



TESIS-RC 1854-01

**STUDI NUMERIK TERHADAP KINERJA SERTA PERILAKU
ELEMEN *WEB-BOLTED REPLACEABLE LINK* PADA
*ECCENTRICALLY BRACED FRAMES***

AULIA INDIRA KUMALASARI
03111850020002

Dosen Pembimbing
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D
Prof. Dr. Ir. Hidajat Sugihardjo M, MS.

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



TESIS-RC 1854-01

NUMERICAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF WEB-BOLTED REPLACEABLE LINKS FOR ECCENTRICALLY BRACED FRAMES

AULIA INDIRA KUMALASARI
03111850020002

Supervisors

Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D

Prof. Dr. Ir. Hidajat Sugihardjo M, MS.

Departement of Civil Engineering

Faculty of Civil Engineering, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AULIA INDIRA KUMALASARI

NRP: 03111850020002

Tanggal Ujian: 13 Januari 2020

Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui Oleh:

Pembimbing:

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

2. Prof. Dr. Ir. Hidajat Sugihardjo M, MS
NIP: 19550325 198003 1 004

Penguji:

1. Bambang Pisceca, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 19840318 200812 1 002

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

Kepala Departemen Teknik Sipil

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan



Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc.

NIP: 19721202 199802 1 001

STUDI NUMERIK TERHADAP KINERJA SERTA PERILAKU ELEMEN *WEB-BOLTED REPLACEABLE LINK* PADA *ECCENTRICALLY BRACED FRAMES*

Mahasiswa Nama : Aulia Indira Kumalasari
Mahasiswa ID : 03111850020002
Dosen Pembimbing : Budi Suswanto, ST., MT., Ph. D
Prof. Dr. Ir. Hidajat Sugihardjo M, MS.

ABSTRAK

Rangka berpegaku eksentrik mensyaratkan untuk membatasi perilaku inelastis hanya terjadi pada balok *link* sedangkan elemen lainnya tetap dalam kondisi elastis. *Link* yang didesain menyatu dengan balok induk menjadikan *link* mengalami *over-designed* karena harus menahan beban yang besar pula seperti balok induk. Lima spesimen *link* yang disusun dari dua buah profil C yang disusun secara bersinggungan dan kedua ujungnya dipasang mengapit balok induk dimodelkan secara numerik yang kemudian diberi beban siklik. Analisa dilakukan terhadap rotasi serta energi disipasi yang terjadi pada *link*.

Dari hasil analisis didapatkan rotasi seluruh spesimen mampu melampaui batasan yang disyaratkan yaitu 0.08 rad . Penambahan plat pengaku pada sambungan *web* menunjukkan bahwa spesimen mampu menahan gaya geser yang lebih besar. Efek *pinching* ditemukan pada kurva histerisis yang disebabkan oleh efek dari sambungan baut di kedua ujung balok *link* akibat dari pemberian beban siklik. Sedangkan pemberian *diagonal stiffeners* memberikan efek yang kurang signifikan pada perilaku *web-bolted link* namun tetap perlu dilakukan kajian lebih dikarenakan *link* akan menjadi lebih kaku sehingga kegagalan akan terjadi pada sambungan yang mengakibatkan *link* mengalami keruntuhan lebih awal. Sedangkan mengkombinasikan plat pengaku sambungan dan *diagonal stiffeners* mampu menghasilkan *link* dengan kemampuan disipasi energi yang baik. Selain itu, *link* dengan berbagai jenis mutu baja mampu menghasilkan hasil yang bervariasi. Elemen dengan mutu baja yang lebih tinggi mampu menghasilkan elemen yang mampu menahan gaya geser yang lebih besar.

Kata kunci: *Link* dengan sambungan baut, *replaceable link*, *diagonal stiffeners*, kurva histerisis, efek *pinching*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

NUMERICAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF WEB-BOLTED REPLACEABLE LINKS FOR ECCENTRICALLY BRACED FRAMES

Name : Aulia Indira Kumalasari
Student ID : 03111850020002
Supervisors : Budi Suswanto, ST., MT., Ph. D
Prof. Dr. Ir. Hidajat Sugihardjo M, MS

ABSTRACT

Eccentrically Braced Frames (EBF) restrict the inelastic behavior only occur at the *link* beam while the other element remains elastic after subjected into lateral load. Occasionally, over-designed *link* happens because it is designed integrated with the beam floor that has to resist substantial forces. Eight web-bolted *replaceable links* were modelled numerically. The *link* specimens were assembled back-to-back from two C-channel sections. Both ends of the C-channel were clamped on the floor beam and connected with 1 inch A490 bolts. Cyclic load was given to the specimens and its behavior were observed.

From the analysis, the *links* were able to meet the requirements to not fail when the rotation is less than 0.08 rad. Additional diagonal *stiffeners* and *connection plate* provided larger rotation and it could resist larger shear force. Attached diagonal *stiffeners* only at the *link* element gave insignifiant effect for the *link* to dissipate energy. But, diagonal *stiffeners* could provide higher rigidity on the *link* and for that reason, the *link* with additional diagonal *stiffeners* must be designed carefully to avoid earlier fracture on the connections. Pinching effect could be observed from the hysteretic curve due to ovalize that happened at the bolt hole as a consequence of cyclic load. Assembled the *links* with various *steel* strength also could give a various result. *Link* with higher strength could provide an element with higher shear capacity.

Keywords: Web-bolted *link*, *replaceable link*, diagonal *stiffeners*, hysteretic curve, pinching effect.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat, rahmat, serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “Studi Numerik Terhadap Kinerja Serta Perilaku Elemen *Web-bolted Replaceable Link* pada *Eccentrically Braced Frames*” sebagai salah satu bentuk pemenuhan syarat untuk memperoleh gelar magister (M.T).

Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam menyelesaikan Tesis ini tidak lepas dari bimbingan, bantuan, serta dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena hal tersebut, penulis mengucapkan banyak terimakasih serta penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Budi Suswanto S.T., M.T., Ph. D selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing serta mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Hidajat Soegihardjo selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing serta mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tesis ini.
3. Segenap Dosen pengajar program Pascasarjana Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh November yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat.
4. Segenap staff dan karyawan Jurusan Teknik Sipil FTSPK-ITS yang telah memberikan kemudahan segala urusan akademik perkuliahan.
5. Semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata penulis menyadari bahwa penulisan Tesis ini masih jauh dari kata sempurna, untuk itulah kritik dan saran yang membangun senantiasa penulis terima dengan lapang dada. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembacanya.

Surabaya, 20 Januari 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PERSEMBAHAN

Segala puji bagi Allah SWT atas karunia dan rahmat-Nya yang tidak pernah kurang sedikitpun kepada hamba-Nya yang selalu meminta kepada-Nya. Shalawat serta salam kita haturkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW sebagai suri tauladan bagi umat-Nya. Tesis ini saya persembahkan kepada:

1. Bapak M. Mansur Ibrahim, dan Ibu Intyas Yanuartanti selaku kedua orang tua yang selalu memberikan semangat, motivasi, serta bantuan finansial yang yang tidak terhitung jumlahnya sehingga anaknya bisa mempersembahkan gelar magister teknik kepada beliau berdua. Terimakasih atas segala doa dan restu yang selalu bapak dan ibu panjatkan karena dengan doa dan restu bapak dan ibu, Tesis ini dapat terselesaikan dengan lancar. Semoga gelar ini dapat membuat ibu dan bapak bangga.
2. Wisnu Tri Anugrah yang sudah menjadi *best supporting system* dengan selalu memberikan motivasi, semangat dan waktunya untuk membantu saya walaupun terpisah jarak 812 km jauhnya.
3. Teman – teman PPS Struktur angkatan 2018 yang memberi dukungan dalam proses perkuliahan selama menjalani studi magister serta pengerjaan Tesis ini.
4. Teman – teman grup Tesis Baja, Ari, Mas Rizal, Dzul, serta Mbak Suwarni yang saling memberikan semangat satu sama lain agar Tesis segera selesai.
5. Sonia Prilly serta Mifthahul Riski yang menjadi tempat penulis untuk berkeluh kesah selama 8 tahun berteman.
6. Semua pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Semoga semua pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini mendapatkan pahala dari Allah SWT.

Surabaya, 20 Januari 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT	x
KATA PENGANTAR	xii
LEMBAR PERSEMBAHAN	xiv
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Pembahasan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Studi.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Eccentrically Braced <i>Frames</i>	7
2.2 <i>Replaceable link</i>	9
2.3 Batasan Rotasi dan <i>Drift</i> pada <i>Replaceable link</i>	14
2.4 <i>Eccentrically Braced Frames</i> dengan berbagai mutu baja	16
2.5 <i>Stiffeners</i> pada <i>Eccentrically Braced Frames</i>	18
2.6 <i>Finite Element</i>	19
2.6.1 <i>Brick Element</i>	20
2.7 Pemodelan Abaqus	23
2.7.1 Elemen C3D8R	24

2.7.2 Kontak antar Elemen	25
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	27
3.2 Studi literatur	29
3.3 Preliminary Design <i>Replaceable Link</i> Utama	29
3.4 Pemodelan Numerik <i>Replaceable Link</i> Model Validasi	30
3.5 Kontrol Kesesuaian Hasil dengan Penelitian Mansour dkk (2011)	33
3.6 Pemodelan <i>Replaceable Link</i> dengan Modifikasi	36
3.7 Evaluasi hasil analisa pemodelan	38
3.8 Kontrol terhadap <i>drift</i>	39
3.9 Kesimpulan dan saran	39
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Spesimen Penyusun Elemen.....	41
4.2 Model Spesimen	41
4.3 Validasi Hasil Studi Eksperimen dengan Analisa Numerik.....	46
4.4 Hasil Analisa Numerik Model Pengembangan	48
4.4.1 Spesimen WBRL1	48
4.4.2 Spesimen WBRL2	50
4.4.3 Spesimen WBRL3	52
4.4.4 Spesimen WBRL4	53
4.4.5 Spesimen WLYS100.....	54
4.4.6 Spesimen WLYS160.....	55
4.4.7 Spesimen WLYS225.....	57
4.4.8 Spesimen WBRL41	58
4.5 Perbandingan Perilaku Seismik.....	59
4.5.1 Spesimen WBRL1 dengan WBRL41	59

4.5.2 Spesimen WBRL1 dengan WBRL2.....	60
4.5.2 Spesimen WBRL1 dengan WBRL3.....	62
4.5.3 Spesimen WBRL1 dengan WBRL4.....	63
4.5.4 Spesimen WBRL1 dengan <i>Low yield point (LYP) Steel</i>	64
4.6 Perilaku pada Sambungan akibat Beban Siklik	67
4.6.1 Spesimen tanpa Plat Pengaku Sambungan (WBRL1, WBRL2, WBRL41, WLYS100, WLYS160, dan WLYS225	67
4.6.2 Spesimen dengan Plat Pengaku Sambungan (WBRL3 dan WBRL4) ..	69
4.7 Degradasi kekakuan pada Elemen <i>Replaceable link</i>	71
4.8 Kontrol <i>Drift</i> pada <i>Frame</i> EBF.....	73
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	79
BIODATA PENULIS	91

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perbedaan perilaku CBF, EBF, dan MRF.....	7
Gambar 2. 2 Konfigurasi Eccentrically Braced Frames (a) K-braces; (b) V-braces (Suswanto dkk, 2017)	8
Gambar 2. 3 Distribusi gaya pada elemen link (Bruneau dkk, 2011).....	8
Gambar 2. 4 Experimental Set Up removable links.....	9
Gambar 2. 5 Hubungan kuat geser dan deformasi (a)Spesimen e 700 mm (b)Spesimen e 400 mm.	10
Gambar 2. 6 Replaceable link dengan (a) End-plate connection link, (b) web-bolted connection link.	11
Gambar 2. 7 Kurva histeresis hasil percobaan terhadap (a) End-plate connection link, (b) Web bolted connection link. (Mansour dkk, 2011).....	12
Gambar 2. 8 Kurva histeresis spesimen replaceable link hasil eksperimen. (Moestopo dkk, 2018)	13
Gambar 2. 9 Spesimen replaceable link dengan sambungan berada di luar balok link (Bozkurt dan Topkaya, 2017).	13
Gambar 2. 10 Deformasi pada EBF akibat beban H.....	14
Gambar 2. 11 Hubungan antara $\gamma\theta$ dan eL	15
Gambar 2. 12 Rotasi sambungan dan rotasi lentur	16
Gambar 2. 13 Dimensi penampang yang dilakukan pengujian untuk mengetahui pengaruh mutu baja. (Duscika dkk, 2010)	16
Gambar 2. 14 Hysteretic curve pada low yield steel (a) dibandingkan dengan normal steel (b)	18
Gambar 2. 15 Coupon test untuk mengetahui perilaku siklik dari material Q345GJ	18
Gambar 2. 16. (a) eight-node trilinear element; (b) twenty-node solid element... ..	20
Gambar 2. 17 Deformasi yang terjadi pada elemen Q4	23
Gambar 2. 18 Ilustrasi Elemen (a) C3D8R dan (b) C3D8	24
Gambar 2. 19 Dua komponen yang digabungkan dengan tie constraint.....	25
Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi	27
Gambar 3. 2 Preliminary design spesimen WBRL1	30

Gambar 3. 3 Boundary condition pada pemodelan link	31
Gambar 3. 4 Grafik pembebanan siklik.....	32
Gambar 3. 5 Kurva hysteresis spesimen UT-1B (Mansour dkk, 2011)	34
Gambar 3. 6 Sobeknya bidang geser pada link akibat pembebanan siklik.....	36
Gambar 3. 7 Modifikasi elemen replaceable link: a. WBRL2 b. WBRL3 c. WBRL4.....	36
Gambar 3. 8 Kurva tegangan dan regangan dibawah beban monotonik pada	38
Gambar 3. 9 Perbandingan tegangan puncak hasil tension test.....	38
Gambar 4. 1 Tipe-tipe elemen pada Abaqus 6.14	41
Gambar 4. 2 Link WBLV berdasarkan eksperimental Mansour dkk, 2011	43
Gambar 4. 3 Failure mode pada rotasi 0.09 rad (a) hasil eksperimen; (b) hasil Abaqus	47
Gambar 4. 4 Kurva hysteresis (a) UT-1B; (b) WBLV; (c) penggabungan keduanya	47
Gambar 4. 5 Kurva histeresis spesimen WBRL1	49
Gambar 4. 6 Leleh pertama pada WBRL1	50
Gambar 4. 7 Siklus ke-52 pembebanan pada WBRL1	50
Gambar 4. 8 Kurva hysteresis pemodelan WRL2	51
Gambar 4. 9 Tegangan WRL2 pada saat siklus ke-54	51
Gambar 4. 10. Flange buckling pada saat pembebanan siklus ke-54	51
Gambar 4. 11 Kurva Histeresis hasil pemodelan WRL3.....	52
Gambar 4. 12 Tegangan yang terjadi pada WBRL3 saat siklus ke-53.....	53
Gambar 4. 13 Kurva histeresis pemodelan WBRL4	53
Gambar 4. 14 Persebaran tegangan spesimen WBRL4.....	54
Gambar 4. 15 Local Buckling pada WBRL4 siklus 52	54
Gambar 4. 16 Kurva histeresis spesimen WLYS100	55
Gambar 4. 17 Hasil tegangan von mises spesimen WLYS100.....	55
Gambar 4. 18 Hasil tegangan von mises spesimen WLYS100.....	56
Gambar 4. 19 Kurva histeresis spesimen WLYS160	56
Gambar 4. 20 Kurva histeresis spesimen WLYS225	57
Gambar 4. 21 Hasil tegangan von mises spesimen WLYS225.....	58
Gambar 4. 22 Kurva histeresis spesimen WBRL41	58

Gambar 4. 23 Hasil tegangan von mises spesimen WLYS225	59
Gambar 4. 24 Perbandingan kurva histeresis WBRL1 dan WBRL41	60
Gambar 4. 25 Perbandingan kurva histeresis WBRL1 dan WBRL2	61
Gambar 4. 26 Hasil perbandingan analisa WBRL1 dengan WBRL3	62
Gambar 4. 27 Hasil perbandingan analisa WBRL1 dengan WBRL4	64
Gambar 4. 28 Perbandingan kurva hysteresis WBRL1 dengan WLYS100	65
Gambar 4. 29 Perbandingan kurva hysteresis WBRL1 dengan WLYS160	65
Gambar 4. 30 Perbandingan kurva hysteresis WBRL1 dengan WLYS225	66
Gambar 4. 31 Backbone curve hasil uji spesimen	67
Gambar 4. 32 Ovalized pada lubang baut akibat dari pembebanan siklik	67
Gambar 4. 33 Distribusi tegangan pada baut di (a) sisi kiri; (b) sisi kanan	68
Gambar 4. 34 Distribusi tegangan pada balok induk	68
Gambar 4. 35 Distribusi tegangan pada sambungan balok link	70
Gambar 4. 36 Distribusi tegangan pada baut WBRL4 di (a) sisi kiri; (b) sisi kanan	70
Gambar 4. 37 Distribusi tegangan pada balok induk WBRL4	71
Gambar 4. 38 Kurva degradasi kekakuan	72

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Loading Protocol.....	32
Tabel 3. 2 Parameter Pemodelan Abaqus	33
Tabel 3. 3 Hasil Eksperimental pemodelan Replaceable Link oleh Mansour dkk (2011).....	35
Tabel 3. 4 Sifat Mekanis Baja Struktural	37
Tabel 3. 5 Sifat Mekanis Low yield point Steel.....	37
Tabel 4. 1 Material Penyusun Elemen Replaceable Link	44
Tabel 4. 2 Hasil Pemodelan Numerik Spesimen Uji	48
Tabel 4. 3 Perbandingan Energi Disipasi WBRL1 dan WBRL41	60
Tabel 4. 4 Perbandingan Daktilitas WBRL1 dan WBRL41	60
Tabel 4. 5 Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL2	61
Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL2.....	61
Tabel 4. 7 Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL3	63
Tabel 4. 8 Perbandingan Nilai Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL3.....	63
Tabel 4. 9 Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL4	64
Tabel 4. 10 Perbandingan Nilai Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL4.....	64
Tabel 4. 11 Energi disipasi spesimen <i>low yield point steel</i>	66
Tabel 4. 12 Daktilitas spesimen <i>low yield point steel</i>	66
Tabel 4. 13. Nilai Tegangan Maksimum pada Daerah Sambungan.....	69
Tabel 4. 14 Nilai Tegangan Maksimum pada Daerah Sambungan Elemen dengan Plat Pengaku.....	71
Tabel 4. 15 Initial Stiffness pada Elemen Link.....	72
Tabel 4. 16 Hasil perhitungan drift spesimen	74
Tabel 4. 17 Persentase Selisih Drift dengan Simpangan Ijin.....	74

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kekakuan serta daktilitas yang cukup menjadi salah satu faktor penting dalam mendesain struktur penahan beban lateral khususnya struktur penahan gempa. Kekakuan elastis yang tinggi diperlukan untuk menghindari kerusakan non-struktural ketika struktur harus menahan beban angin ataupun beban seismik kecil. Selain itu, struktur juga harus mampu menunjukkan daktilitas yang baik ketika terkena beban gempa yang besar serta harus dapat mendisipasi energi dalam jumlah yang besar untuk menghindari terjadinya keruntuhan (Tan dan Christopoulos, 2016). Baja yang memiliki kekuatan tinggi, daktilitas, serta disipasi energi yang baik menjadikannya sebagai salah satu pilihan material struktur untuk daerah rawan gempa (Rafael dkk, 2017). Terdapat beberapa model sistem struktur bangunan baja tahan gempa yang telah diterapkan yaitu *Moment Resisting Frame* (MRF), *Concentrically Braced Frame* (CBF), *Eccentrically Braced Frame* (EBF), dan juga *Steel Plate Shear Wall* (SPSW).

Eccentrically Braced Frames telah digunakan sebagai sistem penahan beban seismik terutama pada struktur bangunan sejak diusulkannya sistem tersebut pada awal tahun 1970 (Daneshmand A dkk, 2011). *Eccentrically Braced Frames* adalah suatu sistem rangka dimana gaya aksial yang diinduksi oleh pengaku eksentrik akan ditransfer ke kolom atau pengaku eksentrik lainnya melalui geser dan lentur pada segmen kecil dari balok yang disebut *link* (Musbar dkk, 2017). Sistem kerangka pada EBF bekerja dengan cara mendisipasi energi seismik pada *link* dimana bagian tersebut mempunyai sifat seperti sekering (*fuse*) (Bruneau dkk, 2011). Cara kerja EBF yang bergantung pada lelehnya balok *link* di antara pengaku eksentrik dimana pada bagian tersebut didesain untuk mampu menahan perubahan inelastik yang besar tanpa harus kehilangan kekuatan dari *link* tersebut. (Rafael dkk, 2017). Dapat diketahui bahwa EBF merupakan penggabungan antara *Concentrically Braced Frames* (CBF) dan juga *Moment Resisting Frames* (MRF), dimana *bracing* pada EBF memberikan kekakuan elastis yang tinggi seperti pada

CBF serta daktilitas dan energi disipasi yang baik seperti pada MRF (Mansour, 2011).

Selain keuntungan yang didapatkan dari pengaplikasian struktur EBF, terdapat pula beberapa permasalahan yang harus ditemukan solusinya. Yang pertama di dalam perencanaan struktur EBF, balok lantai didesain untuk mengalami pelepasan geser di daerah *link*, sedangkan bagian pada balok di luar *link* haruslah mampu menahan gaya yang ditimbulkan oleh *strain-hardening*. Untuk menyeimbangkan dua persyaratan ini dibutuhkan proses yang panjang dan menyebabkan ukuran *link* menjadi *oversized* dikarenakan perhitungan yang menyebabkan *link* tersebut juga ikut menahan gaya yang besar seperti bagian-bagian EBF lainnya seperti kolom, *floor slabs*, sambungan, serta fondasi yang kemudian menjadikan tingginya biaya perencanaan (Mansour, 2011). Yang kedua ialah perbaikan struktur EBF pasca gempa memerlukan biaya yang tinggi dikarenakan *link* yang terintegrasi dengan balok menyebabkan *link* haruslah dipotong dan diperbaiki atau bahkan diganti seluruhnya sehingga terjadi penundaan dalam pengoperasian kembali gedung yang kemudian dapat menyebabkan kerugian lebih lanjut bagi pemilik dan penghuni gedung (Tan dan Christopoulos, 2016).

Maka dari itu, munculah ide untuk menggunakan *replaceable link* pada EBF, yaitu *link* yang dapat dibaut maupun dilas sehingga memisahkan bagian *link* dari balok untuk memberikan solusi terhadap masalah ini. *Replaceable link* memungkinkan untuk dilakukannya kontrol secara independen terhadap kekuatan, kekakuan, serta daktilitas pada sistem EBF. Kelebihan tambahan yang dapat diperoleh dari penggunaan *replaceable link* adalah *replaceable link* dapat difabrikasi di luar *site* sehingga dapat mengurangi waktu dan biaya konstruksi ketika dilakukan perakitan di lapangan (Mansour dkk, 2011).

Banyak penelitian tentang *replaceable link* dilakukan setelah mengetahui kelebihan yang didapatkan dari penggunaan elemen tersebut dalam struktur. Mansour dkk (2008, 2011) melakukan penelitian eksperimental terhadap efek dari penggunaan *replaceable link* pada rangka EBF dimana hasilnya menyatakan bahwa end-plate *link* dapat berperilaku seperti konvensional *link*, sedangkan *web-bolted link* mengalami *pinched response* namun memiliki nilai rotasi yang besar yang disebabkan oleh rotasi pada sambungan. Chao dan Gong (2014) melakukan studi

numerik terhadap *web-bolted replaceable link* dan menyatakan bahwa *web-bolted* memiliki energi disipasi yang baik dikarenakan terjadi pelelehan terlebih dahulu pada balok *link*. Penelitian lainnya juga banyak dikembangkan, seperti Tan dan Christopoulos (2016) dan Binder dkk (2017) melakukan studi tentang penggunaan material *cast steel* untuk elemen *link*. Ashikov, dkk (2017) memberikan usulan tentang *active link* dimana elemen *build-up link* dengan *flange* yang tebal dan lebar serta *web* yang relatif lebih tipis yang dihubungkan pada balok utama dengan menggunakan sambungan baut pada *flange* serta *web*. Moestopo dkk (2018) meneliti tentang perbandingan perilaku *replaceable link* dengan dua jenis baja yang berbeda, BJ37 dan SS400 dimana BJ37 dapat menahan gaya geser lebih baik daripada SS400.

Dalam studi ini, akan dilakukan analisa struktur EBF dengan menggunakan konsep *replaceable* pada balok *link*nya. *Link* yang digunakan adalah *replaceable link* dengan *eccentrically loaded web-bolted connection* yaitu dimana bagian *link* akan disusun dari dua buah profil *channels* (C) yang kemudian akan disambung ke bagian balok yang disusun dari profil *Wide Flange* (WF) dengan menggunakan baut dan plat di kedua ujung bagian *link*.

Analisa mikro pada elemen *replaceable link* dilakukan menggunakan program bantu ABAQUS 6.14. Pada penelitian akan dilakukan permodelan dengan metode numerik terhadap *replaceable link* pada penelitian sebelumnya yang kemudian permodelan tersebut akan digunakan sebagai validasi dari model baru yang akan dibuat. Permodelan dari eksperimen yang dipilih adalah salah satu permodelan yang dilakukan oleh Mansour dkk (2011) yaitu *replaceable link* dengan sambungan baut pada *web link*. Dari hasil pemodelan kemudian diamati bagaimana perilaku elemen *link* apabila diberi beban siklik. Pengamatan akan dilakukan pada kapasitas tegangan maksimum, respon histeresisnya, daktilitas, serta pola kegagalan pada elemen yang kemudian dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi dalam merencanakan elemen *link* maupun struktur EBF maupun untuk penelitian selanjutnya.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang yang telah disampaikan di atas, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana kinerja serta respon dari *web-bolted replaceable link* apabila diberi beban siklik dengan bantuan *Finite Element Software*?

