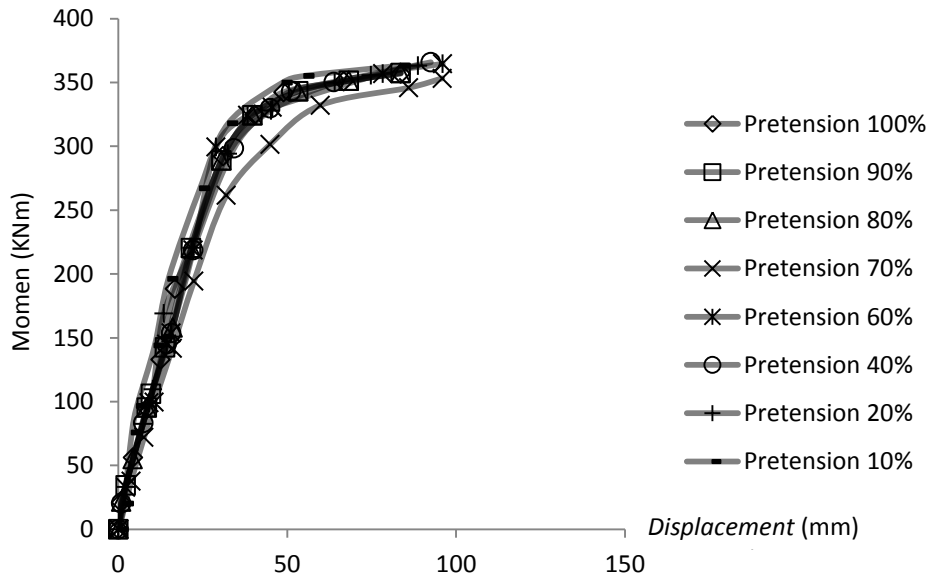
Gambar 4.34 Perbandingan *hysteresis loop* Eksperimen dengan Pemodelan Tipe JD2



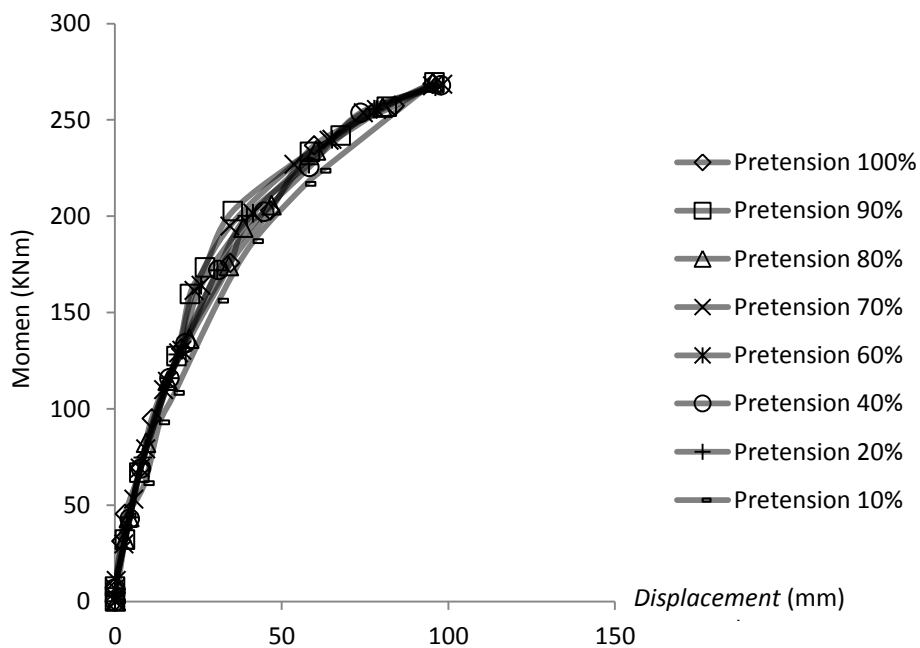
Gambar 4.35 Perbandingan *hysteresis loop* Eksperimen dengan Pemodelan Tipe JD4

4.5 Pemodelan Lanjutan

Pemodelan lanjutan ini menggunakan detail sambungan yang sama dengan pemodelan sebelumnya, namun perbedaan terletak pada pemberian variasi nilai gaya pratarik pada baut. Pemodelan sebelumnya besar nilai pratarik awal yang digunakan sebesar 70% kekuatan tarik minimum baut.