Detail permasalahan akan diuraikan sebagai berikut :

1. Bagaimana memodelkan serta melakukan analisa numerik pada *web-bolted connection replaceable link* dengan menggunakan *software* bantu ABAQUS?
2. Bagaimana analisa perilaku *replaceable link* khususnya pada kapasitas tegangan maksimum, respon histeresisnya, daktilitas, serta pola kegagalan pada struktur pada EBF jika diberi beban siklik?
3. Berapakah nilai *drift* yang terjadi pada *Frame* apabila menggunakan *replaceable link* hasil pengujian numerik?

1.3 Tujuan Pembahasan

Berdasarkan uraian permasalahan di atas, pencapaian yang ingin didapatkan dalam penelitian ini adalah :

1. Memodelan serta menganalisa secara analisa numerik spesimen *web-bolted connection replaceable link* menggunakan *software* bantu ABAQUS.
2. Menganalisa perilaku *replaceable link* akibat pemberian beban siklik terhadap kapasitas tegangan maksimum, respon histeresisnya, daktilitas, serta pola kegagalan pada struktur dari EBF.
3. Mengetahui nilai *drift* yang terjadi akibat pengaplikasian *replaceable link*.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan menjadi terarah, berikut ini adalah batasan-batasan dalam melakukan penelitian. Batasan-batasan tersebut meliputi :

1. Tidak membahas performa balok *link* diluar struktur *Eccentrically Braced Frames*.
2. Tidak membahas *intermediate link* dan *flexure link*.
3. Tidak memasukkan *floor slab* ke dalam faktor perkuatan tambahan pada *link*.

4. Tidak membahas faktor ekonomi serta keefisienan dalam pembuatan elemen *replaceable link* di lapangan.

1.5 Manfaat Studi

Adapun manfaat yang dapat diberikan dari hasil penelitian pada tesis ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai bahan referensi serta informasi dalam desain struktur bangunan baja dengan menggunakan sistem *Eccentrically Braced Frames* (EBF).
2. Sebagai bahan referensi dalam perencanaan *replaceable link* pada struktur EBF.
3. Sebagai pertimbangan dalam memilih kriteria mutu serta ukuran balok *link* yang akan diterapkan dalam struktur bangunan EBF.

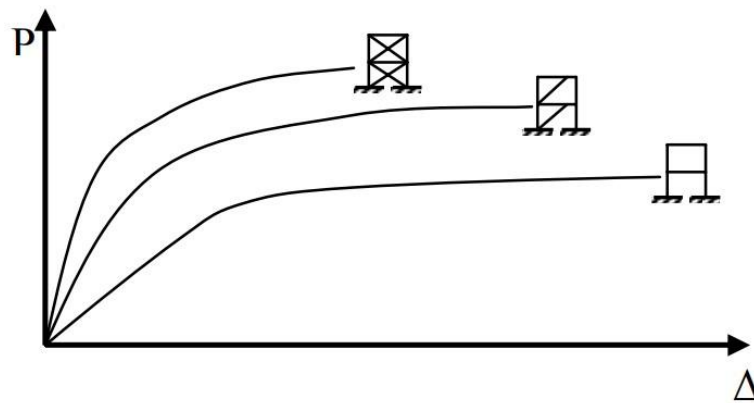
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Eccentrically Braced Frames

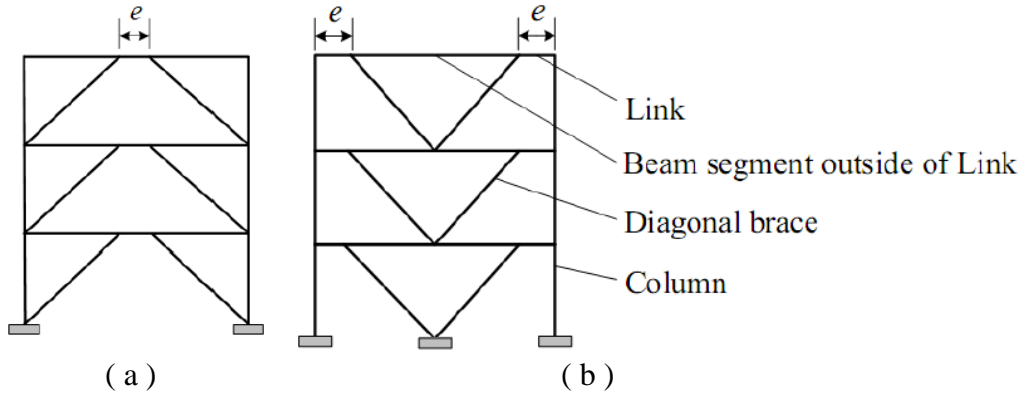
Eccentrically Braced Frames (EBF) merupakan struktur rangka yang membatasi perilaku inelastik hanya pada bagian balok yang terletak di antara dua pengaku eksentrik dimana elemen lainnya tetap dalam kondisi elastis selama pembebanan seismik berlangsung (Suswanto dkk, 2017). Sistem rangka EBF dikembangkan karena adanya keterbatasan pada sistem rangka sebelumnya, *Moment Resisting Frames* (MRF) dan *Centrically Braced Frames* (CBF). EBF mengkombinasikan kedua kelebihan dari rangka sebelumnya, yaitu daktilitas pada MRF dan kekakuan dari CBF, sehingga menghasilkan struktur yang kaku namun memiliki kemampuan dalam mendisipasi energi dengan baik (Yurisman dkk, 2010).



Gambar 2.1 Perbedaan perilaku CBF, EBF, dan MRF (Moestopo dkk, 2006 dalam Yurisman dkk, 2010)

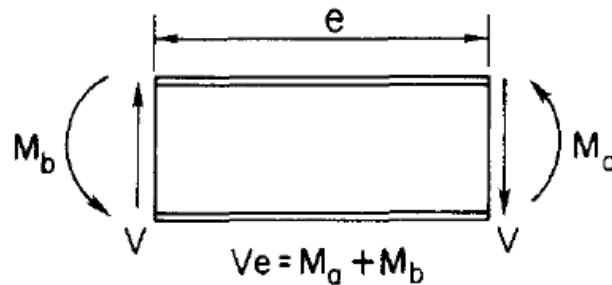
Desain dari EBF utamanya berhubungan langsung dengan kekuatan, kekakuan, serta daktilitas. Untuk mengontrol desain EBF dilakukan pendefinisian tiga variabel utama yaitu konfigurasi pengaku, panjang *link*, serta *link section properties* dimana panjang *link* merupakan parameter paling signifikan dari desain struktur (Xiao dkk, 2018). Fungsi dari *link* adalah sebagai bagian terlemah dari sistem rangka dimana elemen mempunyai kapasitas deformasi plastis serta dapat

mendisipasi energi dari beban lateral yang mengenai struktur (Musmar, 2012). Prinsip desain kapasitas pada desain EBF diaplikasikan dengan membatasi perilaku inelastik struktur hanya terjadi pada elemen *link* (Bozkurt dan Topkaya, 2017).



Gambar 2.2 Konfigurasi *Eccentrically Braced Frames* (a) K-braces; (b) V-braces (Suswanto dkk, 2017)

Link merupakan elemen balok pendek yang di kedua sisinya bekerja gaya geser yang berlawanan arah sehingga timbul momen lentur dengan besar dan arah yang sama akibat gaya geser tersebut. (Wijaya, 2011; Bruneau dkk, 2011). Penghamburan energi oleh struktur EBF terjadi dengan terbentuknya sendi plastis pada elemen *link*. Pelelehan baik berupa pelelehan geser maupun pelelehan lentur terjadi pada balok *link* serta elemen tersebut diizinkan untuk mengalami deformasi yang cukup besar (Kurdi dkk, 2013).



Gambar 2.3 Distribusi gaya pada elemen *link* (Bruneau dkk, 2011)

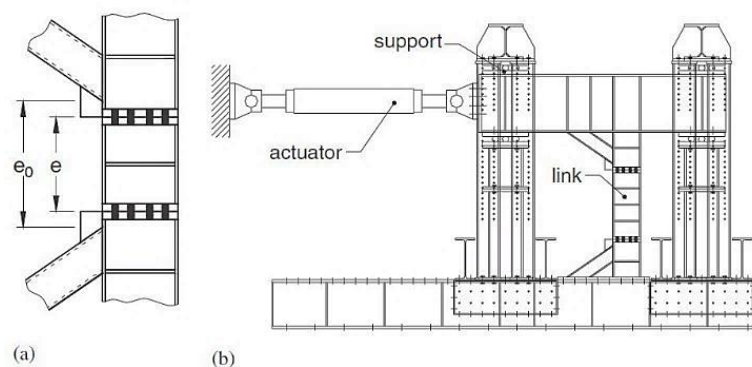
Link dengan pelelehan geser lebih dianjurkan karena menunjukkan tingkat daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan *link* lentur. Pada *link* geser, gaya geser tersebar merata pada *web link* dan pelelehan terjadi di sepanjang penampang *web* (Musmar, 2012). Struktur EBF dengan *link* geser memiliki perpindahan lateral yang kecil serta memiliki respon terhadap beban lateral lebih baik (Suswanto, 2017).

Penelitian dilakukan oleh Rafael dkk, 2017, didapatkan bahwa pada *link* pendek setelah dilakukan pembebanan *monotonic*, mekanisme keruntuhan yang terjadi sesuai dengan yang disyaratkan yaitu dalam kondisi geser serta distribusi tegangan lebih merata pada *web*. Penelitian tersebut juga menyatakan bahwa semakin panjang *link* maka mekanisme keruntuhan akan sulit dicapai karena *link* berperilaku seperti balok.

2.2 Replaceable link

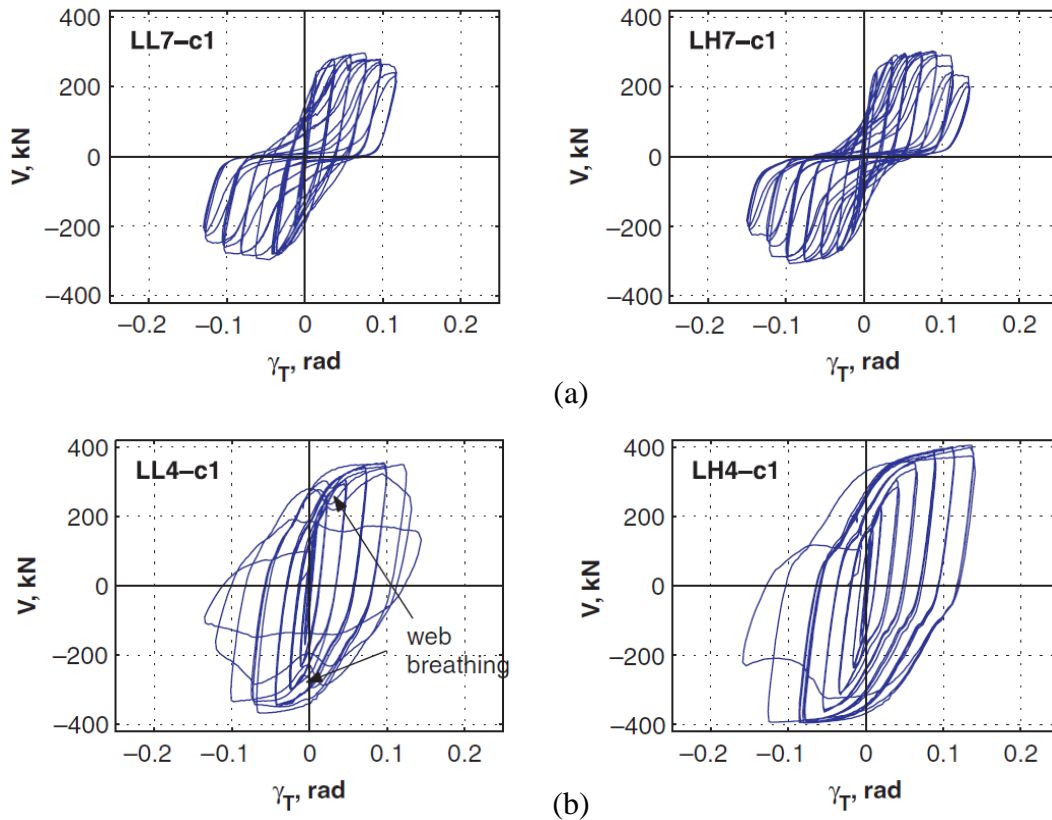
Struktur EBF konvensional terdesain dengan elemen balok dan elemen *link* menjadi satu kesatuan. Balok utama didesain agar dapat menahan gaya akibat *strain-hardening* sedangkan perlelehan harus terjadi pada bagian *link*. Mengaplikasikan kedua persyaratan dapat mengakibatkan *oversized* pada elemen *link* yang akan mengarah pada kenaikan biaya pembuatan struktur (Zhao dkk, 2014). Beberapa penelitian dilakukan dan dikembangkan untuk mendapatkan struktur EBF yang dapat mendisipasi energi dengan baik ketika terjadi gempa, metode yang banyak diteliti yaitu EBF dengan menggunakan elemen *link* yang dapat diganti. Eksperimen serta pemodelan dilakukan untuk mendapatkan elemen *replaceable link* yang sesuai dengan kriteria serta persyaratan yang berlaku.

Dubina dkk, 2008, melakukan penelitian dengan mengkombinasikan *Momen Resisting Frames (MRF)* serta *Eccentrically Braced Frames (EBF)* dengan *replaceable link*. *Link* yang diuji merupakan *link* geser dengan nilai e yang berbeda untuk mengetahui pengaruh dari rasio momen serta geser pada *link*. *Link* dihubungkan pada balok utama dengan *end-plate bolted connection* untuk memudahkan pada saat penggantian.



Gambar 2. 4 *Experimental Set Up removable links*
(Dubina, dkk, 2008)

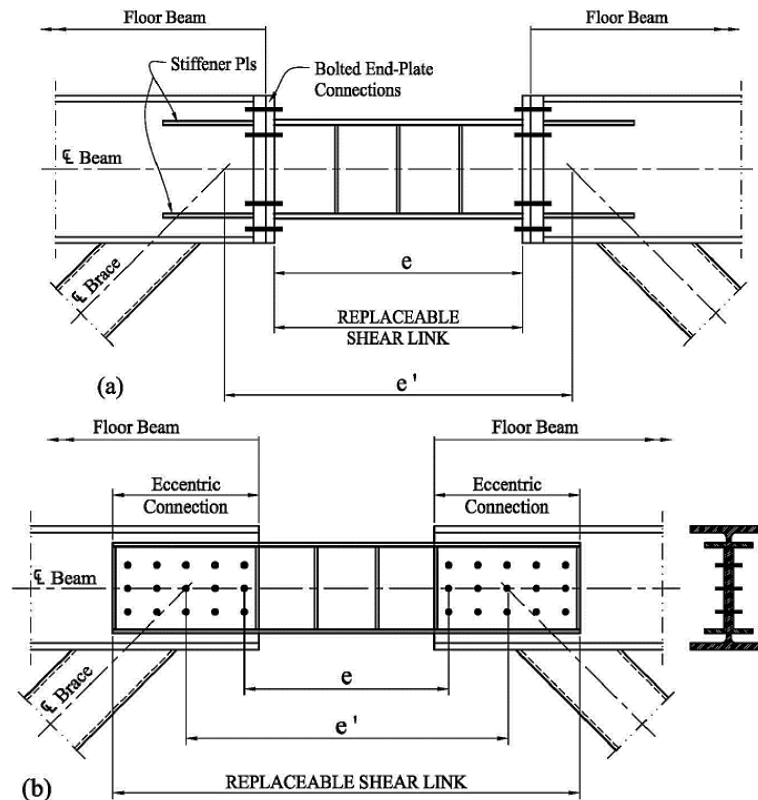
Hasil menunjukkan *link* dengan e yang sangat pendek (400 mm) tetap berada dalam kondisi elastis setelah diberi beban. Pada *link* ini, kekuatan *link* sangat dipengaruhi oleh kuat geser dan penurunan kekuatan serta kekakuan pada sambungan tidak mempengaruhi respon dari *link* terhadap beban siklik. Sedangkan pada *link* yang lebih panjang, perilaku spesimen dipengaruhi oleh respons dari sambungan dimana terjadi penurunan kekuatan secara bertahap yang disebabkan oleh pengelupasan pada ulir baut yang menyebabkan adanya *pinching* pada kurva histeresis. Penelitian juga mengemukakan adanya penurunan kekakuan pada *bolted links* dibandingkan dengan *link* konvensional (Dubina dkk, 2008).



Gambar 2. 5 Hubungan kuat geser dan deformasi (a)Spesimen e 700 mm
(b)Spesimen e 400 mm.
(Dubina, dkk,2008)

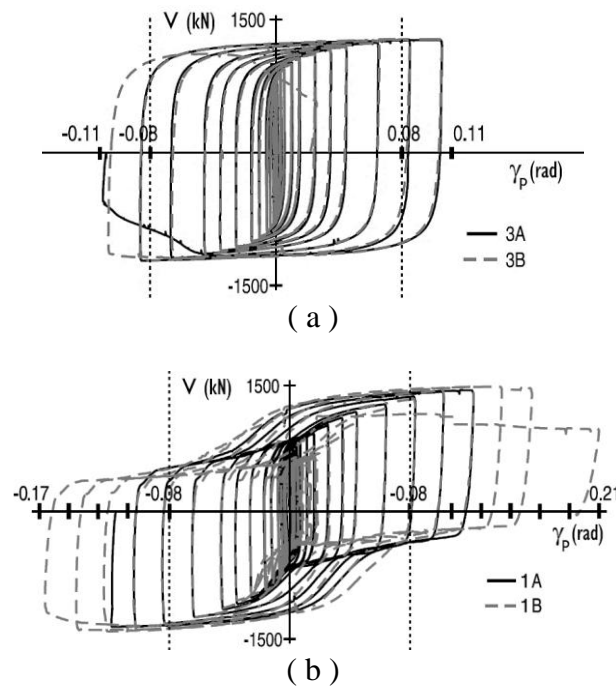
Mansour dkk, 2011, melakukan penelitian terhadap tiga jenis *replaceable link* dengan spesifikasi: (i) *link* WF dengan *welded end plate* yang dibaut pada balok lantai, (ii) *link back-to-back channel* dengan sambungan *web bolted*, dan (iii) *link* dengan sambungan *welded web*, diuji untuk mengetahui bagaimana perilaku elemen apabila dikenai beban siklik. Spesimen yang diuji haruslah memenuhi

kriteria bahwa *link* geser ($e < 1.6M_p/V_p$) harus mampu untuk mengembangkan rotasi inelastis sebesar 0.08 rad.



Gambar 2. 6 *Replaceable link* dengan (a) *End-plate connection link*, (b) *web-bolted connection link*.
(Mansour dkk, 2011)

Hasil eksperimen oleh Mansour dkk, 2011, menunjukkan bahwa pada *web connection link* efek *pinching* muncul pada kurva histeresis karena terjadinya *slippage* pada sambungan sehingga dibutuhkan plat pengaku *web* yang lebih tebal untuk mengurangi terjadinya *ovalized* pada lubang baut akibat rotasi yang timbul. Efek *pinching* menyebabkan berkurangnya kemampuan *web bolted link* dalam mendisipasi energi. Sedangkan perilaku *end plate link* mirip dengan konvensional *shear link* dimana kedua *link* tersebut memiliki respons yang sama terhadap *loading history*. Pada saat pemberian beban, sambungan pada ujung *link* tetap bersifat kaku dan rotasi yang dihasilkan murni dihasilkan oleh geser pada *link*. Sedangkan pada *web bolted*, spesimen mampu menghasilkan rotasi yang lebih besar karena sambungannya yang lebih fleksibel. (Mansour, 2011)

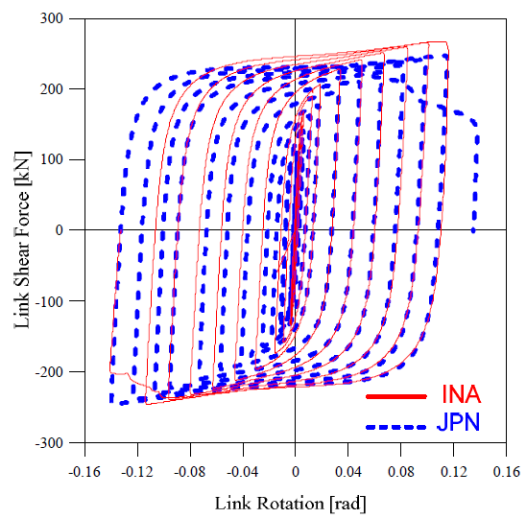


Gambar 2. 7 Kurva histeresis hasil percobaan terhadap (a) *End-plate connection link*, (b) *Web bolted connection link*. (Mansour dkk, 2011)

Moestopo dkk, 2018 melakukan penelitian terhadap penggunaan BJ37 sebagai komponen penyusun elemen *replaceable link* mengingat penelitian EBF dengan BJ37 belum banyak ditemui dan material tersebut merupakan material baja yang umum digunakan di Indonesia. Spesimen *link* BJ37 dengan F_y 240 MPa dibandingkan dengan *Japanese steel* SS400 dengan F_y 235 MPa. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa spesimen *link* BJ37 menunjukkan nilai *shear resisting* yang lebih tinggi dari SS400 dikarenakan nilai F_y yang sedikit lebih besar, namun keduanya memiliki kinerja dan daktilitas yang sama terlepas adanya perbedaan material. Hasil uji pembebanan siklik eksperimen juga menunjukkan bahwa *link* yang mengalami kerusakan dapat diganti dengan *link* baru dengan geometri yang sama karena struktur yang tersisa tetap dalam kondisi elastis.

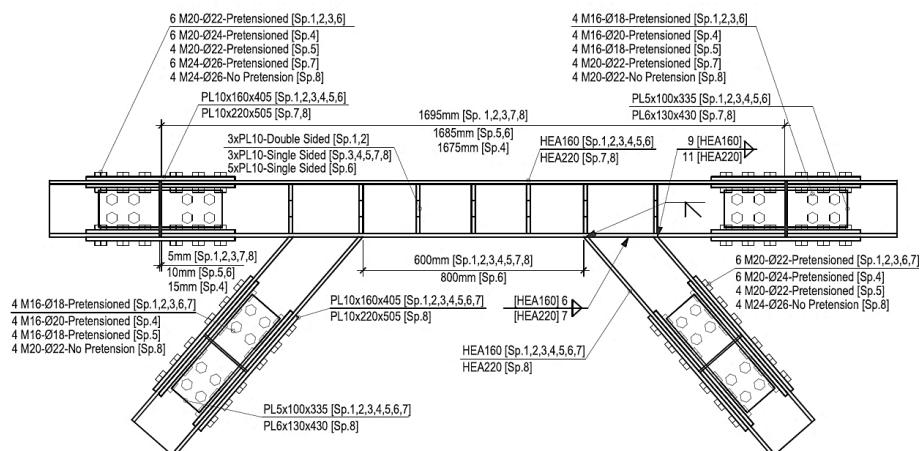
Pengujian terhadap berbagai macam jenis *link-end connection* banyak dilakukan untuk mendapatkan elemen yang efektif dan juga mampu untuk mendisipasi gaya lateral. Empat jenis *link-end connection* dengan spesifikasi *end plate connection*, *splice plate connection*, *web bolt connection*, serta *adhesive connection* dilakukan pengujian oleh Ji dkk, 2016, untuk mengetahui perilaku siklik serta kemungkinan pengantiannya. Hasil penelitian menyebutkan bahwa keempat

link mampu menunjukkan performa yang baik pada saat rotasi melampaui 0.02 rad tanpa terjadi kegagalan namun *slip* yang terjadi menyebabkan timbulnya *pinching effect* pada kurva *hysteretic*. Sedangkan spesimen *link* dengan *adhesive connection link* mengalami kegagalan getas pada sambungan pada saat fase 1 pembebanan. Sistem perbaikan serta pergantian balok *link* pada *end plate* membutuhkan waktu serta *effort* lebih apabila dibandingkan dengan *web connection* dimana *web connection* mempunyai nilai rotasi residu yang lebih besar sehingga memudahkan dalam melakukan penggantian. (Ji dkk, 2016).



Gambar 2. 8 Kurva histeresis spesimen *replaceable link* hasil eksperimen. (Moestopo dkk, 2018)

Bozkurt dan Topkaya, 2017, melakukan studi tentang perilaku *short* dan *intermediate replaceable link* apabila pemisahan balok dilakukan diluar elemen *link* dan *braces* dan disambung dengan *gusset plate* seperti pada Gambar 2.9.



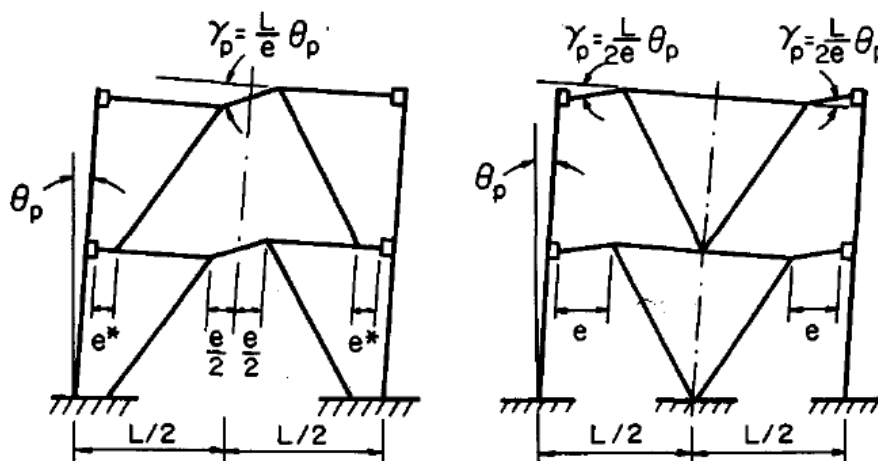
Gambar 2. 9 Spesimen *replaceable link* dengan sambungan berada di luar balok *link* (Bozkurt dan Topkaya, 2017).

Sambungan diletakkan sejauh mungkin dari balok *link* agar tidak mempengaruhi performa dari *fuse* itu sendiri. Hasil eksperimental menunjukkan *link* pendek dan *link* panjang mampu memenuhi persyaratan kapasitas rotasi sesuai dengan peraturan yaitu antara 0,09 – 0,15 rad. Penetapan nilai *overstrength* pada *link* sangat penting dalam mendesain *link* untuk mencegah terjadinya tekuk pada bresing (Bozkurt dkk, 2017).

2.3 Batasan Rotasi dan *Drift* pada *Replaceable link*

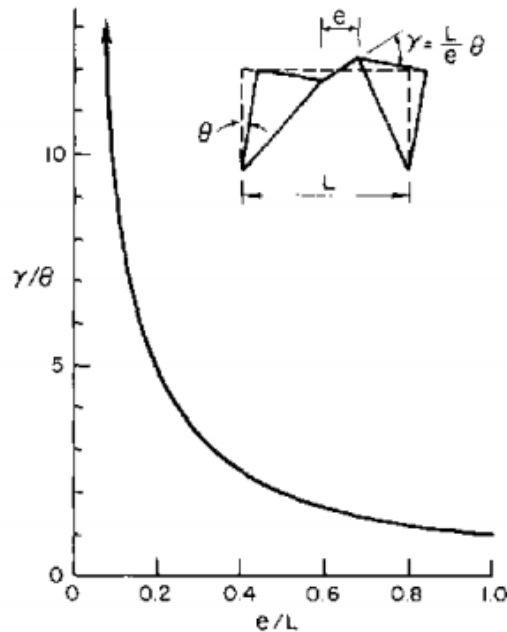
Tidak seperti desain pada MRF dan CBF, pada EBF, rotasi dan *drift* memiliki peranan penting dalam menentukan kekuatan pada struktur (Mansour dkk, 2011). Sudut rotasi (θ) yang terjadi pada *Frame* EBF bergantung sepenuhnya pada pergeseran antar lantai (*drift*) serta rasio panjang *link* pada *Frame*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 bahwa pada MRF, rotasi plastis yang terjadi pada sendi plastis balok nilainya sama dengan θ . Sedangkan pada EBF, nilai dari rotasi sudut *link* (γ) diperbesar dengan rasio L/e seperti pada persamaan dibawah ini :

$$\gamma = \frac{L}{e} \theta \quad (2.1)$$



Gambar 2.10 Deformasi pada EBF akibat beban H (Popov, Kasai dan Engelhardt, 1987)

Gambar 2.11 menunjukkan grafik hubungan antara rotasi pada *link* dan e/L yang terjadi pada struktur EBF (Gambar 2.4 b dan c). Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin pendek ukuran *link*, maka rotasi yang dihasilkan akan semakin besar, begitu pula sebaliknya.



Gambar 2. 11 Hubungan antara γ/θ dan e/L

(Bruneau dkk, 2011)

Pada penelitiannya, Mansour dkk (2011) menyimpulkan bahwa rotasi yang terjadi pada *replaceable link* berbeda dengan rotasi yang terjadi pada *link konvensional*. Rotasi yang terjadi pada *replaceable link* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\gamma = \gamma_{shear} + \theta_{flexure} + \theta_{connection} \quad (2.2)$$

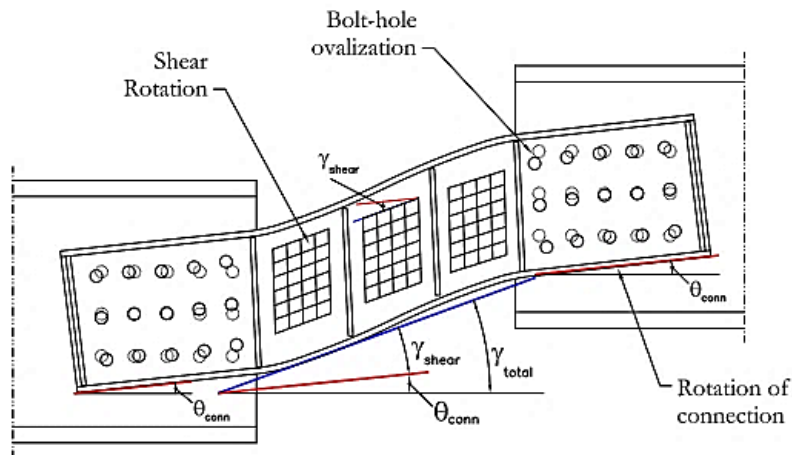
Sedangkan rotasi yang disebabkan oleh lentur dihitung dengan persamaan:

$$\theta_{flexure} = V_{link} \frac{e^2}{12EI} \quad (2.3)$$

Dimana V_{link} adalah gaya geser yang terjadi pada *link*, e adalah panjang *link*, I adalah momen inersia dari penampang, E adalah modulus elastisitas baja. Sedangkan $\theta_{flexure}$ dan θ_{conn} diilustrasikan pada Gambar 2.12.

Namun, karena nilai $\theta_{flexure}$ sangat kecil, maka dapat diabaikan sehingga, rotasi *link* dapat dihitung dengan:

$$\gamma = \gamma_{shear} + \theta_{connection} \quad (2.4)$$

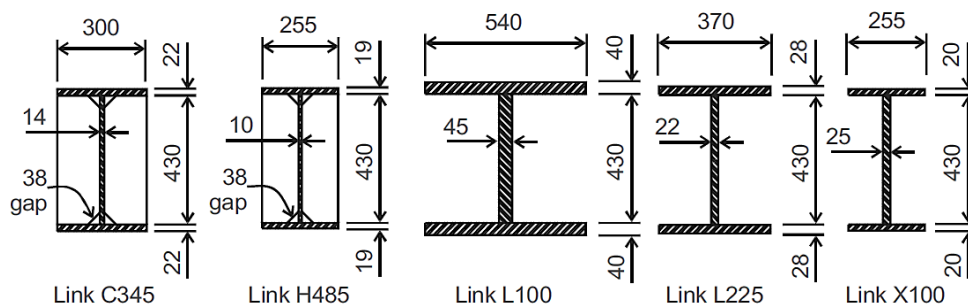


Gambar 2. 12 Rotasi sambungan dan rotasi lentur
(Mansour dkk, 2011)

2.4 Eccentrically Braced Frames dengan berbagai mutu baja

Pada struktur baja konvensional, meningkatkan ukuran dimensi merupakan salah satu cara untuk memenuhi persyaratan desain seismik. Namun peningkatan ukuran dimensi tersebut akan menyebabkan kekakuan pada struktur serta meningkatkan biaya pembangunan (Li dkk, 2017). Pengkombinasian berbagai mutu baja pada struktur EBF dilakukan salah satunya sebagai upaya untuk menjaga deformasi inelastic hanya terjadi pada elemen *fuse* saja (Mansour dkk, 2008).

Duscika dkk, 2010 melakukan eksperimen untuk menginvestigasi perilaku dari *link* geser yang didesain dari berbagai macam pelat baja. Spesimen yang diuji yaitu lima tipe *link* berbeda yang bisa dikategorikan sebagai *link* konvensional dengan *high strength steel* (HSS) 345 MPa dan 485 MPa serta diberikannya pengaku *web*. Spesimen lainnya merupakan *link* usulan yang disusun dari *low yield point* (LYP) *steel* 225 MPa dan 100 MPa tanpa pengaku *web*.



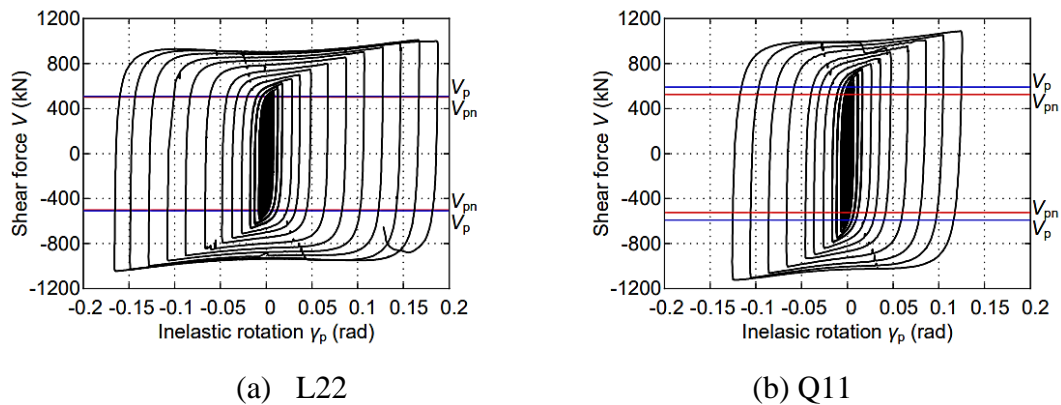
Gambar 2. 13 Dimensi penampang yang dilakukan pengujian untuk mengetahui pengaruh mutu baja. (Duscika dkk, 2010)

Hasil menunjukkan *link* dengan HSS dapat digunakan untuk perencanaan balok *link* dengan kapasitas deformasi mampu melampaui yang disyaratkan (0.08 rad). Sedangkan untuk LYP *link*, kegagalan didominasi oleh sobeknya *web* di ujung elemen. Performa balok *link* dengan LYP mutu 225 MPa dapat dibandingkan dengan shear *link* HSS lainnya, namun untuk *link* dengan mutu 100 MPa dibutuhkan perencanaan yang lebih diperhatikan. Selain itu, meningkatkan kekompakan *web* dan menghilangkan pengaku dapat menaikkan kapasitas deformasi hingga 0.20 rad (Duscika dkk, 2010).

Li dkk, 2017, mengkombinasikan HSS pada struktur EBF untuk mengurangi ukuran dimensi yang digunakan sehingga dapat meningkatkan efisiensi biaya. Hasil penelitian didapatkan bahwa struktur EBF-HSS memiliki daya dukung, daktilitas, serta disipasi energi yang baik.

Penelitian tentang membandingkan material *low yield point steel* sebagai penyusun elemen *link* dilakukan demi mendapatkan elemen *replaceable link* yang mampu mendisipasi energi dengan lebih baik. Penelitian pengembangan dilakukan dengan meneliti variabel tentang dua mutu baja yaitu Q235 dan LY225. LY225 yang terbuat dari *low yield point steel* dengan F_y 225 MPa memiliki *elongation* 23% lebih tinggi dari Q235. Hasil menunjukkan material LY225 mampu meningkatkan kapasitas rotasi *link* sebesar 22% dari Q235. (Ji dkk, 2015).

Liu dkk, 2017, melakukan pengembangan tentang material baja usulan baru yang memiliki kemampuan menahan gaya geser seperti baja normal. Penggunaann *chinnese steel* Q345GJ untuk shear *link* usulan dipilih karena pada penelitian sebelumnya baja jenis ini mampu mencapai kriteria shear *link* yang telah disyaratkan pada peraturan. Hasil penelitian oleh menunjukkan bahwa *link* dengan Q345GJ merupakan usulan ideal untuk shear *link* karena memiliki nilai daktilitas tinggi dan kapasitas leleh yang rendah. Kurva histeresis yang dicapai terlampaui stabil. Pemasangan pengaku yang rapat pada spesimen *link* cenderung menghasilkan konsentrasi tegangan yang besar di daerah *web* sehingga dapat menyebabkan terjadinya fraktur (Liu dkk, 2017).



Gambar 2. 14 *Hysteretic curve* pada *low yield steel* (a) dibandingkan dengan *normal steel* (b)
(Ji dkk, 2015)



Gambar 2. 15 *Coupon test* untuk mengetahui perilaku siklik dari material Q345GJ
(Liu dkk, 2017)

2.5 *Stiffeners* pada *Eccentrically Braced Frames*

Struktur EBF haruslah mampu menyerap energi dalam jumlah yang besar pada siklus pembebanan yang tinggi tanpa mengalami kehilangan kekakuan dan kekuatan. Penambahan pengaku (*stiffeners*) pada struktur dapat menghambat terjadinya *web buckling* akibat pemberian pembebanan (Kurdi dkk, 2013).

Yurisman dkk, 2010, serta Kurdi dkk, 2013, melakukan serangkaian penelitian untuk mengetahui perilaku balok *link* apabila diberi pengaku diagonal. Yurisman dkk melalui penelitiannya mengemukakan bahwa pengaku vertikal tidak memiliki pengaruh terhadap kinerja elemen *link*, namun pengaku diagonal memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja *link*. Semakin tebal pengaku maka

kemampuan *link* dalam menahan gaya geser dan mendisipasi energi akan semakin meningkat.

Numerical analysis oleh Kurdi dkk, 2013, menyimpulkan bahwa penambahan *diagonal stiffeners* pada elemen *link* mampu meningkatkan kekakuan, kekuatan, serta daktilitas. Elemen *link* dengan *diagonal stiffeners* juga memiliki kestabilan yang baik dimana *link* mampu berotasi sebesar 0.08 rad tanpa terjadi tekuk.

Namun disamping keuntungan yang diberikan oleh *diagonal stiffeners*, penambahan pengaku pada balok *link* dapat menjadikan *link* terlalu kaku sehingga mekanisme keruntuhan yang harusnya terjadi pada *link* tidak dapat tercapai. Sehingga penambahan pengaku diagonal perlu dilakukan perencanaan dengan seksama (Suswanto dkk, 2017).

2.6 Finite Element

Finite element method, atau yang biasa disebut metode analisa numerik adalah suatu metode untuk menyelesaikan suatu permasalahan matematis, dimana permasalahan tersebut mengandung bentuk geometri yang kompleks, adanya pembebanan, serta adanya pengaruh dari sifat material yang tidak dapat dilakukan perhitungan dengan analisa persamaan matematika (Logan, 2007).

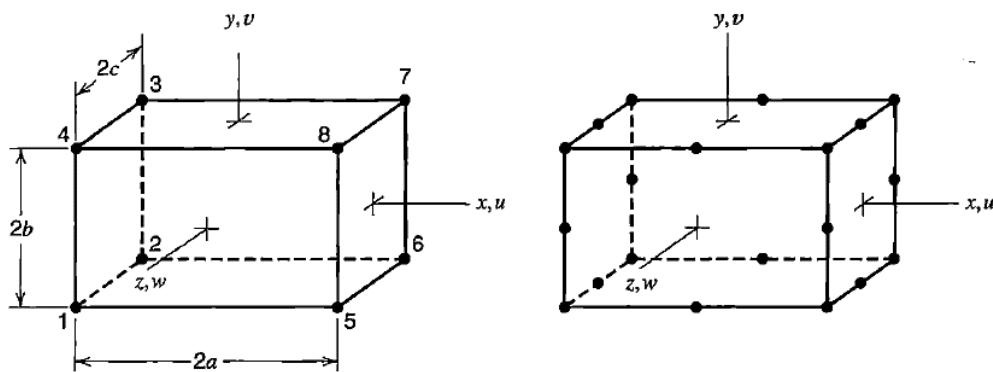
Finite element analysis (FEA) memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan sebagian besar metode analisis numerik lainnya, termasuk dalam hal *physical appeal* serta fleksibilitas dalam penggunaannya (Cook dkk, 2001). Keuntungan dari penggunaan FEA antara lain adalah sebagai berikut:

- FEA dapat diaplikasikan pada berbagai macam permasalahan, seperti pendefinisian perpindahan panas, analisa tegangan dan regangan, pendefinisian medan gaya pada suatu elemen, serta lainnya.
- Tidak ada batasan geometris, dimana elemen yang dianalisa dapat disusun dari berbagai macam bentuk.
- *Boundary condition* serta pembebanan yang diaplikasikan tidak dibatasi.
- Sifat material tidak terbatas pada isotropi, dan dapat berubah dari satu elemen ke elemen lainnya.

- Komponen elemen yang memiliki perilaku berbeda dan deskripsi matematis yang berbeda dapat dikombinasikan. Suatu FE model dapat disusun dari batang, balok, plat, kabel, ataupun dikombinasikan dengan gesekan.
- Bentuk dari struktur yang dimodelkan dapat dibuat sangat menyerupai elemen yang akan dianalisis.
- Pendekatan dari hasil analisa mudah untuk ditingkatkan dengan membuat ukuran mesh yang lebih kecil, sehingga akan lebih banyak mesh pada suatu elemen sehingga akan didapatkan hasil analisa dengan gradien serta resolusi yang lebih spesifik (Cook dkk, 2001)

2.6.1 Brick Element

Rectangular solid element, atau yang dikenal sebagai *brick element* adalah pengembangan dari elemen persegi (*rectangular plane element*) (Cook dkk, 2001). Elemen tersebut memiliki delapan nodal isoparametris seperti yang terlihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2. 16. (a) *eight-node trilinear element*; (b) *twenty-node solid element* (Cook dkk, 2001)

Elemen brick dapat dianalisa menggunakan dua jenis pendekatan, yang pertama pendekatan *eight-node trilinear element*, dengan masing-masing nodal memiliki 3 *degree of freedom* (DOF) sehingga DOF keseluruhan berjumlah 24, sedangkan pendekatan kedua adalah *twenty-node solid element*, dimana terdapat 20 nodal pada *elemen brick* sehingga keseluruhan elemen memiliki jumlah DOF 60.

Pada *eight-node solid element*, perpindahan (u) arah x dideskripsikan dengan persamaan *polynomial* seperti pada persamaan:

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7zx + a_8xyz \quad (2.5)$$

Dengan menggunakan persamaan serupa nantinya dapat diketahui pula nilai perpindahan arah u dan w untuk total 24 DOF pada elemen.

Sedangkan untuk nilai kekakuan elemen dapat dicari dengan persamaan:

$$[k]_{24 \times 24} = \int_{-c}^c \int_{-b}^b \int_{-a}^a [B]_{24 \times 6}^T [D]_{6 \times 6} [B]_{6 \times 24} dx dy dz \quad (2.6)$$

Persamaan diatas merupakan suatu persamaan perkalian matriks, dengan $[B]^T$ merupakan matriks 24×6 , $[D]$ merupakan matriks 6×6 , sedangkan $[B]$ adalah matriks berukuran 6×24 , dengan hasil akhir matrik kekakuan $[k]$ adalah matriks dengan ukuran 24×24 . Kemudian hasil perkalian akan diintegrasikan terhadap a , b , dan c . Pada persamaan 2.6 diatas, nilai $[B]$, $[N]$, serta $[D]$ dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$N_i = \frac{(a \pm x)(b \pm y)(x \pm z)}{8abc} \quad (2.7)$$

Maka,

$$[B] = [\partial][N] \quad (2.8)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y_1} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y_2} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_1} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_2} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_3} \\ \frac{\partial}{\partial y_1} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & \frac{\partial}{\partial y_2} & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial y_3} & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z_1} & \frac{\partial}{\partial y_1} & 0 & \frac{\partial}{\partial z_2} & \frac{\partial}{\partial y_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial z_3} & \frac{\partial}{\partial y_3} \\ \frac{\partial}{\partial z_1} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial z_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial z_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

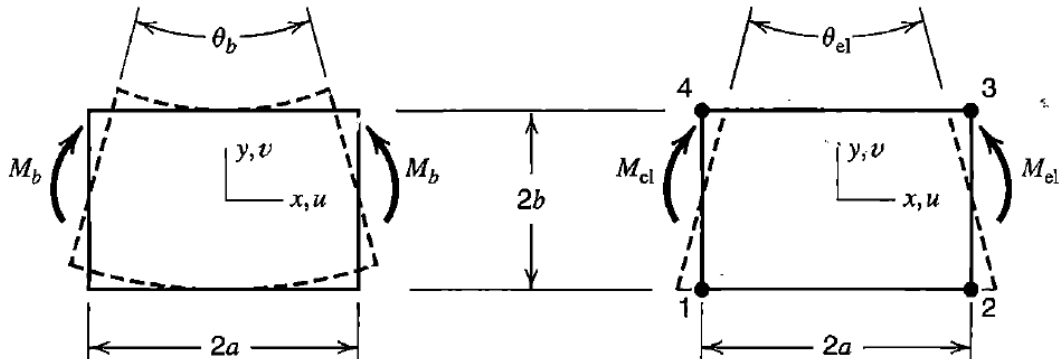
$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_4} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_5} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y_4} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y_5} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y_6} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_4} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_5} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_6} \\ \frac{\partial}{\partial y_4} & \frac{\partial}{\partial x_4} & 0 & \frac{\partial}{\partial y_5} & \frac{\partial}{\partial x_5} & 0 & \frac{\partial}{\partial y_6} & \frac{\partial}{\partial x_6} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z_4} & \frac{\partial}{\partial y_4} & 0 & \frac{\partial}{\partial z_5} & \frac{\partial}{\partial y_5} & 0 & \frac{\partial}{\partial z_6} & \frac{\partial}{\partial y_6} \\ \frac{\partial}{\partial z_4} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_4} & \frac{\partial}{\partial z_5} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_5} & \frac{\partial}{\partial z_6} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_6} \end{bmatrix} \\
= & \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_7} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_8} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y_7} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y_8} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_7} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z_8} \\ \frac{\partial}{\partial y_7} & \frac{\partial}{\partial x_7} & 0 & \frac{\partial}{\partial y_8} & \frac{\partial}{\partial x_8} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z_7} & \frac{\partial}{\partial y_7} & 0 & \frac{\partial}{\partial z_8} & \frac{\partial}{\partial y_8} \\ \frac{\partial}{\partial z_7} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_7} & \frac{\partial}{\partial z_8} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_8} \end{bmatrix} \quad (2.9)
\end{aligned}$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ \text{Symmetry} & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Dengan E adalah modulus elastisitas dan ν adalah *poisson ratio* pada elemen. Kembali ke persamaan 2.7 dijelaskan bahwa *algebraic sign* pada N_2 bernilai *negative* sedangkan pada N_8 bernilai positif yang disebabkan oleh perletakan sumbu (0,0) pada bidang *hexahedral* (Logan, 2007).

Perilaku *solid element* mampu menyerupai elemen dasarnya, yaitu Q4 dan Q8. *Solid element* juga mampu menampilkan *bending modes* seperti pada Q4 yang diilustrasikan pada Gambar 2.16 namun dengan variasi arah z karena bentuknya yang merupakan elemen 3D. selain itu, *solid element* juga mampu

menginterpretasikan mode puntir (*twisting mode*) yang terjadi pada setiap sumbu koordinat (Cook dkk, 2001).



Gambar 2. 17 Deformasi yang terjadi pada elemen Q4 (Cook dkk, 2001)

Twenty-node solid seperti pada gambar 2.16 memiliki nodal di masing-masing ujung elemen serta diantara kedua nodal. Nilai *displacement* (u) pada elemen dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 u = & a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7z^2 + a_8xy + a_9yz + \\
 & a_{10}zx + a_{11}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{13}y^2z + a_{14}yz^2 + a_{15}z^2 + a_{16}zx^2 + \\
 & a_{17}xyz + a_{18}x^2yz + a_{19}xy^2z + a_{20}xyz^2
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Untuk memberikan kompatibilitas antar elemen, variabel x^3 , y^3 , dan z^3 tidak dimunculkan dalam persamaan *displacement* di atas. Sebagai gantinya variabel x^2yz , xy^2z , serta xyz^2 digunakan pada persamaan di atas. Persamaan yang sama juga digunakan untuk mencari nilai perpindahan v dan w . Sedangkan untuk mencari kekakuan $[k]$ rumus yang digunakan sama seperti persamaan 2.8 namun memiliki 60 DOF.

Perilaku dari elemen *solid* mampu menyerupai elemen dasar penyusunnya yaitu Q4 dan Q8. *Solid* elemen juga mampu mengilustrasikan *bending modes* seperti pada Gambar 2.17. (Cook, 2001)

2.7 Pemodelan Abaqus

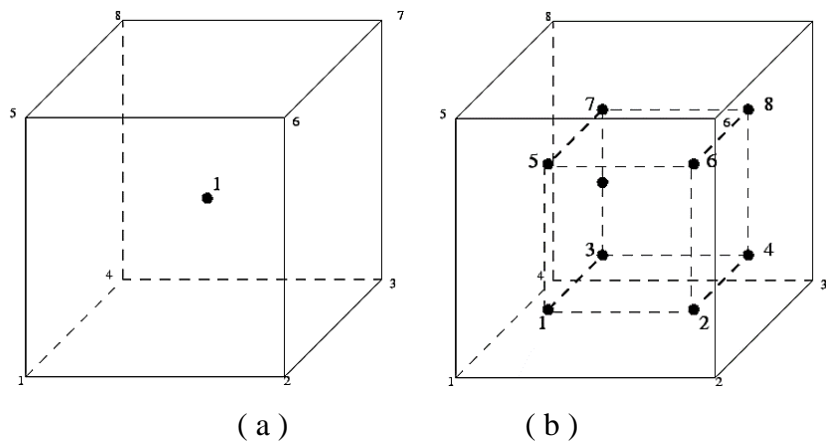
Dalam merencanakan sebuah elemen dengan menggunakan *finite element*, perhitungan matematis manual pada suatu struktur yang ditinjau menjadi sulit untuk dilakukan yang disebabkan oleh adanya analisa yang lebih kompleks karena melibatkan beberapa variabel seperti kekakuan dan beban. Maka dari itu,

penggunaan program bantu Abaqus dapat digunakan untuk melakukan perhitungan numerik terhadap suatu elemen yang ingin dilakukan analisa.

Dalam melakukan pemodelan Abaqus, perlu dilakukan pedefinisian beberapa variabel. Pendefinisian tersebut bertujuan agar hasil dari analisa dapat menyerupai hasil eksperimen yang dilakukan di laboratorium. Beberapa variabel penting yang digunakan yaitu berkaitan dengan jenis elemen serta jenis kontak antar elemen yang akan digunakan dalam pemodelan.