Gambar 4.36 Perbandingan % pratarik baut spesimen JD2



Gambar 4.37 Perbandingan % pratarik baut spesimen JD4

Dari Gambar 4.36 dan Gambar 4.37 di atas dapat dilihat perbandingan perubahan momen dan *displacement* antara spesimen tipe JD2 dan tipe JD4. Dari hasil tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa nilai *displacement* dengan menggunakan *pretension* (pratarik) yang lebih rendah dari 70% yang disyaratkan akan menimbulkan *displacement* yang lebih besar dari pada menggunakan *pretension* (pratarik) yang lebih tinggi. Sedangkan untuk nilai kuat tarik sambungan baut atau gaya menyebabkan kegagalan baut untuk tipe JD2 dengan nilai antara 350 – 400 KNm dan untuk tipe JD4 antara nilai 250 – 300 KNm.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

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

1. Perilaku yang dihasilkan dari spesimen JD2 dan JD4 untuk eksperimental dan ABAQUS memiliki mode kegagalan yang sama. Dimana JD2 terjadi kegagalan pada baut dan JD4 terjadi *buckling* pada *panel zone* dan patah pada baut. Namun jika dibandingkan dari segi performa, untuk distribusi tegangan JD2 memiliki performa yang lebih baik dari JD4 karena dengan adanya penambahan *column stiffener*. Penambahan *column stiffener* akan mengalami tingkat kegagalan lebih sedikit dibandingkan tanpa *column stiffener*.
2. Dalam tesis ini metode dan pemodelan pembebanan dalam program bantu ABAQUS menggunakan beban aksial dan siklik. Pembebanan aksial menggunakan *static-general* dimana aplikasi beban pada pemodelan menggunakan beban *concentrated load*. Sedangkan, beban siklik menggunakan *static - general* dengan aplikasi menggunakan *displacement/rotation*.
3. Adapun hasil dari beban lateral dan *displacement*, dimana beban lateral maksimal untuk spesimen JD2 sebesar 691.719 KN pada *displacement* 95.923 mm, dan untuk spesimen JD4 sebesar 516.007 KN pada *displacement* 85.363 mm. Ini menunjukkan bahwa kapasitas beban lateral spesimen JD2 lebih besar dari kapasitas beban spesimen JD4. Dari hasil tersebut terlihat bahwa spesimen JD2 lebih daktail bila dibandingkan dengan spesimen JD4.
4. Perbandingan energi disipasi pada spesimen JD2 dan JD4 terlihat pada tiap spesimen cenderung meningkat setiap adanya peningkatan level drift, tetapi untuk tiap siklus pengulangan pada tiap level drift yang sama besarnya energi disipasi menurun. Pada spesimen yang dianalisis, spesimen JD2 memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan

spesimen JD4. Adapun nilai energi disipasi pada JD2 sebesar 70712.75 KNmm sedangkan JD4 sebesar 51662.30 KNmm.

5. Nilai momen – rotasi pada eksperimental dan pemodelan pada setiap spesimen tidak jauh berbeda,. Untuk spesimen JD2 pada eksperimental momen sebesar 320.10 KNm sedangkan pemodelan 335.86 KNm dengan selisih sebesar 15.76 KNm. Untuk nilai rotasi pada spesimen JD2 pada eksperimental sebesar 0.040 rad sedangkan pemodelan 0.042 rad dengan selisih sebesar 0.002 rad. Untuk spesimen JD4 nilai momen untuk eksperimental dan pemodelan selisih sebesar 1.82 KNm dan rotasi 0.003 rad.
6. Sambungan pada pemodelan yang dilakukan adalah sambungan friksi dengan menggunakan baut mutu tinggi (HTB). Sambungan friksi yang menggunakan baut mutu tinggi yang dikencangkan akan menimbulkan tarikan baut minimum. Adanya pemberian beban awal (*pretension force*) memberikan efek struktur tidak langsung mengalami kerusakan. Ini terjadi karena sambungan direncanakan dengan mekanisme slip kritis dan mekanisme tumpu yang bekerja pada baut. Pemberian beban awal sekitar 70% - 80% dari kekuatan tarikan maksimumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas H, Reza J (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. Vol.4:No.1.
- Abidelah, A., Bouchair, A., Kerdal, D.E (2012). *Experimental and analytical Behavior of Bolted End-Plate Connections with or without Stiffeners*. Journal of Constructional Steel Research 63, 1279-1293.
- AISC/ANSI 358-10 (2010). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. Chicago.
- AISC (American Institute of Steel Construction) (2005). *Steel Construction Manual*. 13th ed., Chicago.
- ASTM F3125/F3125M-15a (2005). *Standard Specification for High Strength Structural Bolts, Steel and Alloy Steel, Heat Treated, 120 ksi (830 MPa) and 150 ksi (1040 MPa) Minimum Tensile Strength, Inch and Metric Dimensions*, ASTM International. West Conshohocken.
- Bursi OS, Jaspart JP (1998). *Basic Issues in the Finite Element Simulation of Extended End Plate Connections*. Comput Struct, 69(3):361–82.
- CoelhoGAM, Bijlaard FSK, Da silva LS (2004). *Experimental Assessment of the Ductility of Extended Endplate Connections Experimental Assessment*. Eng Struct, 26(9):1185–206.
- Díaz C, Victoria M, Martí P, Querin OM (2011). *FE Model of Beam to Column Extended End Plate Joints*. J Constr Steel Res, 67(10):1578–90.
- European Standard (ENV 1993-1-8) (2005). *Eurocode 3 : Design of Steel Structure Part 1-8: Design of Joints*. European Committee for Standardization.
- Ghassemieh M, Jalalpour M, Gholampour AA (2014). *Numerical Evaluation of the Extended End Plate Moment Connection Subjected to Cyclic Loading*. Curr Adv Civil Eng, 2(1):35–43.
- Ghobarah A, Korol RM, Osman A (1992). *Cyclic Behaviour of Extended End Plate Joints*. J Struct Eng ASCE, 118(5):1333–53.