2.7.1 Elemen C3D8R

Salah satu elemen yang tersedia pada pemrograman Abaqus adalah *solid element*. Penamaan. Elemen C3D8R adalah elemen umum yang digunakan pada program pemodelan numerik Abaqus. Elemen tersebut hanya memiliki 1 titik integrasi yang terdapat pada bagian tengah elemen seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.18. Hal tersebut berbeda dengan elemen C3D8 yang memiliki 8 titik integrasi yang terletak di tengah elemen (web.mit.edu).



Gambar 2. 18 Ilustrasi Elemen (a) C3D8R dan (b) C3D8
(<http://web.mit.edu/>)

C3D8R merupakan elemen *solid*, yang ditandai dengan huruf C (*continuum*) pada penamaannya, berbentuk 3D dan memiliki 8 nodal di setiap ujungnya. Elemen tersebut memiliki 3 *degree of freedom* (DOF) yaitu translasi arah x, y, serta z. DOF merupakan variabel fundamental yang akan dihitung pada saat analisa berlangsung. Pada analisisnya, elemen C3D8R menggunakan interpolasi

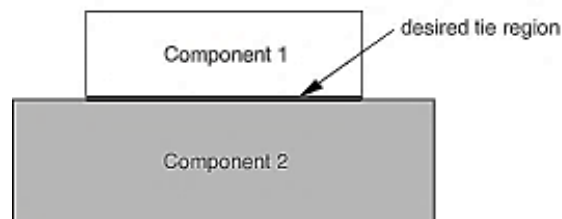
linier yang mengacu pada masing-masing arah atau dapat disebut juga *first-order element* (Abaqus 6.10 *Analysis User's Manual*).

2.7.2 Kontak antar Elemen

Penggabungan dua elemen atau lebih pada program Abaqus dilakukan dengan salah satunya adalah mendefinisikan jenis kontak yang terjadi pada permukaan elemen-elemen yang akan digabungkan tersebut. Beberapa jenis kontak permukaan dapat dimodelkan dengan Abaqus, beberapa diantaranya adalah jenis *tie constraint* dan *surface to surface interaction*.

1. *Tie constraint*

Tie constraint merupakan suatu fungsi pada program abaqus yang dapat mengikat dua permukaan elemen secara bersamaan selama proses analisa berlangsung. *Tie constraint* yang diberikan pada suatu permukaan elemen dapat digunakan untuk membuat gerakan translasi serta rotasi DOF pada sepasang permukaan bernilai sama. Secara umum, elemen nodal pada abaqus hanya akan terikat (*tied*) apabila letaknya dekat antara satu dengan lainnya. Dalam pemodelannya dari kedua permukaan tersebut, salah satunya akan ditetapkan sebagai *slave surface*, sedangkan lainnya akan *menjadi master surface* seperti pada Gambar 2.19. Dalam gambar tersebut, permukaan pada komponen 2 yang ditetapkan sebagai *master surface* akan diikatkan menggunakan *tie constraint* dengan elemen eksternal yaitu permukaan dari komponen 1 (Abaqus 6.10 *Analysis User's Manual*).



Gambar 2. 19 Dua komponen yang digabungkan dengan tie constraint (Abaqus 6.10 *Analysis User's Manual*).

2. *Surface to Surface*

Surface to surface contact, atau kontak antar permukaan merupakan salah satu tipe interaksi alternatif yang ada pada program Abaqus. Interaksi

ini menggambarkan kontak yang terjadi di antara dua permukaan yang dapat berdeformasi atau antara permukaan yang dapat berdeformasi dengan permukaan yang kaku. Interaksi jenis *surface to surface* dapat digunakan pada model geometri yang kompleks, serta mengandung banyak interaksi didalamnya. Pada interaksi ini, variabel yang mengontrol algoritma pemodelan dapat disesuaikan sehingga dapat dihasilkan solusi yang sesuai dengan pemodelan yang diinginkan (Abaqus 6.10 *Analysis User's Manual*).

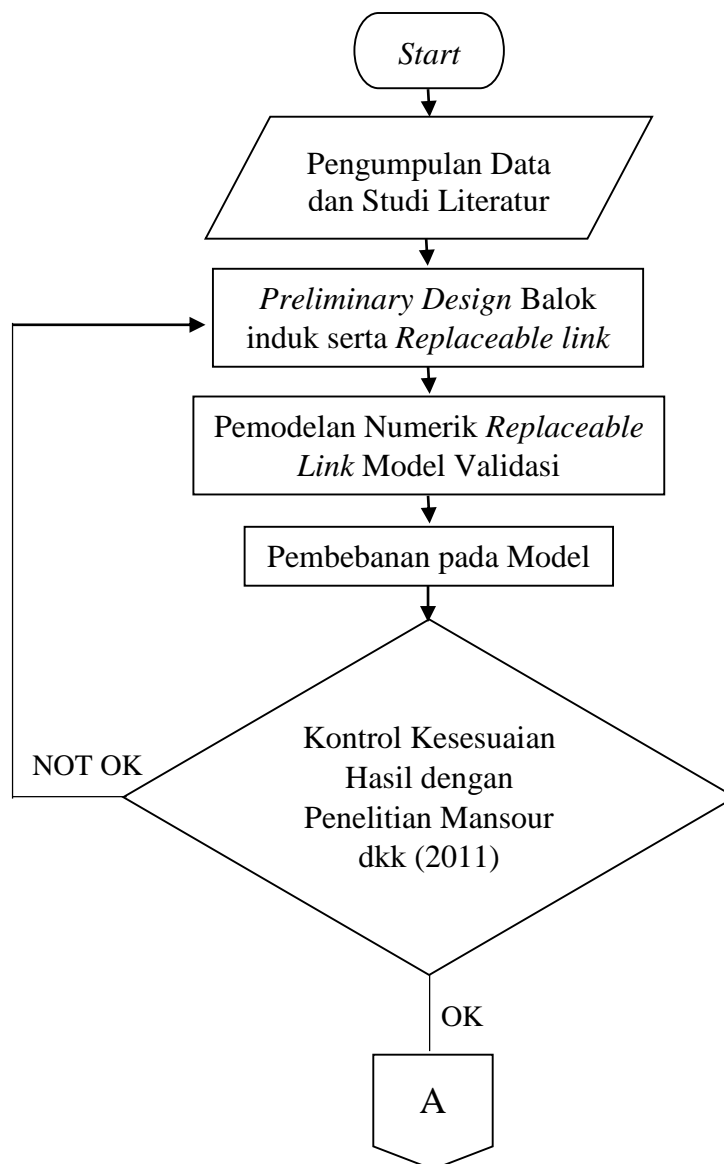
Salah satu variabel yang dapat didefinisikan dari interaksi *surface to surface* adalah gesekan antar permukaan (*friction*). Ketika dua buah permukaan bersentuhan, keduanya akan mentransmisikan gaya geser serta gaya normal pada bidang kontak. Secara umum, hubungan antar kedua permukaan ini disebut gesekan antara bidang kontak yang biasanya dinyatakan dalam bentuk tekanan antar permukaan kontak (Abaqus 6.10 *Analysis User's Manual*).

BAB 3

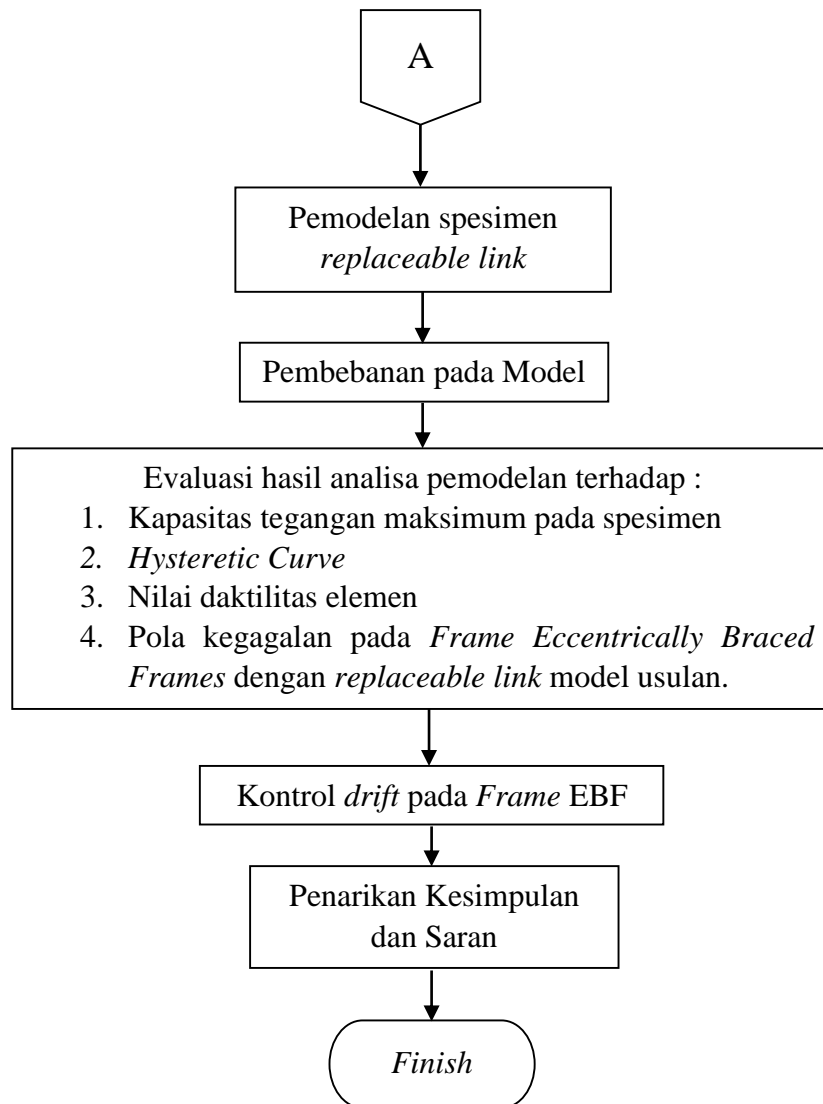
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir dari penelitian yang akan dilakukan. Diagram ini merepresentasikan proses penelitian yang dimulai dari studi literatur hingga menyimpulkan hasil dari studi yang telah dilaksanakan.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi



Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi

3.2 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperdalam pemahaman terhadap materi yang diangkat sebagai topik penelitian. Beberapa sumber dipelajari baik dari jurnal penelitian terdahulu, eksperimental maupun permodelan, *proceeding*, maupun buku sehingga acuan tersebut dapat dijadikan pedoman dalam melakukan penelitian. Acuan literatur yang dimiliki dapat mendukung keabsahan dari penelitian yang akan dilaksanakan. Beberapa peraturan digunakan sebagai literatur dalam studi ini. Dari beberapa literatur diantaranya :

1. ANSI/AISC 360-16 *Specification for Structural Steel Buildings*
2. ANSI/AISC 341-16 *Seismic Provisions for Structural Buildings*
3. SNI 1729:2015 Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural
4. SNI 1726:2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.

3.3 Preliminary Design *Replaceable Link* Utama

Pemodelan dilakukan dengan merancang serta menentukan dimensi untuk elemen balok induk, profil *C-channel*, serta baut yang akan digunakan dengan program bantu Abaqus 6.14. Model yang direncanakan mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Mansour dkk (2011) yang mengacu pada spesimen UT-1B. Spesimen tersebut akan diberikan kode WBRV yang kemudian akan dijadikan dasar untuk pemodelan lainnya.

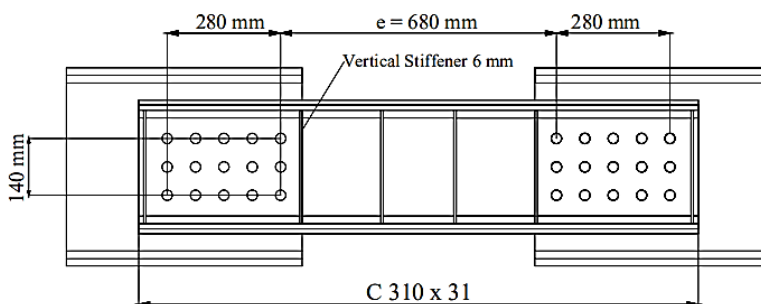
Spesimen ini merupakan elemen *replaceable link* yang disusun dari dua buah profil C310 x 31 yang disusun secara bersinggungan dengan mengapit balok induk yang terbuat dari baja dengan profil WF seperti pada Gambar 3.2. Balok induk didesain agar *replaceable link* dengan ukuran yang telah ditentukan mampu dipasang pada sisi balok induk tersebut. Kedua ujung dari *link* disambung dengan tipe sambungan tumpu menggunakan baut A490. Sedangkan material dari baja yang digunakan sesuai dengan yang dicantumkan pada jurnal, yaitu menggunakan CSA G40.21 44W/300W. Material tersebut merupakan material baja yang sesuai dengan Canadian Standards Association (CSA), dimana material tersebut sering digunakan pada bangunan konstruksi. Material properties dari CSA G40.21-44W/300W adalah sebagai berikut:

CSA G40.21-44W/300W

Tensile Strength : 65 – 85 ksi

Yield Strength : 44 ksi min

Elongation : 20% min in 8"; 23% min in 2"



Gambar 3. 2 *Preliminary design* spesimen WBRL1

3.4 Pemodelan Numerik *Replaceable Link* Model Validasi

Pemodelan secara numerik dilakukan dengan bantuan program Abaqus 6.14. Pemodelan yang dibuat sesuai dengan *preliminary design* yang telah ditentukan. Pemodelan secara numerik dilakukan untuk mengetahui apakah desain yang telah dilakukan seperti material yang digunakan, *boundary condition*, serta interaksi yang dipilih telah sesuai dengan hasil eksperimen sehingga mampu menunjukkan hasil yang serupa dengan eksperimen. Tahapan pemodelan numerik yang dilakukan meliputi:

1. Pemodelan Geometri *Replaceable Link*

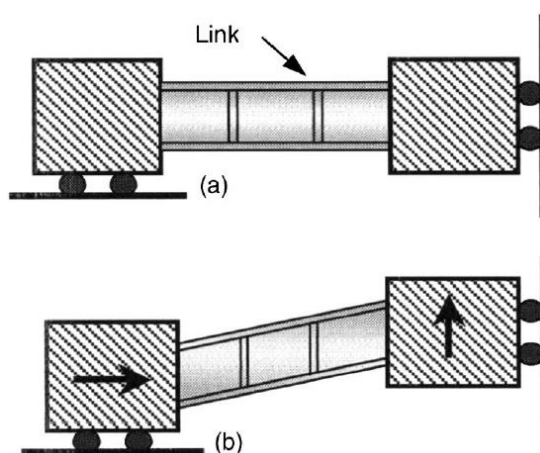
Penelitian ini akan meninjau balok *link* jenis *shear link* yang dari penelitian sebelumnya diperoleh bahwa *link* dengan kategori *shear link* mampu mendisipasi energi lebih baik bila dibanding dengan *flexure link*. *Link* dimodelkan memiliki panjang (e) yaitu sepanjang 680 mm. Panjang tersebut dihitung dari jarak antar baut terdalam di kedua ujung *link*. Model tersebut sesuai dengan studi eksperimental oleh Mansour dkk (2011).

2. *Material Properties*

Material yang digunakan dalam studi ini ialah bahan baja dengan nilai berat jenis 7850 kg/m^3 , *modulus young* sebesar 200000 N/mm^2 dan memiliki nilai *poisson ratio* sebesar 0.3. Sedangkan mutu baja yang digunakan sesuai dengan yang digunakan pada eksperimen yaitu CSA G40.21-44W/300W.

3. *Boundary condition*

Pemberian *boundary condition* mengacu pada penelitian oleh Richard dan Uang (2005). Pada penelitian sebelumnya, *boundary condition* diletakkan dikedua ujung *link* dengan pembatasan rotasi diberikan dikedua ujungnya. Beban berupa perpindahan arah Y diberikan pada sisi kanan, sedangkan nodal pada sisi kiri dibatasi hanya dapat bergerak secara horizontal. Dengan model tersebut diharapkan gaya geser dapat terdistribusi merata di sepanjang *link*. Ilustrasi dari *boundary condition* seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 *Boundary condition* pada pemodelan *link*
(Richard dan Uang,2005)

4. Pembebanan pada Spesimen

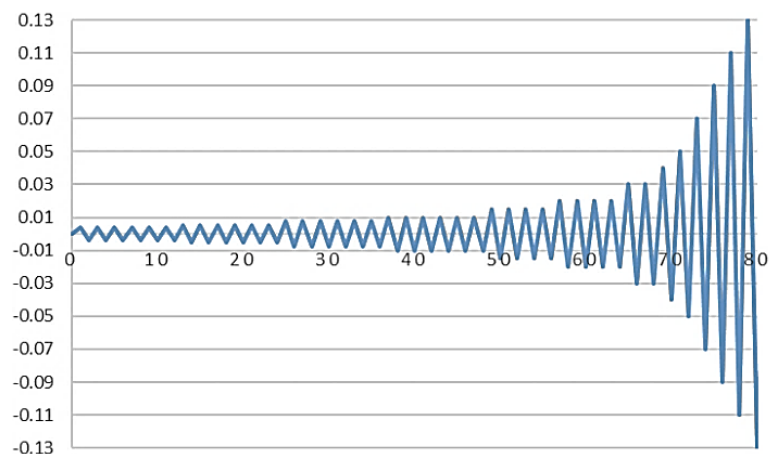
Pembebanan yang diberikan pada spesimen mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Mansour dkk (2011) yaitu menggunakan kuasi statis beban siklik yang sesuai dengan persyaratan pada AISC 2005 seperti yang terdefiniskan pada Tabel 3.1 dan diilustrasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.4. Pembebanan dilakukan dengan *displacement control method*. Beban diberikan secara horizontal pada ujung kanan spesimen uji seperti pada *boundary condition* yang digunakan serta sesuai dengan nilai *amplitude* yang disyaratkan. Pada penelitian ini, beban yang diberikan pada spesimen dimulai pada rotasi *link* 0.0075 seperti yang dilakukan oleh Tan dkk, (2014) dengan asumsi agar analisa yang dilakukan lebih efisien dari segi waktu pada saat pemodelan dengan Abaqus.

Tabel 3. 1 Loading Protocol

<i>Peak link rotation angle</i> (γ)	<i>Number of cycles</i>
0.00375	6
0.005	6
0.0075	6
0.01	6
0.015	4
0.02	4
0.03	2
0.04	1
0.05	1
0.07	1
0.09	1

*dilanjutkan dengan increment sebesar 0.02 sampai spesimen mengalami kegagalan

*Sumber: AISC 2005 Appendix S6.3



Gambar 3. 4 Grafik pembebanan siklik
(AISC seismic provision, 2005)

5. Interaksi

Pada pemodelan, model interaksi antar elemen jenis *surface to surface interaction* tipe *hard contact* dengan koefisien geser untuk tipe permukaan kasar sebesar 0.42 diberikan pada kontak permukaan antara balok induk dengan *link*, *bolt shank* dengan *hole shank*, dan permukaan kepala baut bagian dalam dengan permukaan *link*. Sedangkan interaksi tipe *tie constraint* diberikan pada permukaan kontak antara *stiffeners* dengan *link* dan antara balok *link* dengan *web-connection plate*. *Tie constraint* digunakan pada kontak yang bersifat seperti sambungan las.

6. Model Meshing

Pemodelan secara numerik yang dilakukan dengan bantuan program Abaqus memodelkan spesimen dengan menggunakan tipe elemen C3D8R. Model meshing digunakan untuk *plotting* hasil analisa berupa ilustrasi tegangan serta *displacement* yang terjadi pada elemen *link*.

Parameter pemodelan Abaqus yang digunakan pada pengujian spesimen tertulis pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Parameter Pemodelan Abaqus

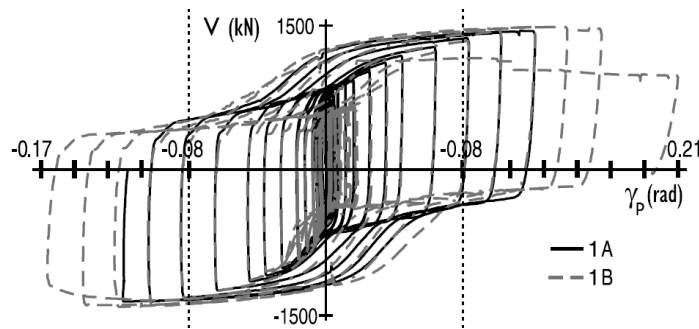
Geometri Pemodelan Abaqus	
Elemen	: <i>Brick</i>
Modeling Type	: <i>3D deformable</i>
Tipe Elemen	: C3D8R
Material Model	: <i>Bilinear</i> elasto-plastis
Berat Jenis	: 7850 kg/m ³
Modulus Young:	
<i>Normal Steel</i>	: 200000 N/mm
<i>Low yield steel</i>	: 206000 N/mm
Poisson Ratio	: 0.3
Mesh Size	: 40 mm
Pembebanan:	
Pembebanan	: <i>Displacement control</i> berdasarkan AISC 2005
Jumlah Siklus Pembebanan	: 52 siklus
Boundary Condition Type	: <i>Displacement and Rotation</i>
Interaction	
Jenis interaksi	: <i>Surface to Surface</i>
Friction Formulation	: <i>Pinalty</i>
Friction Coefficient	: 0.42 (<i>Hard contact</i>)
Constraint	: <i>Tie Constraint</i>

3.5 Kontrol Kesesuaian Hasil dengan Penelitian Mansour dkk (2011)

Kontrol pada pemodelan dilakukan dengan membandingkan hasil pemodelan numerik terhadap hasil penelitian sebelumnya yang serupa dengan hasil studi eksperimen oleh Mansour dkk (2011). Mansour melakukan eksperimen untuk memvalidasi perilaku *replaceable shear link* apabila dikenai oleh beban siklik. Mansour melakukan pengujian terhadap tiga jenis *link* yaitu *end-plate bolted replaceable link*, *web bolted connection replaceable link*, dan *welded web*

replaceable link. Pengujian tersebut menunjukkan bahwa rotasi plastis pada seluruh benda uji dapat memenuhi persyaratan yaitu tidak terjadi fraktur ketika rotasi dibawah 0.08 rad. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Hasil penelitian oleh Mansour dkk (2011) menampilkan kurva histeresis spesimen UT-1B seperti pada Gambar 3.5. *Pinching effect* terlihat pada kurva dimana hal tersebut terjadi yang diakibatkan oleh lelehnya lubang baut sehingga terjadi *ovalization* pada daerah tersebut. Spesimen UT-1B terlihat mampu menahan gaya geser sebesar 1478 kN dengan rotasi yang dihasilkan sebesar 0.166. Kegagalan yang terjadi terlihat pada Gambar 3.6 dimana sobekan terjadi pada bagian bidang geser *link*.



Gambar 3. 5 Kurva hysteresis spesimen UT-1B (Mansour dkk, 2011)

Tabel 3. 3 Hasil Eksperimental pemodelan *Replaceable Link* oleh Mansour dkk (2011)

Group	Specimen	γ_p	Frame Drift (Percentage)			Link Shear (kN)		Failure Mechanism
			θ	θ_p	Γ_{conn}	V_{max}	V_{max}/V_n	
End-Plate Connection	UT-3A	0.104	N/A	N/A	None	1274	1.39	Failure of web initiating at weld access hole
	UT-3B	0.105	N/A	N/A	None	1279	1.4	Failure of web initiating at weld access hole
	EPM-11A	0.095	1.52	1.12	None	1120	N/A ^b	Fracture of top flange near weld
	EPM-11B	0.112	1.71	1.4	None	1170	N/A ^b	Fracture of top flange near weld
Bolted Web	UT-1A	0.125	N/A	N/A	0.18	1438	1.48	Cracks in <i>link</i> web at intermediate <i>stiffeners</i> ; test terminated before <i>link</i> fracture
	UT-1B	0.166	N/A	N/A	0.27	1478	1.52	Fracture of web at <i>stiffeners</i> weld
	UT-2A	0.066	N/A	N/A	0.6	1132	1.21	Fracture of <i>link</i> at web connection
	UT-2B	0.102	N/A	N/A	N/A ^a	1311	1.4	Exceed test setup deformation limits
	EPM-12	0.106	1.32	1.12	0.04	916	1.58	Fracture of web at <i>stiffeners</i> weld
	EPM-13	0.104	1.18	0.85	0.09	979	1.68	Fracture of <i>link</i> at web at <i>stiffeners</i> weld
	EPM-14	0.103	1.37	1.06	0.05	1108	N/A ^c	Fracture of web at <i>stiffeners</i> weld
	EPM-16	0.125	1.54	1.31	0.17	890	1.53	Fracture of web at <i>stiffeners</i> weld
Welded web connection	EPM-15	0.087	N/A	N/A	None	855	1.47	Fracture of web at <i>stiffeners</i> weld

^a Shear rotation data acquisition was stopped prior to test end.

^b No coupon results.

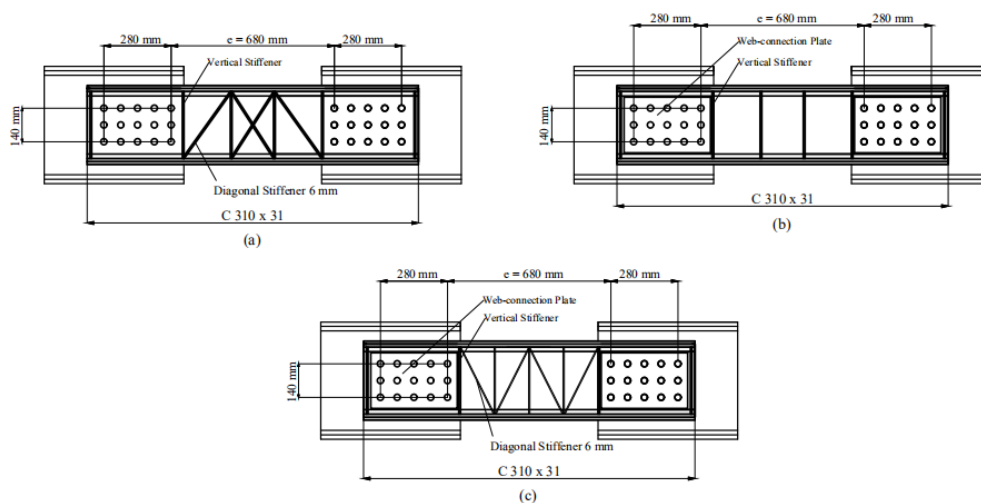
^c Shear force transferred in *link* and slab.



Gambar 3. 6 Sobeknya bidang geser pada *link* akibat pembebanan siklik (Mansour dkk, 2011)

3.6 Pemodelan *Replaceable Link* dengan Modifikasi

Pemodelan yang serupa dengan sub bab 3.3 dan 3.4 dilakukan untuk membuat spesimen berbeda dengan beberapa tambahan dan serta modifikasi. Spesimen yang dimodelkan dibagi atas dua jenis, yaitu spesimen dengan berbagai mutu baja dan spesimen dengan modifikasi. Spesimen jenis pertama yaitu memodelkan *link* dengan lima jenis mutu baja yaitu BJ37, BJ41, LYS100, LYS160, dan LYS225. Dari jenis pertama akan diketahui bagaimana respon, baik dilihat dari kurva histeresis dan rotasi dari masing-masing spesimen *link*. Spesimen jenis kedua yang dimodelkan dapat dilihat pada Gambar 3.8. Pemodelan numerik yang dilakukan memiliki langkah yang sama dengan pemodelan model validasi.



Gambar 3. 7 Modifikasi elemen *replaceable link*: a. WBRL2 b. WBRL3 c. WBRL4

Spesimen WBRL2 diberikan variasi penambahan *diagonal stiffeners* pada bidang geser. Penambahan *diagonal stiffeners* diharapkan mampu meningkatkan kemampuan *link* dalam mendisipasi gaya geser. Sedangkan pada WBRL3 penambahan plat pengaku pada sambungan diberikan untuk mengurangi terjadinya kegagalan akibat pelelehan yang terjadi pada bagian sambungan. Sedangkan spesimen WBRL4 merupakan kombinasi dari kedua spesimen yang dijelaskan sebelumnya.

Spesifikasi material yang digunakan, khususnya untuk BJ 37 dan BJ 41 yang digunakan untuk material balok *link*, sesuai dengan spesifikasi yang diberikan oleh SNI 03-1729-2002 seperti yang tertulis pada Tabel 3.4. Material yang digunakan pada balok *link* sama dengan yang digunakan pada *stiffeners* dan plat pengaku pada sambungan untuk spesimen WBRL3 dan WBRL4.

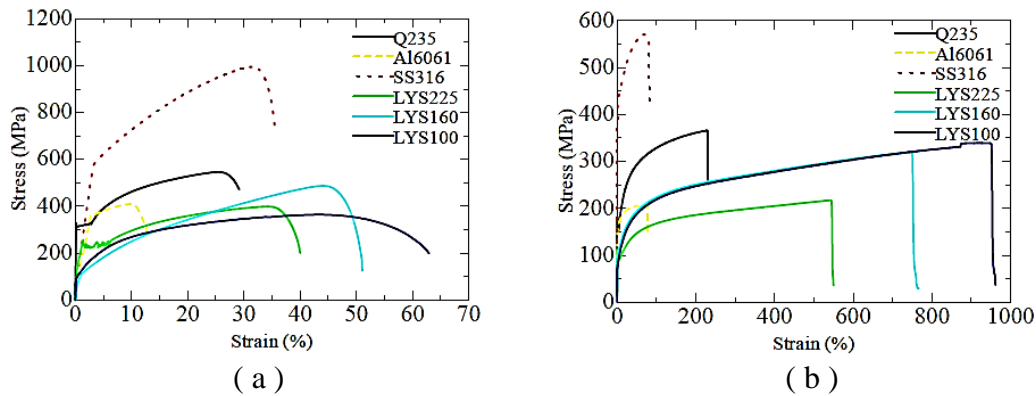
Tabel 3. 4. Sifat Mekanis Baja Struktural

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)	Peregangan Minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

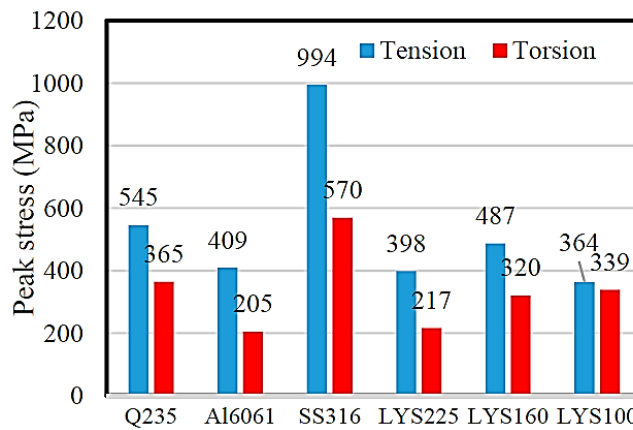
Sedangkan untuk spesimen yang menggunakan *low yield point steel*, material yang digunakan mengacu pada kurva tegangan serta regangan hasil eksperimental oleh Zhang dkk, (2016). Eksperimen tersebut menunjukkan nilai tegangan serta regangan pada LYS100, LYS160, serta LYS225 akibat dilakukannya uji tarik pada material seperti pada Gambar 3.8 dan 3.9. Nilai tegangan hasil pengujian akan dituliskan pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5. Sifat Mekanis *Low yield point Steel*

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)	Peregangan Minimum (%)
LYS100	364	97.58	43.7
LYS160	487	148	44.5
LYS225	389	235.75	35.4



Gambar 3. 8 Kurva tegangan dan regangan dibawah beban monotonik pada (a) Tesion Test; (b) Torsion test (Zhang dkk, 2016)



Gambar 3. 9 Perbandingan tegangan puncak hasil *tension test*

3.7 Evaluasi hasil analisa pemodelan

Hasil dari berbagai variasi model usulan dilakukan perbandingan terhadap kapasitas *replaceable link*, hysteretic curve *replaceable link*, daktilitas, serta *failure mode* dari EBF dengan *Replaceable link*.

1. Kapasitas *Replaceable link*

Kapasaitas *Replaceable link* merupakan kemampuan struktur dalam menerima beban setelah dilakukan pembebanan siklik pada spesimen mulai dari pemberian beban pertama, ketika stuktur mengalami pelelehan, hingga struktur mencapai kondisi *ultimate*.

2. *Hysteretic Curve* dari *Replaceable Link*

Merupakan hasil analisa yang ditampilkan dalam kurva gaya geser-rotasi. *Hysteretic curve* menampilkan data yang diperoleh selama proses pengaplikasian beban, khususnya berupa beban siklik berlangsung.

3. Daktilitas

Daktilitas merupakan hubungan antara simpangan pada saat elemen mengalami kondisi *ultimate* dengan simpangan leleh awal elemen.

4. *Failure Mode*

Replaceable link akan mengalami deformasi selama pembebanan berlangsung. Deformasi yang terjadi berubah-ubah sesuai dengan besarnya beban yang diberikan. Pada proses ini dilakukan pencatatan nilai pembebanan yang diberikan hingga elemen mengalami kegagalan sehingga dapat dilakukan perencanaan elemen *replaceable link* yang terbaik.

3.8 Kontrol terhadap *drift*

Hasil pemodelan kemudian dipasangkan pada sebuah *Frame* dengan berbagai variasi ukuran span. Dari rotasi *link* yang didapatkan dari pemodelan kemudian dicari nilai *drift* ketika diaplikasikan pada *Frame*. Hasil dari pemodelan haruslah memenuhi persyaratan yaitu simpangan yang terjadi harus kurang dari 2% dari tinggi *Frame*.

3.9 Kesimpulan dan saran

Hasil penelitian yang berupa hasil analisis data dibuat kesimpulannya untuk menjawab permasalahan dari penelitian yang tercantum di Bab 1. Kesimpulan serta saran diperoleh dari analisa terhadap kurva histeresis, hasil rotasi, serta *drift* pada *Frame* akibat pembebanan spesimen *link*.

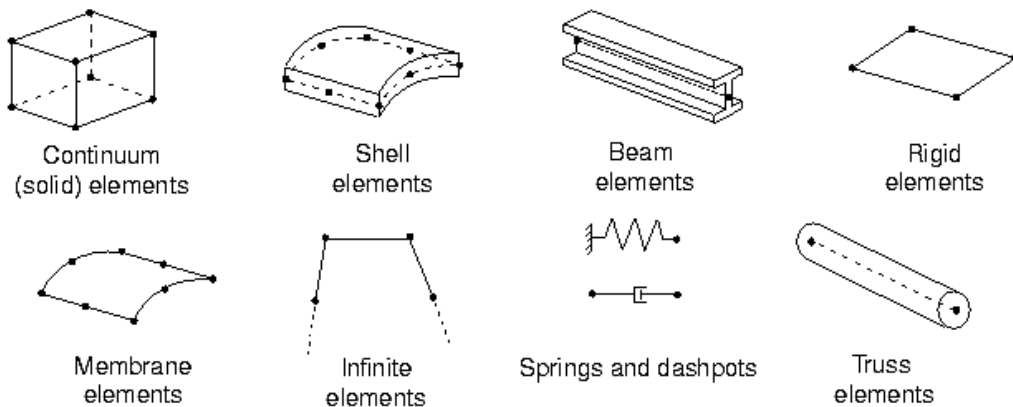
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Spesimen Penyusun Elemen

Spesimen berupa balok *link* yang terdiri dari balok *C-channel steel* yang dibuat pada balok induk diadaptasi dari penelitian Mansour dkk (2010,2011). Spesimen dibuat menggunakan *software* Abaqus 6.14 yang dimodelkan sebagai *continuum (solid)* element yang diilustrasikan seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Tipe-tipe elemen pada Abaqus 6.14

Continuum (solid) elements merupakan elemen standar yang digunakan pada program Abaqus. Elemen dari *family continuum* memiliki 8 nodal dan masing-masing nodal memiliki tiga degree of freedom (DOF) yaitu u_1 , u_2 , serta u_3 . Elemen ini secara geometri mudah untuk diaplikasikan dan banyak digunakan secara umum. Elemen *solid* tipe C3D8R (Continuum 3D 8 Nodes Reduced) dipilih untuk memodelkan spesimen *replaceable link* pada program pemodelan Abaqus. *Reduce integration elements* dipilih untuk meningkatkan efisiensi dalam menganalisa pemodelan tanpa mengurangi tingkat keakuratan hasil.

4.2 Model Spesimen

Spesimen *replaceable link* dimodelkan dengan menggabungkan elemen balok induk serta profil *C-channel* ataupun UNP sebagai balok *link* sehingga menjadi satu kesatuan. Berikut adalah perhitungan untuk menentukan panjang *link* yang digunakan pada pemodelan:

- Perencanaan panjang *link* (e) (SNI 03:1729:2002, Pasal 15.13.2)

$$\begin{aligned}
 f_y &= 250 \text{ N/mm}^2 & t_w &= 7.2 \text{ mm} \\
 H &= 305 \text{ mm} & t_f &= 12.7 \text{ mm} \\
 d &= 297.6 \text{ mm} & Z_x &= 954743.5 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_p &= Z_x f_y \\
 &= 954743.5 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2 \\
 &= 238685875 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_p &= 0.55 f_y (d - 2t_f) t_w \\
 &= 0.55 \times 250 \text{ N/mm}^2 (297.6 \text{ mm} - 2 \times 12.7 \text{ mm}) 7.2 \text{ mm} \\
 &= 553608 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{1.6 M_p}{V_p} \\
 &= \frac{1.6 \times 238685875 \text{ N/mm}}{553608 \text{ N}} \\
 &= 689.83 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Kontrol beban axial terfaktor (SNI 03:1729:2002, Pasal 15.13.2.5 dan Tabel 15.7-1)

- Sayap / *Flens*

$$\begin{aligned}
 \lambda &< \lambda_p \\
 \frac{b_f}{2xt_f} &< \frac{135}{\sqrt{f_y}} \\
 \frac{74}{2 \times 12.7} &< \frac{135}{\sqrt{250}} \\
 2.9 &< 8.54 \text{ (Termasuk penampang **Kompak**)}
 \end{aligned}$$

- Badan / *Web*

$$\begin{aligned}
 N_u &= 4058.06 \text{ N} \\
 N_y &= A_g \times f_y \\
 &= 3892.72 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2 \\
 &= 973180 \text{ N} \\
 \phi N_y &= 0.9 \times N_y \\
 &= 0.9 \times 973180 \text{ N} \\
 &= 875862 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\frac{N_u}{\phi N_y} < 0.125$$

$$\frac{4058.06 \text{ N}}{875862 \text{ N}} < 0.125$$

$$0.0046 < 0.125$$

Dikarenakan nilai $\frac{N_u}{\phi N_y} < 0.125$, maka:

$$\lambda < \lambda_p$$

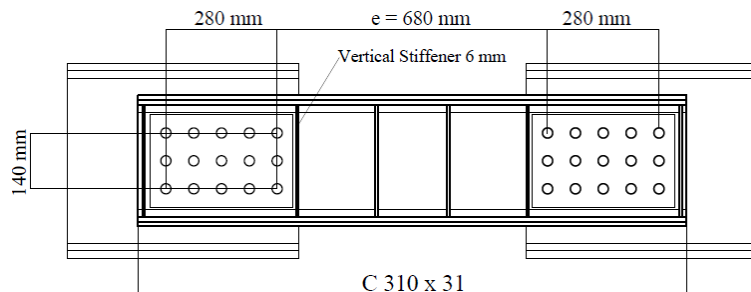
$$\frac{h}{t_w} < \frac{1365}{\sqrt{f_y}} \left(1 - 1.54 \frac{N_u}{\phi N_y}\right)$$

$$42.36 < \frac{1365}{\sqrt{250}} \left(1 - 1.54 \frac{4058.06 \text{ N}}{875862 \text{ N}}\right)$$

$$42.36 < 85.71 \text{ (Termasuk penampang **kompak**)}$$

Dari hasil tersebut didapatkan nilai 689.83 mm. Dari hasil tersebut dapat digunakan elemen *link* dengan panjang yang sama dengan pemodelan studi eksperimental oleh Mansour dkk (2011).

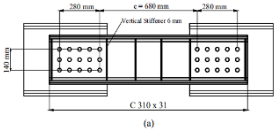
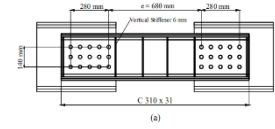
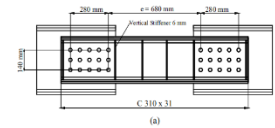
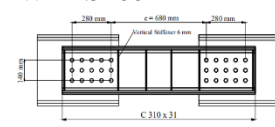
Untuk memvalidasi apakah spesimen yang dimodelkan telah sesuai dengan hasil eksperimental dalam segi pemberian *boundary condition*, pendefinisian interaksi, dan sebagainya, *link* yang sesuai dengan Mansour dimodelkan kembali dengan Abaqus kemudian dilakukan pengujian dan diamati hasilnya. *Link* diilustrasikan seperti pada Gambar 4.2. Material yang digunakan pada *link* disesuaikan dengan spesimen pengujian eksperimental, yaitu untuk profil C310x31 menggunakan CSA G40.21- 44W/300W yang memiliki f_y 300 MPa dan f_u 450 – 620 MPa, dan untuk elemen baut menggunakan A490. Elemen yang akan divalidasi akan diberikan penamaan WBLV.

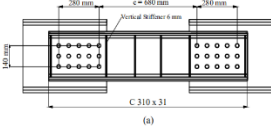
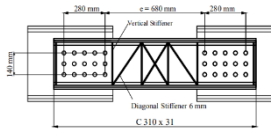
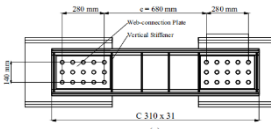
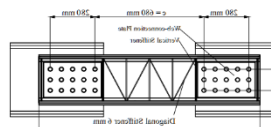


Gambar 4. 2 *Link* WBLV berdasarkan eksperimental Mansour dkk, 2011

Sedangkan untuk spesimen pengembangan dari pemodelan, dimensi dari elemen penyusun masing-masing spesimen akan dijabarkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Material Penyusun Elemen *Replaceable Link*

No	Nama Spesimen	Jenis Elemen	Material	f_y (MPa)	F_u (MPa)	Dimensi
1.	 <p>WBRL1</p>	Balok Induk	BJ 55	410	550	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	240	370	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	240	370	279.6x66.8x6 mm
		<i>Diagonal Stiffeners</i>	-	-	-	-
		<i>Web-connection plate</i>	-	-	-	-
		Baut	A490	896	1034-1172	25.4 mm
		2.	 <p>WBRL41</p>	Balok Induk	BJ 55	410
Balok <i>Link</i>	BJ 41			250	410	C310x31
<i>Stiffeners Web</i>	BJ 41			250	410	279.6x66.8x6 mm
<i>Diagonal Stiffeners</i>	-			-	-	-
<i>Web-connection plate</i>	-			-	-	-
Baut	A490			896	1034-1172	25.4 mm
3.	 <p>WLYS100</p>			Balok Induk	BJ 55	410
		Balok <i>Link</i>	LYS100	100	364	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	LYS100	100	364	279.6x66.8x6 mm
		<i>Diagonal Stiffeners</i>	-	-	-	-
		<i>Web-connection plate</i>	-	-	-	-
		Baut	A490	896	1034-1172	25.4 mm
		4.	 <p>WLYS160</p>	Balok Induk	BJ 55	410
Balok <i>Link</i>	LYS160			160	487	C310x31
<i>Stiffeners Web</i>	LYS160			160	487	279.6x66.8x6 mm
<i>Diagonal Stiffeners</i>	-			-	-	-
<i>Web-connection plate</i>	-			-	-	-
Baut	A490			896	1034-1172	25.4 mm

No	Nama Spesimen	Jenis Elemen	Material	fy (MPa)	Fu (MPa)	Dimensi
5	 <p>(a)</p>	Balok Induk	BJ 55	410	550	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	LYS225	225	398	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	LYS225	225	398	279.6x66.8x6 mm
		<i>Diagonal Stiffeners</i>	-	-	-	-
		<i>Web-connection plate</i>	-	-	-	-
6.	 <p>(b)</p>	Balok Induk	BJ 55	410	550	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	240	370	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	240	370	279.6x66.8x6 mm
		<i>Diagonal Stiffeners</i>	BJ 37	240	370	66.8 x 4 mm
		<i>Web-connection plate</i>	-	-	-	-
7.	 <p>(c)</p>	Balok Induk	BJ 55	410	550	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	240	370	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	240	370	279.6x66.8x6 mm
		<i>Diagonal Stiffeners</i>	-	-	-	-
		<i>Web-connection plate</i>	BJ 37	240	370	384 x 230 x 6 mm
8.	 <p>(b)</p>	Balok Induk	BJ 55	410	550	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	240	370	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	240	370	279.6x66.8x6 mm
		<i>Diagonal Stiffeners</i>	BJ 37	240	370	66.8 x 4 mm
		<i>Web-connection plate</i>	BJ 37	240	370	384 x 230 x 6 mm
		Baut	A490	896	1034-1172	25.4 mm

*Keterangan:

WBMV^a

WBRL^{b1c}

WBRL41^d

WLYS^{e100f}

Dengan:

^a = *Web bolted model validation*

^b = *Web bolted replaceable link*

^c = Nomor spesimen uji, dengan spesifikasi:

a. Nomor 1 untuk spesimen dengan model yang sama dengan spesimen validasi, namun menggunakan mutu BJ37.

b. Nomor 2 untuk spesimen seperti model WBRL1 namun dengan penambahan *diagonal stiffeners*.

c. Nomor 3 untuk spesimen seperti model WBRL1 namun dengan penambahan *web connection plate*.

d. Nomor 4 untuk spesimen seperti model WBRL1 namun dengan penambahan *diagonal stiffeners* dan *web connection plate*.

^d = *Web bolted replaceable link* yang menggunakan material BJ41.

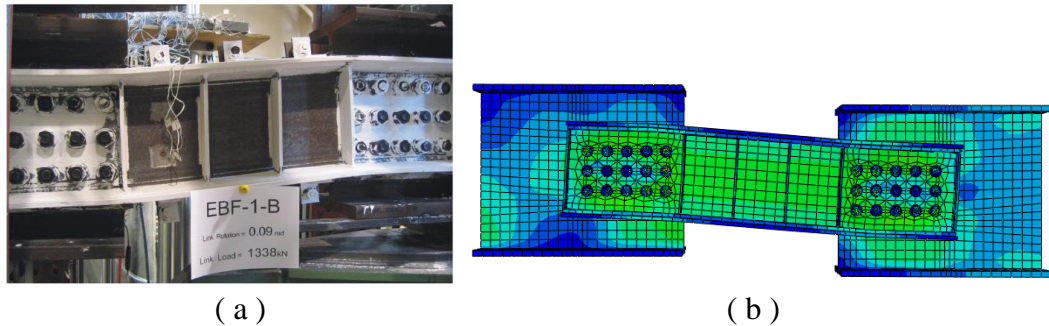
^e = *Web bolted low yield steel (LYS)*

^f = *Mutu low yield point steel (LYS)* yang digunakan dalam satuan MPa

4.3 Validasi Hasil Studi Eksperimen dengan Analisa Numerik

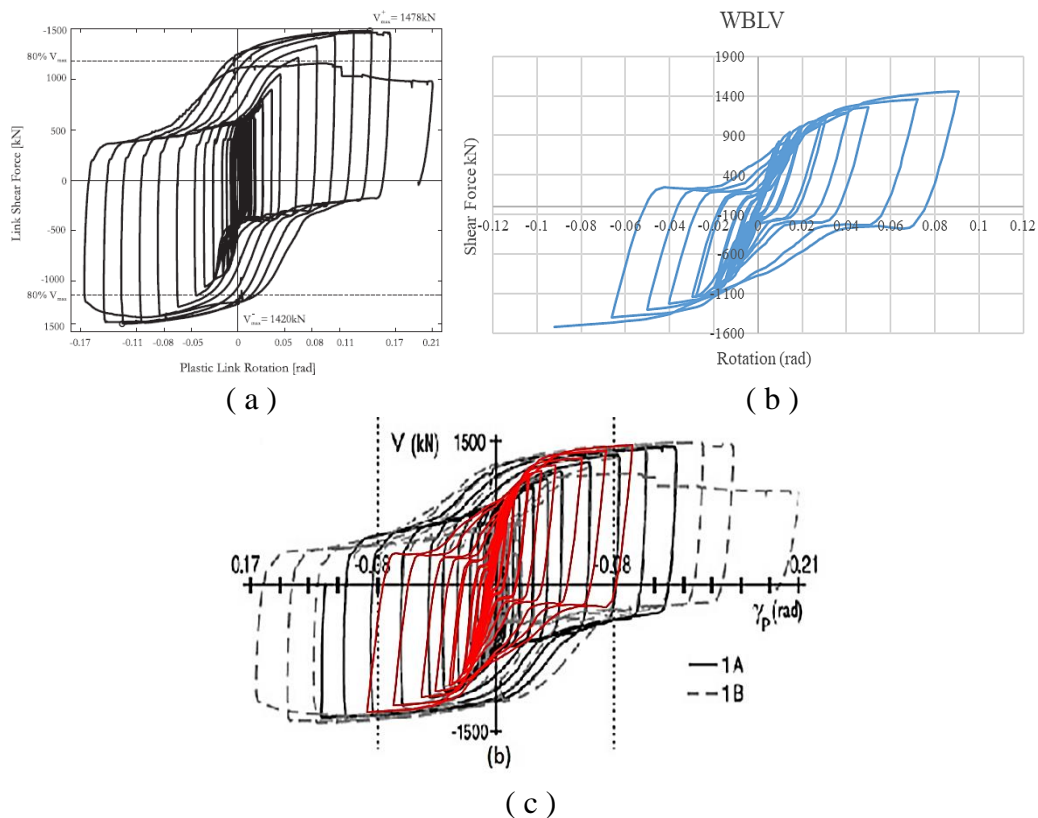
Hasil pengujian pesimen WBMV berupa grafik hysteresis, gaya geser yang dihasilkan, serta deformasi yang dialami spesimen digunakan sebagai dasar pembandingan analisa. Gambar 4.3 (a) dan (b) merupakan hasil pengujian ketika elemen diberikan beban rotasi sebesar 0.09 rad. Pemodelan menunjukkan hasil yang serupa dengan hasil eksperimental. Bidang geser pada pengujian eksperimen spesimen UT-1B menunjukkan telah terjadi pelelehan yang ditunjukkan terjadinya pengelupasan cat pada elemen yang terjadi pada web *link*. Sedangkan pada hasil pemodelan, bidang geser pada *link* menunjukkan pelelehan yang ditandai dengan

gradasi warna hijau, dimana warna hijau mewakili tegangan 387 – 464 MPa yang telah melampaui nilai tegangan lelehnya yang sebesar 300 MPa.



Gambar 4. 3 Failure mode pada rotasi 0.09 rad (a) hasil eksperimen; (b) hasil Abaqus

Perbandingan kurva hysteresis ditunjukkan pada Gambar 4.4 a dan b. Spesimen UT-1B mampu menghasilkan gaya geser sebesar 1420 kN pada saat rotasi *link* sebesar 0.09 rad.



Gambar 4. 4 Kurva hysteresis (a) UT-1B; (b) WBLV; (c) penggabungan keduanya

Sedangkan pada hasil pemodelan numerik menunjukkan pada rotasi sebesar 0.091 rad, spesimen mampu mendisipasi gaya geser sebesar 1435 kN.