- Ismail, R.E.S., Fahmy, A.S., Khalifa, A.M., and Mohamed, Y.M (2016). *Numerical Study on Ultimate Behaviour of Bolted End-Plate Steel Connections*. Latin American Journal of Solids and Structures 13, 1-2.
- Kaufmann EJ, Metrovich BR, Pense AW (2001). *Characterization of Cyclic Inelastic Strain Behavior on Properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr. 50 Rolled Sections ATLSS*, Report No. 01-13. Lehigh University.
- Khoriby S, Sakr M, Khalifa T, Eladly M (2016). *Modelling and Behaviour of Beam to Column Connections Under Axial Forces and Cyclic Bending*. J Constr Steel Res, 129(1): 171–184.
- Maggi YI, Gonçalves RM, Leonb RT, Ribeiro LFL (2005). *Parametric Analysis of Steel Bolted Endplate Connections using Finite Element Modeling*. J Constr Steel Res, 61(5): 689–708.
- Mashaly E, El-Hewey M, Abou-Elfath H, Osman M (2011). *Behavior of Four-Bolt Extended End-Plate Connection Subjected to Lateral Loading*. Alexandria Eng J, 50(1):79–90.
- Morrison, M., Quayyum, S., and Hasan, T (2017). *Performance Enhancement of Eight Bolt Extended End Plate Moment Connections Under Simulated Seismic Loading*. Engineering Structures 151, 444-458.
- Murray TM, Sumner EA (2003). *AISC Design Guide Series 4, Extended End-Plate Moment Connections*. Chicago.
- Ambarita J, dkk (2011). Pendekatan Model *Hysteristic Steel Damper* Berdasarkan Hasil Eksperimental. Tugas Akhir Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Ricles JM, Fisher JW, Lu LW, Kaufmann EJ (2002). *Development of Improved Welded Moment Connections for Earthquake-Resistant Design*. J Constr Steel Res, 58(5):565–604.
- Shi Y, Shi G, Wang Y (2006). *Behavior of End-Plate Moment Connections Under Earthquake Loading*. Eng Struc, 29(5):703–16.
- Sumner EA, Murray TM (2002). *Behavior of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading*. J Struct Eng, 128(4):501–8.
- Wang M, Shi Y, Wang Y, Shi G (2013). *Numerical Study on Seismic Behaviour of Steel Frame End-Plate Connections*. J Struct Eng, 90:140–152.

BIODATA PENULIS



Oktavia Uly Artha Silalahi, penulis dilahirkan di Ujung Pandang (Makassar) – Sulawesi Selatan, 1 Oktober 1992, merupakan anak keempat dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Katolik San Francesco Balige dan SMP Swasta RK Budhi Dharma Balige. Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Balige pada tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan untuk jenjang Diploma (D3) Teknik Sipil di Politeknik Negeri Medan dan lulus tahun 2013. Kemudian penulis melanjutkan studi ke jenjang Sarjana (S1) Teknik Sipil di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada program pendidikan S1 Lintas Jalur Teknik Sipil ini, penulis mengambil tugas akhir di bidang Struktur dengan judul tugas akhir “Modifikasi Perencanaan Struktur Gedung Hotel Royal Darmo Yogyakarta Menggunakan *Steel Plate Shear Wall* (SPSW)”. Selama menempuh pendidikan S1 sampai sekarang, penulis juga bekerja di perusahaan konsultan yang bergerak di bidang jasa konstruksi sebagai Estimator, Quantity Surveyor dan Pengawas Proyek. Pada pertengahan tahun 2017, penulis juga melanjutkan pendidikan jenjang Pascasarjana (S2) pada Departemen Teknik Sipil dengan bidang keahlian Struktur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Masa studi pascasarjana diselesaikan penulis dalam kurun waktu 1 tahun 8 bulan dengan materi penelitian tesis meliputi struktur baja daktail dan *finite element analysis* dan hasil penelitian penulis akan dipublikasikan dalam ITS Journal of Civil Engineering.