Selisih dari perbandingan kedua spesimen mencapai 2.74%. sehingga berdasarkan hasil Abaqus, pemodelan dianggap valid sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk memodelkan pengembangan-pengembangan *replaceable link* lainnya.

4.4 Hasil Analisa Numerik Model Pengembangan

Hasil analisa numerik pada kedelapan spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.2. Hasil tersebut meliputi gaya geser serta rotasi yang dialami oleh *link*. Gaya geser yang terjadi pada *link* didapatkan dari hasil yang diilustrasikan oleh kurva *hysteresis*, sedangkan untuk rotasi diperoleh dari batasan *displacement* yang diberikan pada saat pembebanan pada program Abaqus. Contoh perhitungan total rotasi WBRL1 untuk spesimen yang terjadi adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_{shear} + \theta_{connection} \\ &= 0.087 \text{ rad} + 0.006 \text{ rad} \\ &= 0.093 \text{ rad} \end{aligned}$$

Tabel 4.2 Hasil Pemodelan Numerik Spesimen Uji

No	Spesimen	Shear Force (kN)	Shear rotation		Connection Rotation		Rotation γ (rad)
			γ_{shear} (rad)	a (mm)	b (mm)	γ_{conn} (rad)	
1	WBRL1	671.37	0.0870	17.28	2800	0.006	0.093
2	WBRL41	737.38	0.0940	10.59	2800	0.004	0.098
3	WLYS100	508.77	0.0976	13.37	2800	0.005	0.103
4	WLYS160	589.30	0.0915	9.24	2800	0.003	0.095
5	WLYS225	630.38	0.0920	12.94	2800	0.005	0.097
6	WBRL2	676.79	0.0920	9.97	2800	0.004	0.096
7	WBLR3	773.69	0.0884	6.72	2800	0.002	0.900
8	WBRL4	874.27	0.0859	7.28	2800	0.003	0.089

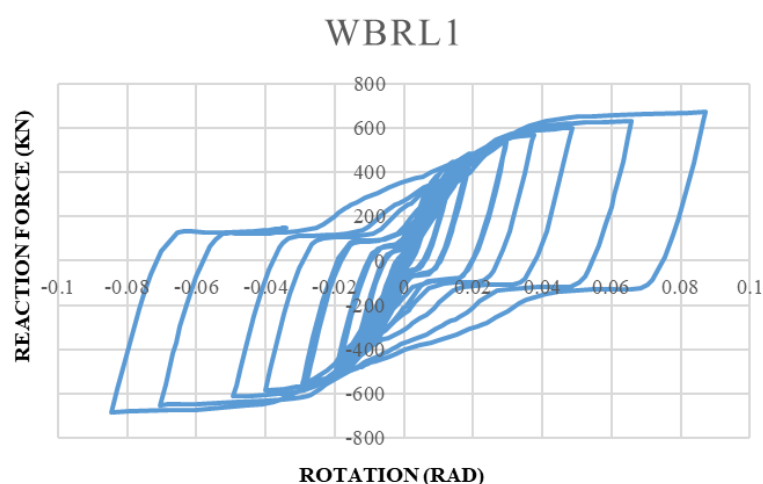
Penjelasan hasil dari masing-masing analisa numerik terdapat pada sub-bab selanjutnya.

4.4.1 Spesimen WBRL1

Penelitian yang dilakukan mengacu pada hasil penelitian serta eksperimen yang pernah dilakukan sebelumnya namun dengan beberapa penyesuaian serta perubahan. Spesimen WBRL1 mengadopsi hasil eksperimental spesimen UT-1B pada penelitian oleh Mansour dkk (2011) dengan perubahan yaitu jenis material baja yang digunakan. *Link* pada spesimen WBRL1 disusun menggunakan BJ37

dimana hal tersebut dilakukan dengan harapan elemen *link* mampu berperilaku secara inelastik ketika diberikan beban siklik.

Kurva histeresis yang didapatkan dari menggabungkan nilai *reaction force* (RF) dengan *displacement* diilustrasikan pada Gambar 4.2. Pada spesimen WBRL1, analisa menunjukkan *link* memiliki tegangan maksimum sebesar 671.371 kN pada saat rotasi *link* mencapai 0.093 rad. Hasil rotasi yang dicapai mampu melampaui persyaratan rotasi untuk *link* geser yaitu sebesar 0.08 rad. Pada kurva *hysteresis* yang dihasilkan, dapat diamati adanya *pinching effect* yang disebabkan oleh lelehnya daerah sambungan pada *link* sehingga terbentuknya *ovalization*.

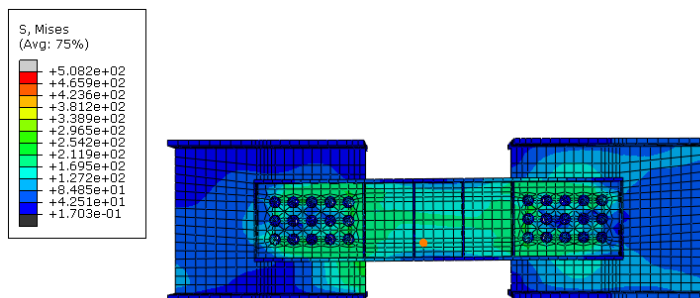


Gambar 4. 5 Kurva histeresis spesimen WBRL1

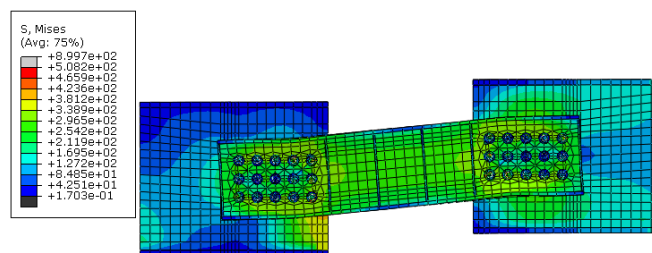
Hasil dari pembebanan siklik menunjukkan spesimen mengalami leleh pertama pada saat mengalami rotasi (γ) sebesar 0.0098 rad yaitu ketika tegangan di daerah sambungan yang mencapai 240 MPa. Kemudian, pelelehan terjadi merata di sepanjang bidang geser balok *link*. Hal tersebut ditandai dengan gradasi warna yang muncul pada Gambar 4.3. Kondisi tersebut sesuai dengan kaidah elemen *link* pada EBF yaitu akibat pembebanan *link* mengalami kondisi inelastis sedangkan elemen lain tetap dalam kondisi plastis.

Sedangkan Gambar 4.7 menunjukkan tegangan yang terjadi pada siklus ke-52 yaitu ketika spesimen mengalami *displacement* sebesar 72 mm. Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa kondisi *ultimate* terjadi pada beberapa bagian sambungan dimana pada bagian tersebut, elemen mampu mencapai tegangan sebesar f_u yaitu 370 MPa. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya *ovalized* pada bagian kontak

antara lubang baut dengan baut. *Ovalized* paling besar terjadi pada baut baris pertama di masing-masing ujung *link* dikarenakan panjang *link* pada *replaceable link* diukur dari jarak tersebut, sehingga bagian tersebut menahan geser paling besar. Perubahan bentuk lubang baut tersebut yang menyebabkan munculnya *pinching effect* pada kurva histeresis. Selain itu, dapat diamati pula terjadinya *buckling* pada *web stiffeners* akibat menahan gaya reaksi akibat pembebanan siklik.



Gambar 4. 6 Leleh pertama pada WBRL1



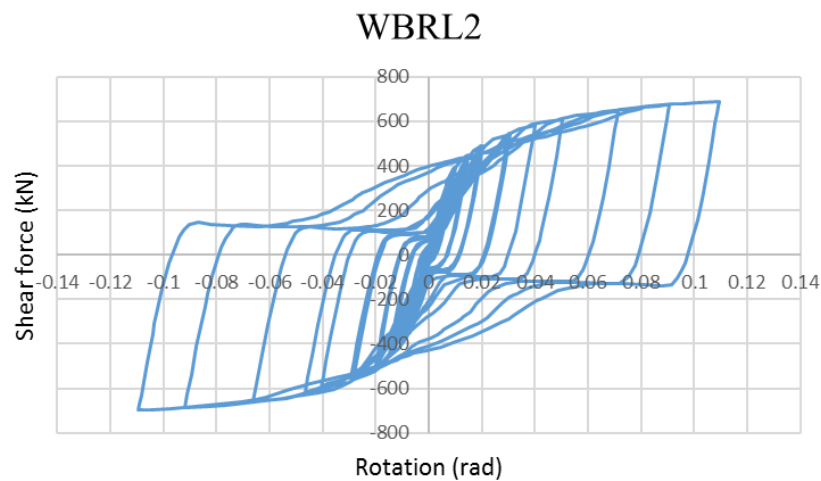
Gambar 4. 7 Siklus ke-52 pembebanan pada WBRL1

4.4.2 Spesimen WBRL2

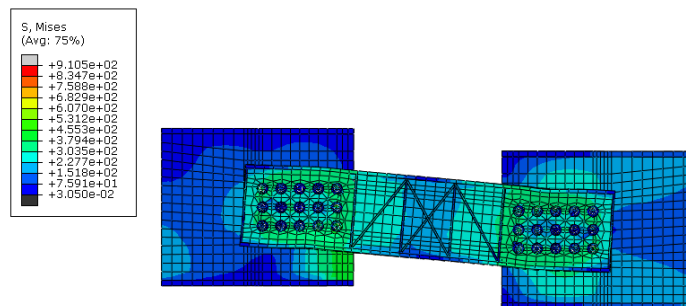
Spesimen WBRL2 dimodelkan berbeda dengan WBRL1. Pada WRL2, *diagonal stiffeners* diberikan pada bidang geser *web* dengan tujuan agar gaya geser yang lebih besar mampu didisipasi oleh *link*. Kurva histeresis hasil pemodelan dapat dilihat pada Gambar 4.8 Hasil analisa pada spesimen WRL2 menunjukkan bahwa *link* mampu menahan gaya geser sebesar 676.79 kN . Reaksi tersebut terjadi ketika *link* mengalami rotasi (γ) sebesar 0.096 rad. *Pinching effect* juga terjadi pada spesimen dikarenakan adanya *ovalized* pada bagian sambungan.

Leleh pertama pada WBRL2 terjadi pada saat *link* mengalami *displacement* sebesar 5 mm. Leleh pertama terjadi secara merata pada bagian sambungan spesimen WBRL2. Sedangkan kondisi *ultimate* terjadi pada saat spesimen mengalami *displacement* sebesar 17.14 mm. Pada saat terjadi siklus ke-54, bagian sambungan *web-bolted* mengalami tegangan antara 305 MPa hingga 370

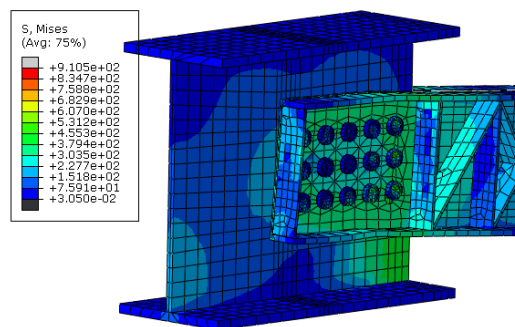
MPa, sedangkan pada bagian bidang geser tegangan yang terjadi sebesar 151 MPa hingga 305 MPa. Bidang geser dengan pengaku tipe “x” lebih mampu menahan geser dan pelelehan material apabila dibandingkan dengan bidang geser dengan satu jenis pengaku diagonal. Ilustrasi distribusi tegangan pada WBRL2 seperti yang tercantum pada Gambar 4.9. Selain itu pada siklus ke-52, dapat diamati terjadinya *flange buckling* pada kedua sisi spesimen akibat dari pembebanan.



Gambar 4. 8 Kurva hysteresis pemodelan WRL2



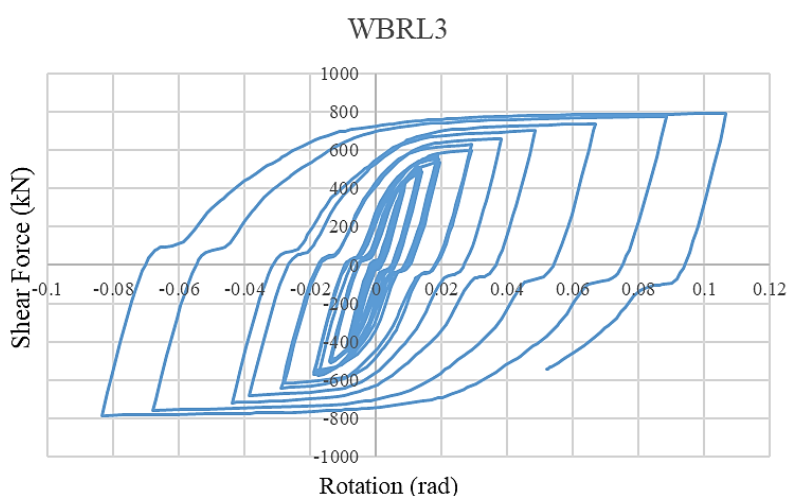
Gambar 4. 9 Tegangan WRL2 pada saat siklus ke-54



Gambar 4. 10. *Flange buckling* pada saat pembebanan siklus ke-54

4.4.3 Spesimen WBRL3

Pemodelan pada spesimen WBRL3 diberikan modifikasi dari WBRL1 berupa penambahan plat pengaku pada sambungan. Pemberian plat pengaku diharapkan mampu menahan sambungan *link* dari terjadinya pelelehan. Dari hasil pemodelan, didapatkan *link* mampu menahan gaya geser sebesar 773.69 kN pada saat terjadi rotasi (γ) sebesar 0.090 rad. Nilai rotasi tersebut mampu melampaui 0.08 rad seperti yang disyaratkan untuk jenis *link* geser. Hasil analisa numerik dapat dilihat pada Gambar 4.11.

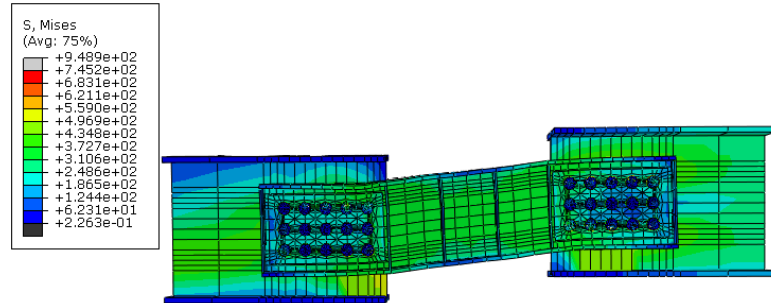


Gambar 4. 11 Kurva Histeresis hasil pemodelan WRL3

Sedangkan tegangan yang terjadi pada spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.12. Bidang geser pada *link* seluruhnya mengalami pelelehan secara merata. Tegangan pada bidang geser bernilai antara 310 MPa hingga 372 MPa. Sedangkan pada bagian sambungan, penambahan pengaku *web* mampu menahan permukaan kontak antara *bolt shank* dengan balok *link* untuk tidak mengalami *ovalized* sehingga terjadinya kegagalan pada bagian sambungan dapat diminimalisir. Plat pengaku juga mampu untuk menahan area sambungan dari terjadinya pelelehan. Disamping itu, dapat diamati pula terjadinya *flanges buckling* terjadi pada kedua ujung *link* yang disebabkan oleh pemberian beban siklik.

Namun dalam pemodelan, perlu dilakukan pemilihan balok induk dengan ketebalan yang sesuai, agar balok induk tetap dalam kondisi elastis. Balok induk pada spesimen WBRL3 mencapai kondisi plastis setelah diberi beban siklik hingga

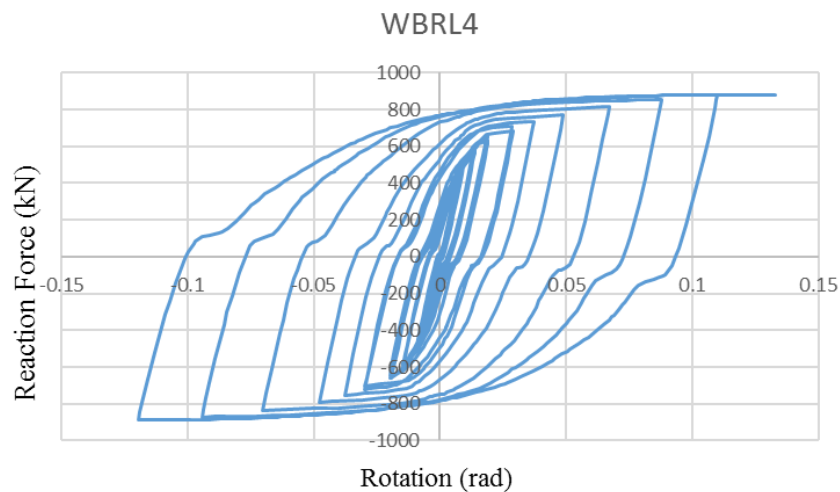
siklus ke-52 sehingga perencanaan elemen di luar balok *link* perlu dikaji lebih lanjut.



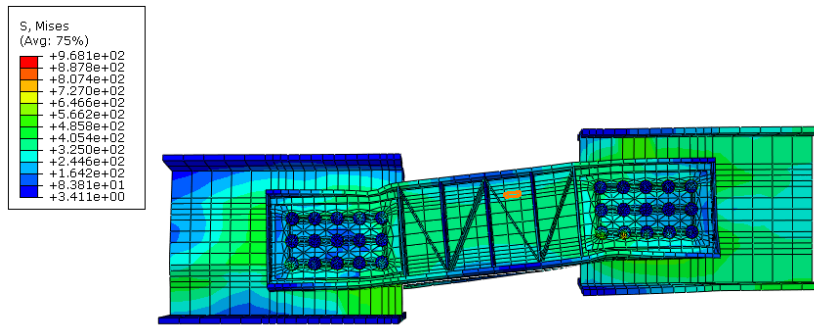
Gambar 4. 12 Tegangan yang terjadi pada WBRL3 saat siklus ke-53

4.4.4 Spesimen WBRL4

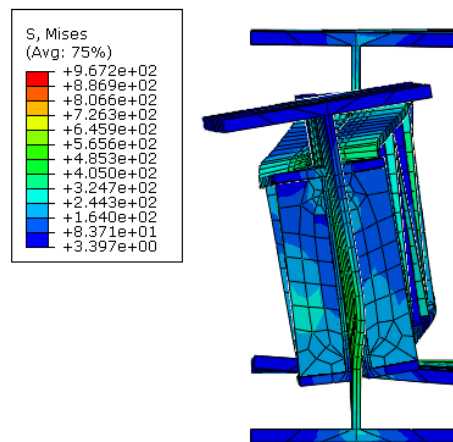
Spesimen WBRL4 dimodelkan dengan memberikan *diagonal stiffeners* dan plat pengaku sambungan pada *link* mengingat hasil pemodelan sebelumnya yaitu tegangan bernilai tinggi terletak pada sambungan. Hasil pemodelan ditunjukkan dalam kurva histeresis pada Gambar 4.13. Beban geser yang mampu ditahan oleh *link* adalah sebesar 874.48 kN pada saat *link* mengalami rotasi sebesar 0.089 rad. Persebaran tegangan pada spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.14. Sebagian bidang geser pada daerah sambungan telah mencapai tegangan 370 MPa, sedangkan lainnya telah mencapai kondisi leleh dengan tegangan 244 MPa hingga 370 MPa. Selain itu akibat pembebanan siklik, dapat diamati bahwa elemen balok induk mengalami *local buckling* ketika spesimen mengalami *displacement* sebesar 105 mm seperti pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 13 Kurva histeresis pemodelan WBRL4



Gambar 4. 14 Persebaran tegangan spesimen WBRL4



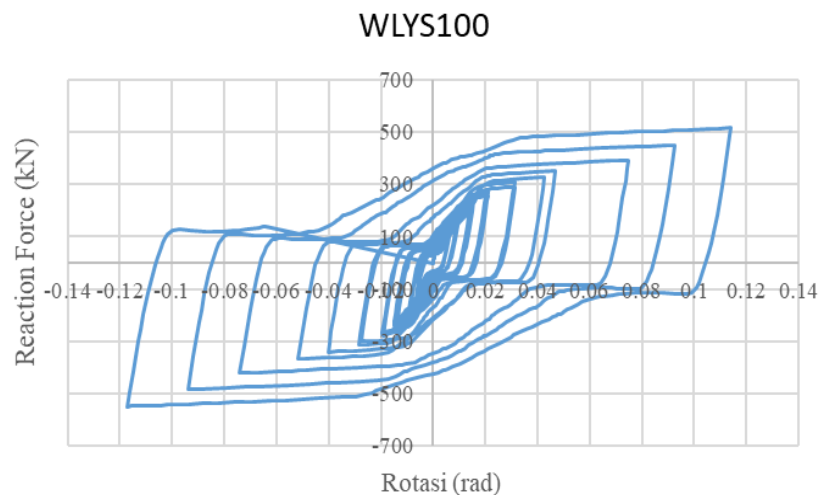
Gambar 4. 15 Local Buckling pada WBRL4 siklus 52

4.4.5 Spesimen WLYS100

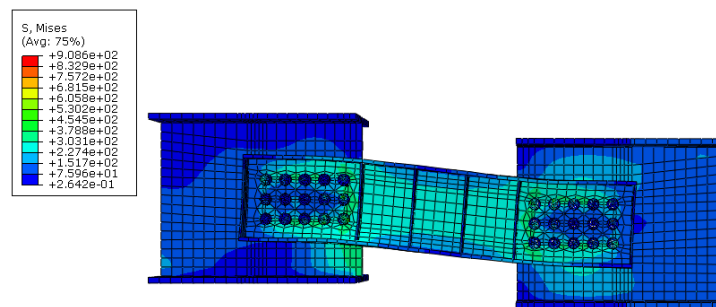
Elemen *replaceable link* dengan variasi mutu baja yang digunakan dimodelkan dan dianalisa hasilnya. Hasil pemodelan terhadap spesimen WLYS100 menunjukkan bahwa *link* mampu menahan gaya geser sebesar 508.77 kN pada saat *link* mengalami rotasi sebesar 0.193 rad. Nilai rotasi tersebut mampu memenuhi persyaratan rotasi melampaui 0.08 rad. Hasil pembebanan siklik dapat dilihat dari Gambar 4.14.

Hasil dari kurva hysteresis spesimen WLYS100 akibat pembebanan siklik dapat diamati bahwa spesimen mampu melampaui batas elastisnya pada saat di awal siklus pembebanan, bahkan spesimen dapat mencapai kondisi plastis di siklus awal tersebut. Hal tersebut dapat dilihat dari bentuk kurva hysteresis dimana dari pemberian beban, kurva telah membentuk garis bilinear yang menandakan bahwa spesimen telah melampaui kondisi elastis serta kondisi plastisnya pada saat pembebanan siklus ke-2.

Sedangkan hasil dari pemodelan numerik dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi merata pada bagian *web* WLYS100. Tegangan pada bagian *web* mampu mencapai titik leleh material yaitu 100 MPa. Namun *lateral buckling* dapat diamati pada *web* akibat beban siklik. *Lateral buckling* terjadi pada saat spesimen mengalami siklus ke-52. Pada bagian *web*, material pada spesimen mengalami tegangan sebesar 151 MPa hingga 303 MPa seperti pada Gambar 4.17.



Gambar 4. 16 Kurva histeresis spesimen WLYS100



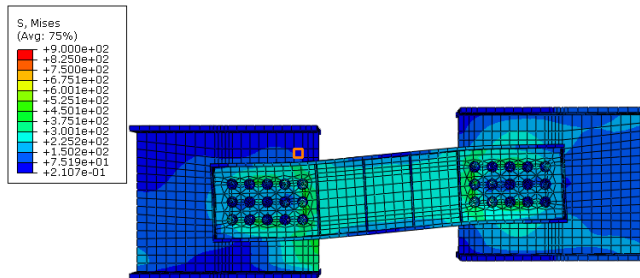
Gambar 4. 17 Hasil tegangan *von misses* spesimen WLYS100

4.4.6 Spesimen WLYS160

Selain menggunakan LYS100, pengujian juga dilakukan pada spesimen dengan material LYP160. Material LYP160 merupakan material *low yield steel* yang memiliki tegangan leleh (f_y) sebesar 160 MPa dan tegangan *ultimate* (f_u) 487 MPa berdasarkan *tesion test* yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya.

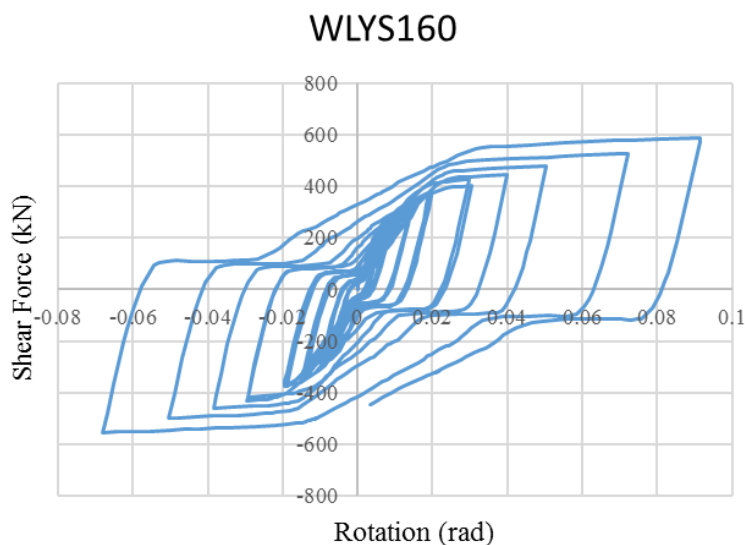
Hasil pemodelan menunjukkan *link* mampu mendisipasi energi dengan baik. Hal tersebut ditandai dengan lelehnya *web-link* pada spesimen seperti yang

terlihat pada gradasi warna pada Gambar 4.18. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi plastis hanya terjadi pada bagian *link* disaat elemen di luar *link* tetap dalam kondisi elastis. Pelelehan terjadi merata pada bidang geser spesimen dengan tegangan yang terjadi sebesar 225 MPa hingga 300 MPa.



Gambar 4. 18 Hasil tegangan *von misses* spesimen WLYS100

Kurva hysteresis hasil pemodelan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.19 menunjukkan *link* mampu menahan gaya geser sebesar 589.30kN dan *link* mampu berotasi sebesar 0.095 rad pada pemberian beban siklik pada saat siklus ke-50 dengan *displacement* sebesar 77 mm.

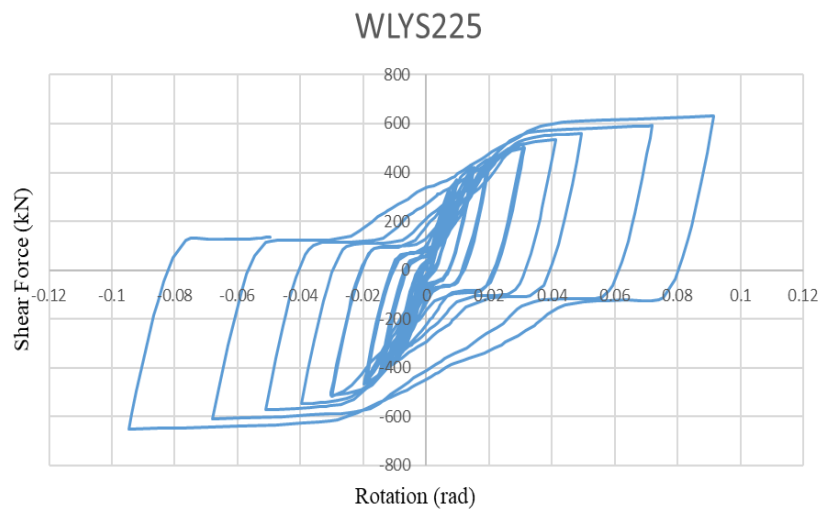


Gambar 4. 19 Kurva histeresis spesimen WLYS160

Serupa dengan WLYS100, kurva hysteresis spesimen WLYS100 akibat pembebanan siklik menunjukkan spesimen mampu melampaui batas elastisnya pada saat di awal siklus pembebanan, dengan spesimen mampu mencapai kondisi plastis di siklus awal tersebut. Hal tersebut dapat dilihat dari terbentuknya garis bilinear pada saat pembebanan siklus pertama.

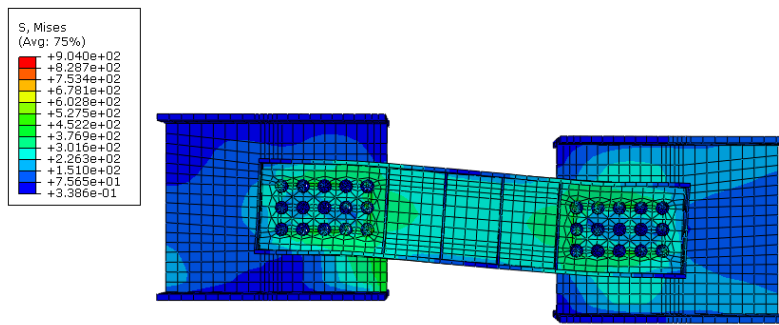
4.4.7 Spesimen WLYS225

Hasil pemodelan *link* WLYS225 menunjukkan *link* mengalami pelelehan secara merata pada *web-link*. Kurva histeresis seperti pada Gambar 4.20, *link* mampu mendisipasi gaya geser akibat pemberian beban berupa *displacement* pada beban siklik yaitu sebesar 630.38 kN. Hasil tersebut dapat dicapai oleh *link* pada saat elemen mengalami rotasi sebesar 0.096 rad.



Gambar 4. 20 Kurva histeresis spesimen WLYS225

Dari hasil pemodelan numerik yang diilustrasikan pada Gambar 4.20 persebaran tegangan yang terjadi pada spesimen WLYS225 serupa dengan spesimen WLYS160. Dari Gambar 4.21 dapat diamati bahwa tegangan yang berkisar antara 300 MPa – 450 MPa terjadi pada bagian sambungan, sedangkan pada bagian badan *link* spesimen mampu mencapai tegangan yang berkisar antara 226 MPa – 376 MPa. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada elemen *link*, spesimen mampu melampaui nilai f_y yaitu 225 MPa yang berarti bahwa elemen *link* telah mengalami pelelehan. Sedangkan pada balok induk, tegangan yang terjadi bernilai dibawah 400 MPa dimana hal tersebut menandakan pada elemen balok induk kondisi yang terjadi pada saat pembebanan berlangsung yaitu elemen tersebut masih dalam kondisi elastis seperti yang disyaratkan.

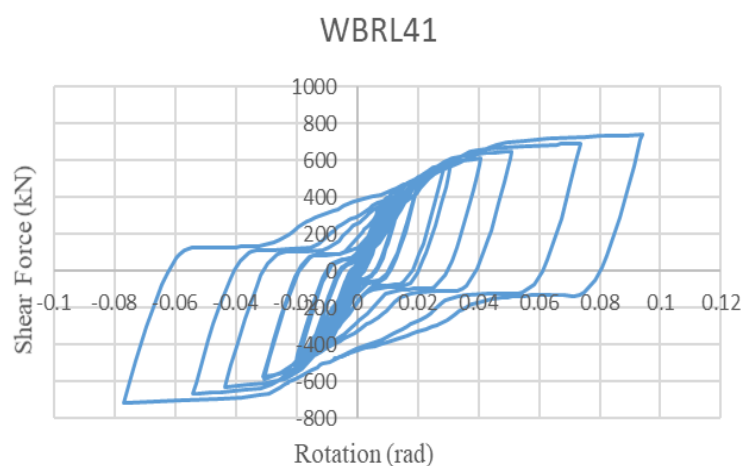


Gambar 4. 21 Hasil tegangan *von misses* spesimen WLYS225

4.4.8 Spesimen WBRL41

Spesimen WBRL41 dimodelkan berbeda dengan memberikan variasi pembeda berupa mutu baja yang digunakan pada elemen balok *link*. Material BJ41 yang memiliki tegangan leleh f_y 250 MPa dan f_u 410MPa digunakan sebagai material penyusun elemen balok *link*. Pemberian material dengan mutu yang lebih tinggi diharapkan pemodelan akan menghasilkan spesimen dengan kemampuan menahan geser yang lebih baik.

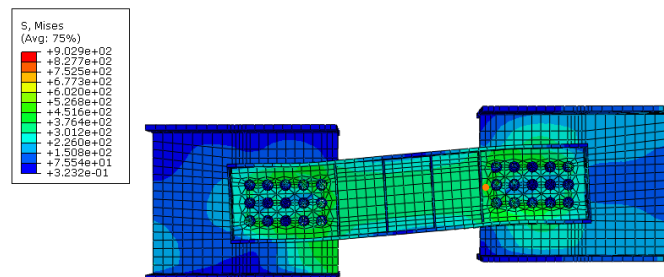
Kurva histeresis hasil pemodelan dapat dilihat pada Gambar 4.22. Hasil analisa pada spesimen WRL2 menunjukkan bahwa *link* mampu menahan gaya geser yang ditimbulkan dari pembebanan siklik sebesar 436.24 kN . Reaksi tersebut terjadi ketika *link* mengalami rotasi (γ) sebesar 0.098 rad. *Pinching effect* juga terjadi pada spesimen dikarenakan adanya *ovalized* pada bagian sambungan.



Gambar 4. 22 Kurva histeresis spesimen WBRL41

Hasil dari pemodelan numerik spesimen WBRL41 dapat dilihat dari grafis tegangan *von misses* pada Gambar 4.23. Hasil menunjukkan bahwa tegangan

dengan nilai 376 MPa – 452 MPa terlihat terjadi pada daerah sambungan, dimana hal tersebut menunjukkan bahwa pada bagian tersebut material pada spesimen telah mengalami kondisi *ultimate*. Sedangkan pada bidang geser *link*, dapat dilihat bahwa tegangan yang terjadi bernilai antara 300 MPa - 376MPa dimana kondisi tersebut menunjukkan bahwa pelelehan material telah terjadi pada bagian tersebut.



Gambar 4. 23 Hasil tegangan *von misses* spesimen WLYS225

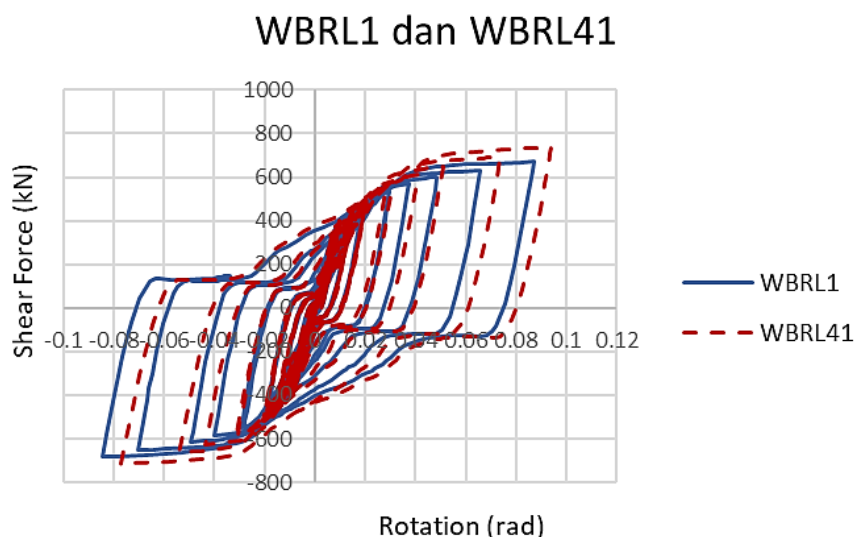
4.5 Perbandingan Perilaku Seismik

4.5.1 Spesimen WBRL1 dengan WBRL41

Gambar 4.24 menunjukkan perbandingan antara dua spesimen (WBRL1 dan WBRL41) setelah pembebanan siklik. Spesimen WBRL41 yang dibuat menggunakan BJ41 menunjukkan kapasitas geser yang sedikit lebih tinggi dibanding spesimen WBRL1 yang dibuat dari BJ37. Selain itu, dapat diamati bahwa kedua *link* dapat memenuhi persyaratan target rotasi plastis yaitu 0.08 rad. Uji numerik menunjukkan kedua spesimen menunjukkan perilaku yang identik meskipun disusun dari material dengan mutu yang berbeda. Namun jenis mutu mampu mempengaruhi kemampuan spesimen dalam menahan beban geser yang terjadi pada *link*. Pemilihan mutu yang lebih tinggi dapat menghasilkan elemen dengan kemampuan menahan gaya geser yang lebih baik. Namun, penggunaan mutu yang lebih tinggi juga meningkatkan kegagalan yang terjadi pada sambungan. Balok *link* dengan mutu yang tinggi menjadikan bagian gesernya memiliki kekakuan yang lebih sehingga balok induk dapat mengalami perlelehan terlebih dahulu, sehingga dalam perencanaan perlu dilakukan pengkajian lebih mendalam.

Selain dari kurva histeresis, performa *link* hasil analisa juga dapat dilihat dari kemampuan *link* dalam mendisipasi energi serta nilai daktilitas yang dicapai. Kemampuan *link* dalam mendisipasi energi serta daktilitas yang dihasilkan oleh

spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4. Spesimen WBRL41 memiliki selisih 1.12% pada kemampuan spesimen mendisipasi energi. Selain itu, kedua spesimen juga memiliki nilai daktilitas di atas 4, dimana hasil tersebut dapat mengkatagorikan kedua spesimen tersebut merupakan spesimen yang daktil.



Gambar 4. 24 Perbandingan kurva histeresis WBRL1 dan WBRL41

Tabel 4. 3 Perbandingan Energi Disipasi WBRL1 dan WBRL41

No	Spesimen	Energi Disipasi (kNmm)	Selisih (%)
1	WBRL1	97276.84	
2	WBRL41	87085.04	1.12

Tabel 4. 4 Perbandingan Daktilitas WBRL1 dan WBRL41

No	Spesimen	Δ Leleh pertama (mm)	Δ <i>Ultimate</i> (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
1	WBRL1	6.65	27.35	4.11	
2	WBRL41	5.18	21.32	4.12	1.00

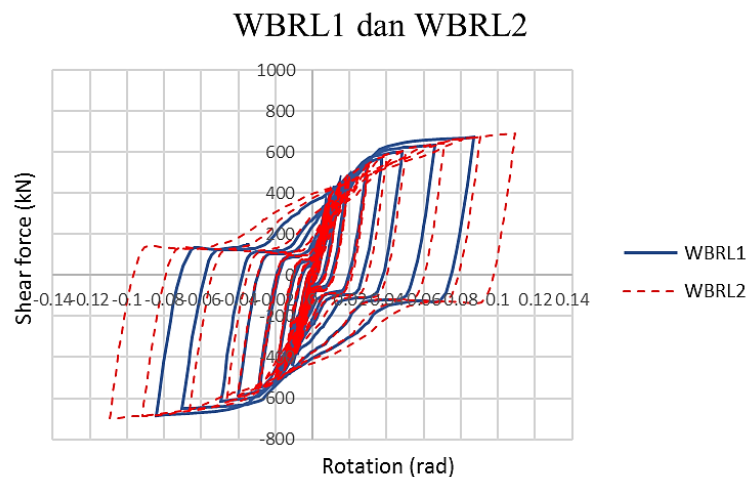
4.5.2 Spesimen WBRL1 dengan WBRL2

Hasil pemodelan numerik dari ketiga spesimen dibandingkan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variabel yang diberikan pada model uji. Gambar 4.25 sampai Gambar 4.27 menunjukkan masing-masing perbandingan kurva histeresis antara masing masing model dengan *link* model validasi.

Pada Gambar 4.25, pemberian *diagonal stiffeners* pada *link* memberikan pengaruh pada hasil pemodelan namun tidak begitu signifikan. Pemberian *diagonal stiffeners* pada WBRL2 menyebabkan *link* menjadi semakin kaku sehingga

menghambat pelelehan terjadi pada bagian *web*. Pemberian diagonal *stiffeners* menjadikan *link* mampu menahan gaya geser lebih besar, tetapi kemampuan menahan gaya geser yang dimiliki tidak jauh berbeda dengan kemampuan disipasi spesimen WBRL1. Namun penambahan diagonal *stiffeners* pada spesimen menjadikan kurva histeresis yang dihasilkan lebih lebar, dan kemampuan mendisipasi energi yang lebih baik.

Berdasarkan Tabel 4.5 spesimen WBRL1 dan WBRL2 memiliki selisih 1.123% dalam kemampuannya mendisipasi energi. Spesimen WBRL2 mampu mendisipasi energi lebih baik jika dibandingkan dengan WBRL1. Sedangkan untuk daktilitas spesimen, WBRL2 memiliki nilai daktilitas 1.032% lebih besar dibandingkan dengan spesimen WBRL1. Daktilitas keduanya mampu mencapai syarat struktur daktail yaitu 4. Nilai daktilitas dari hasil analisa numerik dapat dilihat pada Tabel 4.6.



Gambar 4. 25 Perbandingan kurva histeresis WBRL1 dan WBRL2

Tabel 4.5 Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL2

Spesimen	Energi Disipasi (kNmm)	Selisih (%)
WBRL1	97276.84	
WBRL2	109285.1	1.123

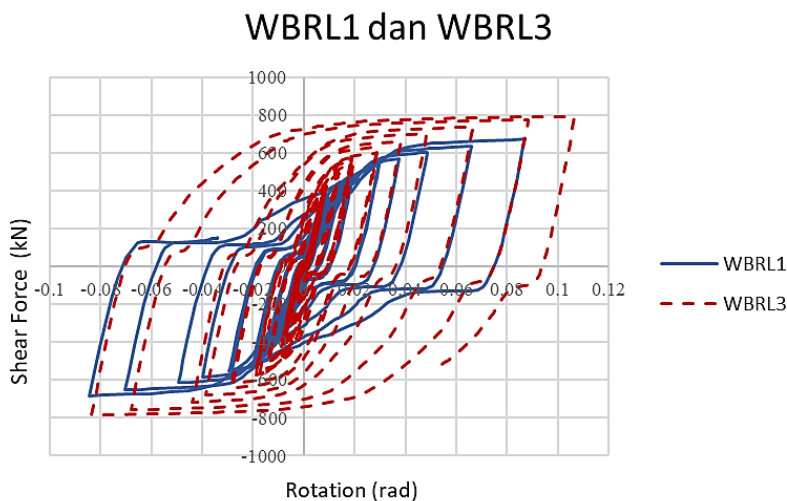
Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL2

Spesimen	Δ saat leleh pertama (mm)	Δ saat <i>ultimate</i> (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
WBRL1	6.65	27.35	4.11	
WBRL2	5.01	21.24	4.24	1.032

4.5.2 Spesimen WBRL1 dengan WBRL3

Perbandingan kurva histerisis hasil uji numerik spesimen WRL1 dengan WBRL3 diilustrasikan pada Gambar 4.26. Pemberian variasi berupa pengaku pada *web-connection* berdampak signifikan pada nilai rotasi serta besarnya gaya geser yang diterima oleh spesimen. Pemberian plat pengaku pada sambungan mampu meminimalisir terjadinya kegagalan tumpu pada sambungan sehingga *link* dapat menahan gaya geser lebih besar 1.91% dari WBRL1.

Disamping itu, *pinching effect* yang dihasilkan kedua spesimen pun berbeda. Sambungan yang lebih kaku pada WBRL3 dapat meminimalisir terjadinya *pinching effect* pada *link*. Hal tersebut karena *web-connection plate* mampu menahan area sambungan dari terjadinya *ovalized* akibat pembebanan siklik. Selain itu, pemberian *web-connection plate* berdampak pada semakin kakunya area sambungan sehingga spesimen mampu menghasilkan rotasi *link* sebesar 1.2% lebih besar bila dibandingkan dengan model validasi WBRL1.



Gambar 4. 26 Hasil perbandingan analisa WBRL1 dengan WBRL3

Perbandingan kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi dan daktilitas antara WBRL1 dengan WBRL3 disajikan dalam Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. Hasil dari analisa didapatkan spesimen WBRL3 mampu mendisipasi energi 1.48% lebih besar dibandingkan model validasi WBRL1. Sedangkan untuk daktilitas, spesimen WBRL3 memiliki nilai daktilitas 1.35% lebih besar dibandingkan dengan WBRL1. Dapat pula dilihat pada kedua spesimen, daktilitas keduanya mampu

melampaui nilai 4, dimana batas minimum suatu struktur dikatakan merupakan struktur yang daktail adalah 4.

Tabel 4.7 Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL3

Spesimen	Energi disipasi (kNmm)	Selisih (%)
WBRL1	97276.84	
WBRL3	144068.5	1.48

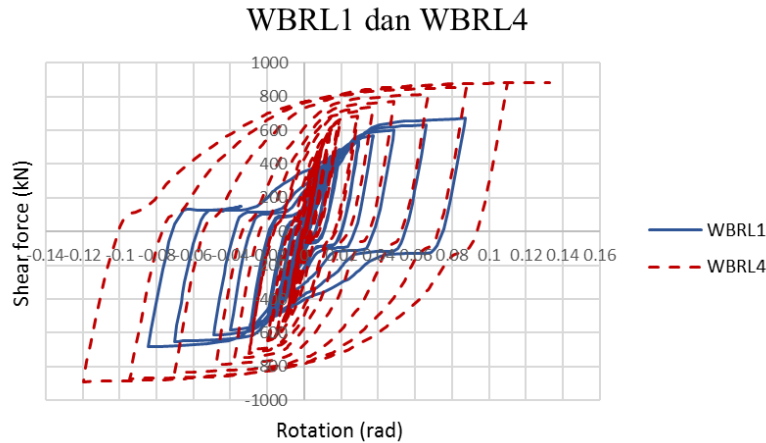
Tabel 4.8 Perbandingan Nilai Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL3

Spesimen	Δ saat leleh pertama (mm)	Δ saat <i>ultimate</i> (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
WBRL1	6.65	27.35	4.11	
WBRL3	5.38	29.98	5.57	1.36

4.5.3 Spesimen WBRL1 dengan WBRL4

Hasil perbandingan kurva hysteresis hasil pengujian numerik pada WBRL1 dan WBRL4 dapat dilihat pada Gambar 4.27. Dari hasil dapat dilihat bahwa penambahan *diagonal stiffeners* membuat spesimen mampu mendisipasi gaya geser lebih besar dibandingkan dengan spesimen tanpa *diagonal stiffeners*. Selain itu, pemberian *diagonal stiffeners* yang menjadikan bidang geser pada *link* menjadi lebih kaku dibanding daerah sambungan dapat diatasi dengan pemberian plat pengaku pada sambungan (*connection plate*). Kurva hysteresis menunjukkan pula bahwa efek *pinching* yang terjadi pada saat pembebanan dapat diminimalisir dengan adanya penambahan plat pengaku sambungan.

Pengaplikasian kedua variabel, penambahan *diagonal stiffeners* serta *connection plate*, mampu mengakomodasi *link* untuk menerima gaya geser lebih besar. Perbandingan kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi dan daktilitas antara WBRL1 dengan WBRL4 disajikan dalam Tabel 4.9 dan Tabel 4.10. Hasil dari analisa didapatkan bahwa *link* mampu mendisipasi energy 1.91% lebih besar dibanding WBRL1. Sedangkan untuk daktilitas, spesimen WBRL4 memiliki nilai daktilitas 1.12% lebih besar dibandingkan dengan WBRL1. Dapat pula dilihat pada kedua spesimen, daktilitas keduanya mampu melampaui nilai 4, dimana batas minimum suatu struktur dikatakan daktail adalah 4.



Gambar 4. 27 Hasil perbandingan analisa WBRL1 dengan WBRL4

Tabel 4. 9 Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL4

No	Spesimen	Energi Disipasi (kNmm)	Selisih (%)
1	WBRL1	97276.84	
2	WBRL4	185951.09	1.91

Tabel 4. 10 Perbandingan Nilai Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL4

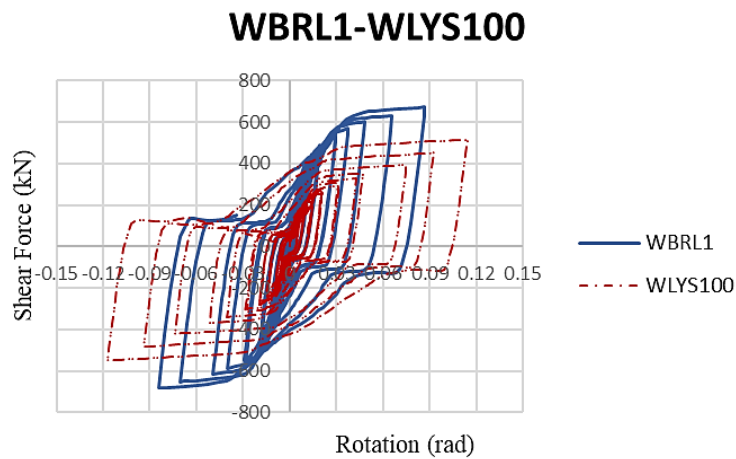
No	Spesimen	Δ Leleh pertama (mm)	Δ <i>Ultimate</i> (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
1	WBRL1	6.65	27.35	4.11	
2	WBRL4	6.05	27.44	4.61	1.12

4.5.4 Spesimen WBRL1 dengan *Low yield point (LYP) Steel*

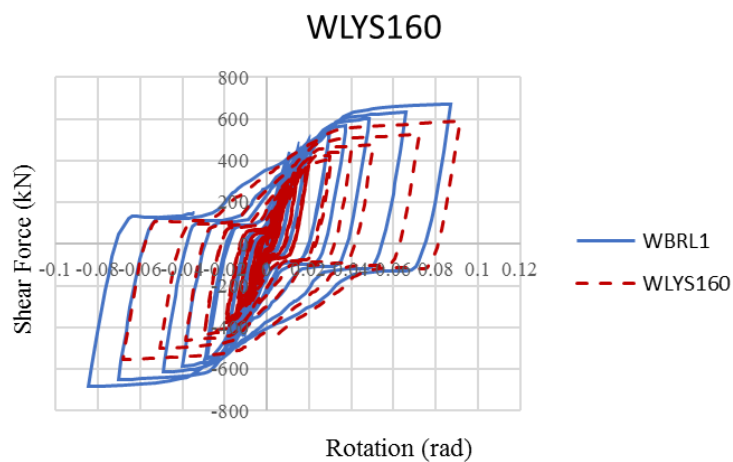
Pengujian spesimen dengan material LYS dilakukan dan kemudian dibandingkan hasilnya dengan spesimen WBRL1 seperti pada Gambar 4.28. Pada Gambar 4.28, WLYS100 memiliki rotasi *link* lebih besar dibandingkan dengan WBRL1. Hal tersebut dikarenakan material dari LYS100 yang memiliki regangan dua kali lebih besar dari material WBRL1 yaitu 0.45 sehingga spesimen mampu mencapai kondisi *ultimate* dengan nilai rotasi yang lebih besar. Sedangkan dalam mendisipasi gaya geser, WLYS100 memiliki kemampuan mendisipasi lebih rendah dibandingkan WBRL1 dikarenakan mutu yang dimiliki oleh material LYS100 lebih kecil, yaitu tegangan leleh yang dimiliki berkisar antara 100 MPa dengan tegangan

ultimate sebesar 339 MPa berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada eksperimen sebelumnya.

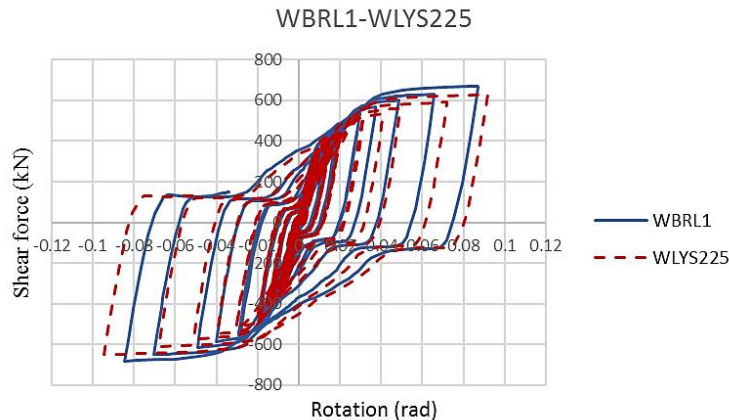
Pada hasil pengujian spesimen WLYS160 dan WLYS225, perilaku dari kedua spesimen sebanding dengan spesimen model validasi WBRL1. Ketiganya mampu mendisipasi gaya geser dengan baik, serta memiliki nilai disipasi dan rotasi yang sebanding, seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.11. Sedangkan nilai daktilitas yang dicapai, ketiga spesimen mampu mencapai daktilitas di atas 4. Spesimen WLYS100 memiliki nilai daktilitas tertinggi, yaitu 1.88% lebih besar daripada WBRL1. Hasil dari daktilitas dapat dilihat pada Tabel 4.12.



Gambar 4. 28 Perbandingan kurva hysteresis WBRL1 dengan WLYS100



Gambar 4. 29 Perbandingan kurva hysteresis WBRL1 dengan WLYS160



Gambar 4. 30 Perbandingan kurva hysteresis WBRL1 dengan WLYS225

Tabel 4. 11 Energi disipasi spesimen *low yield point steel*

No	Spesimen	Energi Disipasi (kNmm)	Selisih (%)
1	WBRL1	97276.84	
3	WLYS100	101277.13	1.041
4	WLYS160	71189.71	1.366
5	WLYS225	89488.67	1.087

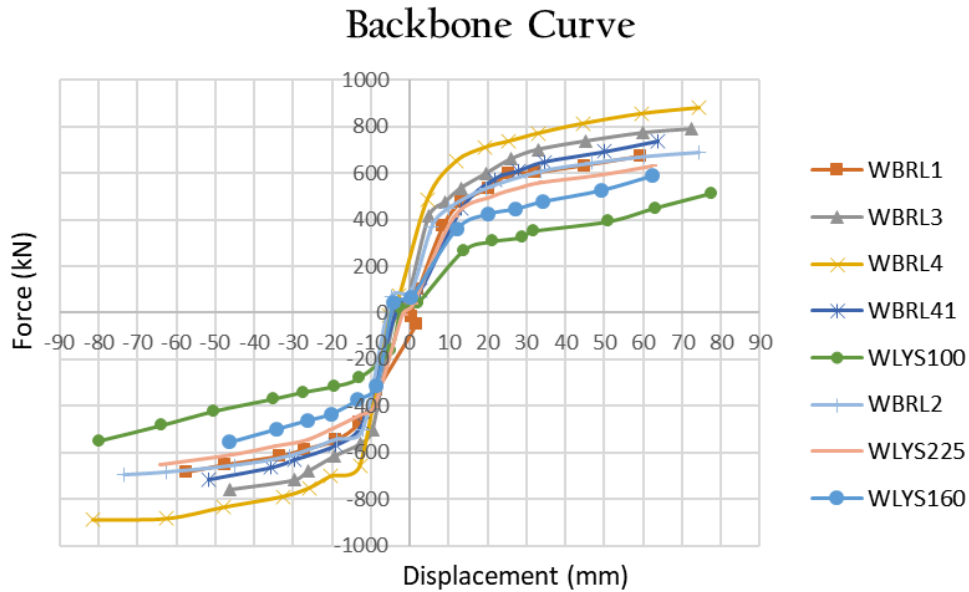
Tabel 4. 12 Daktilitas spesimen *low yield point steel*

No	Spesimen	Δ leleh pertama (mm)	Δ <i>Ultimate</i> (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
1	WBRL1	6.65	27.35	4.11	
3	WLYS100	5.51	42.63	7.74	1.88
4	WLYS160	5.28	22.87	4.33	1.05
5	WLYS225	4.75	24.42	5.14	1.25

Gambar 4.31 menunjukkan *backbone curve* dari hasil uji numerik seluruh spesimen. Kurva ini didapatkan dari *tracking* nilai gaya geser maksimum pada masing-masing siklus pembebanan. Kurva ini merefleksikan kekuatan yang dihasilkan spesimen, kekakuan, serta daktilitas.

Kedelapan spesimen mampu menunjukkan performa yang serupa. Spesimen mengalami dua fase pada saat pembebanan, yaitu fase elastis dan plastisnya yang ditunjukkan dari garis *bilinear* yang terbentuk pada kurva. Dari kurva tersebut, dapat dilihat spesimen WBRL4 memiliki kurva yang lebih besar nilainya dalam menahan beban geser. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa penambahan elemen, khususnya pengaku pada sambungan memiliki pengaruh

yang signifikan terhadap kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi. Sedangkan penggunaan LYS100 mampu mengakomodasi *link* untuk mengalami rotasi *link* yang lebih besar, dikarenakan nilai regangan tinggi yang dimiliki oleh spesimen. Penambahan *diagonal stiffeners* mampu meningkatkan daktilitas spesimen, namun hasilnya tidak signifikan.

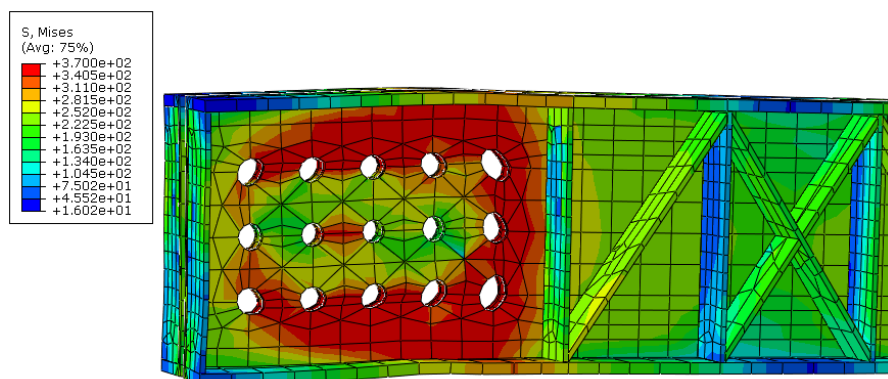


Gambar 4. 31 *Backbone curve* hasil uji spesimen

4.6 Perilaku pada Sambungan akibat Beban Siklik

4.6.1 Spesimen tanpa Plat Pengaku Sambungan (WBRL1, WBRL2, WBRL41, WLYS100, WLYS160, dan WLYS225)

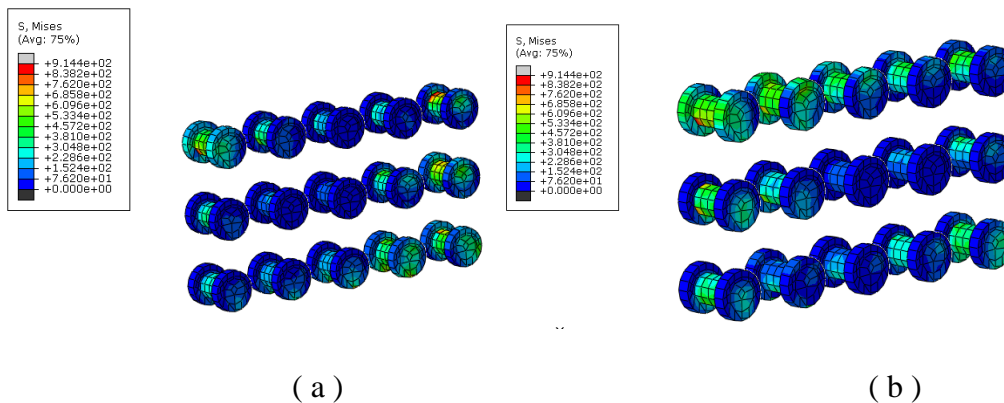
Beban siklik sebesar 52 siklus mengakibatkan perubahan bentuk yang terjadi pada bagian sambungan dari elemen *web-bolted replaceable link* seperti pada Gambar 4.32.



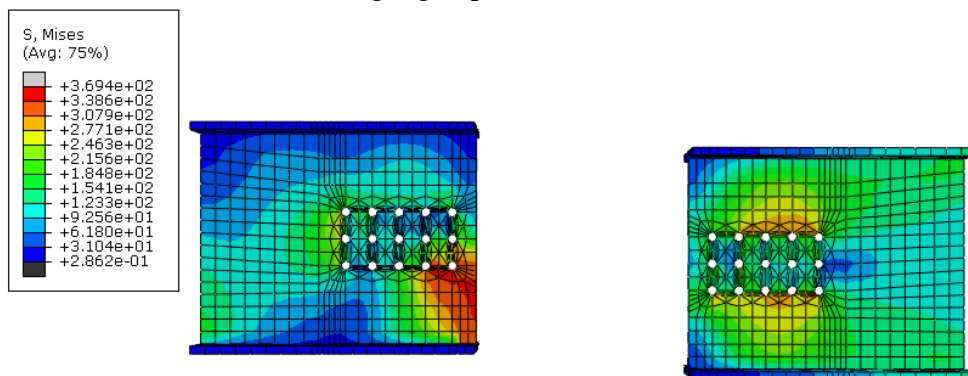
Gambar 4. 32 *Ovalized* pada lubang baut akibat dari pembebanan siklik

Pemberian beban siklik memberi dampak pada elemen yang diuji. Beberapa bagian pada elemen mengalami deformasi, dan beberapa deformasi tersebut memberikan pengaruh yang signifikan, salah satunya adalah pengaruh pada hasil kurva hysteresis yang dihasilkan dari pemodelan. Pada elemen penyusun *link* berupa baut, hasil menunjukkan hal yang tidak berbeda jauh dengan deformasi yang terjadi pada Gambar 4.32.

Pada Gambar 4.33, baut pada baris terdalam di kedua sisi mengalami tegangan yang besar dikarenakan adanya kontak dan efek dari tarik menarik antara baut dengan balok C akibat beban *displacement*. Pada baut di bagian tengah, tegangan terlihat lebih kecil dibandingkan dengan baut lainnya dikarenakan pada bagian tersebut lubang baut hanya berputar pada porosnya.



Gambar 4. 33 Distribusi tegangan pada baut di (a) sisi kiri; (b) sisi kanan



Gambar 4. 34 Distribusi tegangan pada balok induk

Sedangkan pada bagian balok induk, tegangan terbesar berada pada sekitar lubang baut. Kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.34. Besarnya tegangan pada daerah di sekitar lubang baut terjadi karena adanya perlemahan pada bagian tersebut yang disebabkan oleh lubang-lubang sehingga tidak dapat menahan gaya

geser dengan baik. Namun pada hasil analisa, walaupun pada bagian tersebut tegangannya sangat tinggi, namun elemen masih tetap dalam kondisi elastis seperti yang disyaratkan. Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada masing elemen penyusun balok *link* akan ditampilkan pada Tabel 4.13. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa tegangan yang terjadi pada bagian sambungan dari balok C mampu mencapai kondisi *ultimate* pada masing-masing spesimen.

Tabel 4. 13. Nilai Tegangan Maksimum pada Daerah Sambungan

No	Spesimen	Tegangan Max (N/mm ²)		
		Balok induk	Baut	Balok C
1	WBRL1	355.67	599.38	370
2	WBRL41	300.03	564.76	410
3	WLYS100	342.58	601.36	360
4	WLYS160	328.14	597.03	487
5	WLYS225	300.78	600.01	398
6	WBRL2	308.66	600.78	370

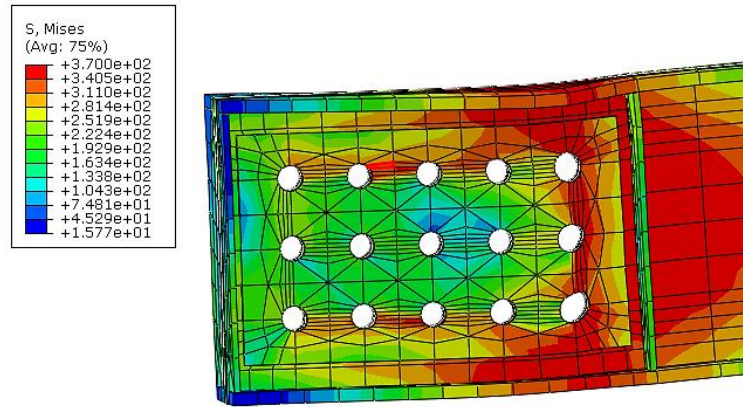
Dari hasil pemodelan di atas, dapat diketahui bahwa pelelehan elemen hingga mencapai kondisi deformasi *ovalize* hanya terjadi pada balok *link*nya saja. Sedangkan elemen lain tetap pada kondisi elastisnya. Dapat disimpulkan bahwa hal tersebut menunjukkan pada pembebanan maksimum, link masih dapat dilakukan pergantian apabila mengalami kerusakan akibat beban gempa.

4.6.2 Spesimen dengan Plat Pengaku Sambungan (WBRL3 dan WBRL4)

Adanya penambahan plat pengaku pada sambungan diharapkan mampu meminimalisir terjadinya efek *pinching* pada spesimen *replaceable link* karena penambahan tersebut menjadikan bagian sambungan menjadi lebih kuat dalam menerima beban. Selain itu, penambahan pengaku pada bagian sambungan diharapkan mampu menahan sambungan dari pelelehan, sehingga bagian geser pada *link* mampu mencapai kondisi leleh terlebih dahulu.

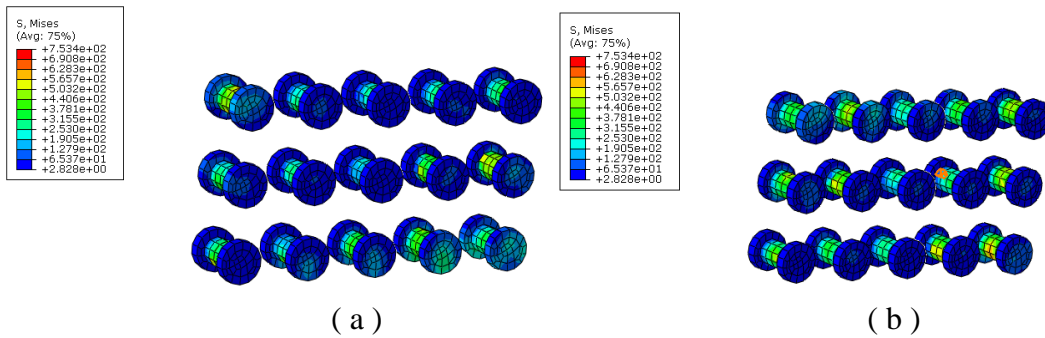
Efek dari pemberian *reinforce connection plate* dapat dilihat seperti pada Gambar 4.35. *Ovalized* dapat ditahan oleh adanya plat pengaku pada sambungan. tidak seperti pada spesimen sebelumnya, spesimen WBRL3 dan WBRL4 hanya mengalami *ovalized* pada lubang baut terdalam saja, sedangkan lubang baut lainnya mampu menahan deformasi sehingga tidak mengubah bentuk dari lubang baut. *ovalized* yang terjadi ini menjadikan efek *pinching* tetap terjadi pada hasil kurva

hysteresis, namun efeknya dapat diminimalisir. Namun, pemberian plat menjadikan bagian sambungan *link* menjadi kaku, sehingga tekuk pada *flange* dapat diamati pada pembebanan siklus ke-52.



Gambar 4. 35 Distribusi tegangan pada sambungan balok *link*

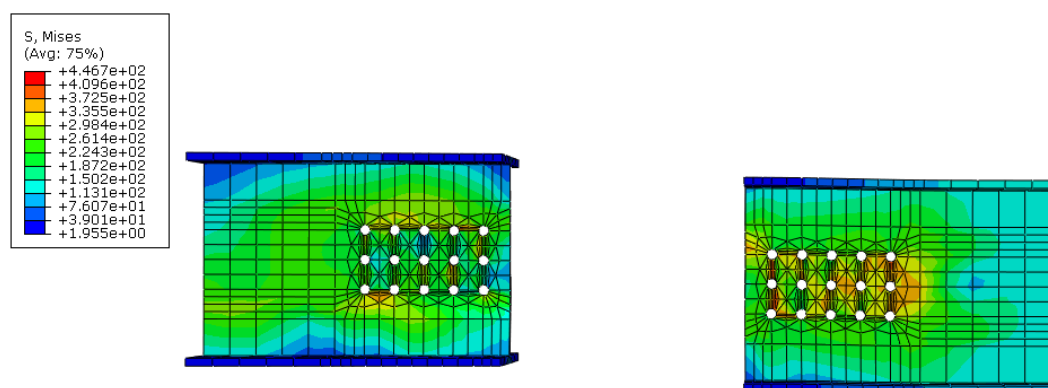
Pada elemen baut, baut terluar mengalami tegangan dengan nilai terbesar, yaitu berkisar antara 503.5 N/mm² hingga 628.3 N/mm² seperti pada Gambar 4.36. Tegangan tersebut terjadi karena adanya kontak antara baut dengan balok *link* akibat pembebanan.



Gambar 4. 36 Distribusi tegangan pada baut WBRL4 di (a) sisi kiri; (b) sisi kanan

Sedangkan pada balok induk, dapat diamati bahwa pada beberapa bagian, terutama pada elemen-elemen *brick* di sekitar lubang baut, material telah mencapai kondisi elastisnya seperti yang terlihat pada Gambar 4.37. Nilai tegangan pada bagian tersebut mampu melampaui nilai 361.15 N/mm². Hal tersebut terjadi karena selain adanya perlemahan elemen akibat lubang baut, balok induk haruslah menahan dimensi dari balok *link* yang lebih tebal karena adanya penambahan plat, sehingga beban yang diterima pun lebih besar dan menyebabkan tercapainya kondisi elastis pada elemen.

Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada masing elemen penyusun balok *link* dengan *additional connection plate* akan ditampilkan pada Tabel 4.14. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa tegangan yang terjadi pada bagian sambungan dari balok C mampu mencapai kondisi *ultimate* pada masing-masing spesimen.



Gambar 4. 37 Distribusi tegangan pada balok induk WBRL4.

Tabel 4. 14 Nilai Tegangan Maksimum pada Daerah Sambungan Elemen dengan Plat Pengaku

No	Spesimen	Tegangan			
		Balok induk	Baut	Balok C	<i>Connection Stiffeners</i>
1	WBRL1	355.67	599.38	370	-
2	WBRL3	357.57	614.14	370	370
3	WBRL4	361.15	608.22	370	370

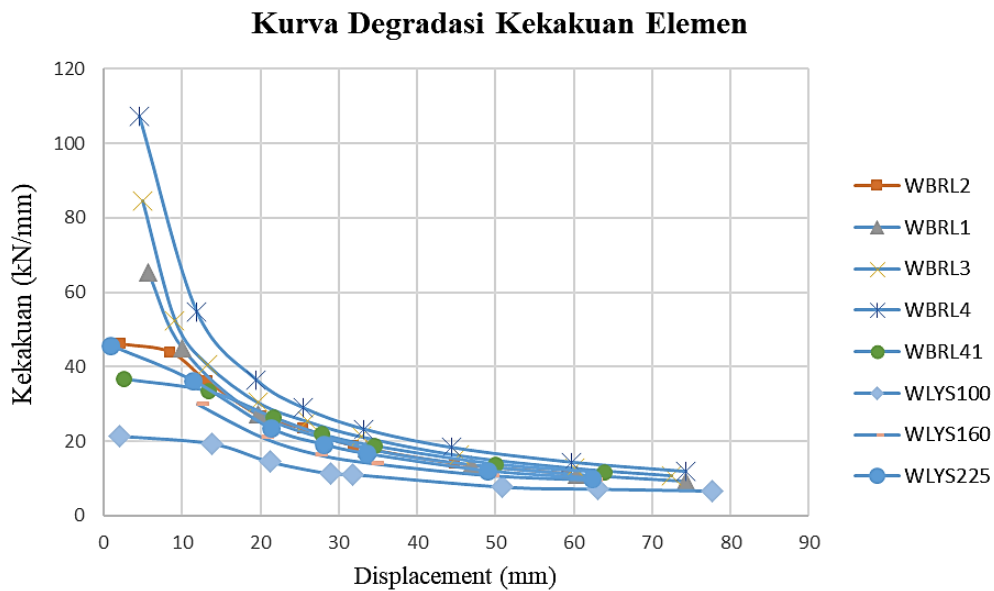
Dari hasil pemodelan di atas menunjukkan bahwa pelelehan elemen hingga mencapai kondisi *ultimatenya* dan menyebabkan terjadinya deformasi *ovalize* hanya terjadi pada balok *linknya* saja dan elemen lain tetap pada kondisi elastisnya. Dapat disimpulkan bahwa hal hal tersebut menunjukkan pada pembebanan maksimum yang diberikan, dalam hal ini berupa displacement sebesar 72 mm, link masih dapat dilakukan pergantian apabila mengalami kerusakan akibat beban gempa.

4.7 Degradasi kekakuan pada Elemen *Replaceable link*

Degradasi kekakuan pada elemen dianalisa untuk mengetahui bagaimana respon dari *link* terutama kekakuan elemen akibat diberi pembebanan, khususnya berupa pembebanan displacement. Kurva hysteresis yang simetris menjadikan

analisa hanya dilakukan pada saat pemberian beban tarik saja seperti pada Gambar 4.35.

Kurva pada Gambar 4.38 menunjukkan bahwa kekakuan terbesar dimiliki oleh elemen WBRL4 yaitu sebesar 107.25 kN/mm. Sedangkan diantara 8 elemen, WLYS100 memiliki nilai kekakuan paling rendah, yaitu berkisar antara 21.43 kN/mm. dengan adanya peningkatan *displacement* akibat pembebanan, kekakuan dari elemen akan mengalami penurunan secara bertahap yang disebabkan oleh deformasi plastis yang diakibatkan oleh pelelehan yang terjadi pada material penyusun *link*. Nilai dari *initial stiffness* pada masing-masing element akan disajikan pada Tabel 4.15.



Gambar 4. 38 Kurva degradasi kekakuan

Tabel 4. 15 *Initial Stiffness* pada *Elemen Link*

No	Element	<i>Displacement</i> (mm)	<i>Initial Stiffness</i> (kN/mm)
1	WBRL1	2.162	46.016
2	WBRL41	2.578	36.851
3	WLYS100	2.048	21.426
4	WLYS160	12.015	30.037
5	WLYS225	0.763	34.942
6	WBRL2	5.652	65.295
7	WBLR3	4.917	84.613
8	WBRL4	4.540	107.249

4.8 Kontrol *Drift* pada *Frame* EBF

Dalam perencanaan suatu struktur baja, terdapat beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, salah satunya adalah persyaratan *drift*. *Drift* yang terjadi pada *Frame* haruslah tidak melebihi 0.02 (2%) dari tinggi *Frame*. Dari hasil uji spesimen didapatkan nilai rotasi plastis (γ_p) dimana hasil tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai *drift*.

Frame yang digunakan pada perhitungan mengadopsi *Frame* pada penelitian oleh Mansour dkk (2011) yaitu *Frame* EBF dengan lebar *span* 9 m dan tinggi *Frame* 3.7 m. Sebelum mendapatkan nilai *drift*, perlu dilakukan perhitungan terhadap θ untuk *frame*. Contoh perhitungan θ untuk spesimen WBRL1 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\theta &= \gamma_p \left(\frac{e}{L} \right) \\ &= 0.093 \left(\frac{680}{2800} \right) \\ &= 0.007 \text{ rad}\end{aligned}$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai *drift* dilakukan dengan mengalikan tinggi dari *frame* dengan nilai θ dengan menggunakan kaidah sudut *tangential*. Karena sudut yang dihasilkan bernilai sangat kecil, maka \tan pada perhitungan dapat diabaikan dan nilainya menjadi sudut itu sendiri. Perhitungan *drift* *frame* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta_p &= \theta \frac{h_n}{c_d} \\ &= 0.007 \cdot \frac{3700}{4} \\ &= 6.5 \text{ mm}\end{aligned}$$

Dari hasil tersebut, untuk spesimen WBRL1 mampu memenuhi persyaratan bahwa nilai *drift* tidak melebihi $0.02h_n$, yaitu hanya sebesar 8.78% dari persyaratan. Hasil perhitungan *drift* dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Hasil perhitungan *drift* spesimen

No	Spesimen	γ_p (rad)	Tinggi struktur (mm)	Lebar struktur (mm)	Panjang link (<i>e</i>) (mm)	θ_p (rad)	Δ_p (mm)
1	WBRL1	0.093	3700	9000	680	0.0070	6.500
2	WBRL41	0.098				0.0074	6.849
3	WLYS100	0.103				0.0078	7.171
4	WLYS160	0.095				0.0071	6.608
5	WLYS225	0.097				0.0073	6.779
6	WBRL2	0.096				0.0073	6.709
7	WBLR3	0.090				0.0068	6.318
8	WBRL4	0.089				0.0067	6.213

Sedangkan hasil dari analisa menunjukkan bahwa keseluruhan spesimen uji mampu menghasilkan *drift* sesuai persyaratan, yaitu kurang dari 0.02 (2%) dari tinggi *frame*. Selisih nilai *drift* yang dihasilkan berkisar antara 8% - 10% apabila seluruhnya dibandingkan dengan besar *drift* yang disyaratkan yaitu sebesar 74 mm. Spesimen WLYS100 menghasilkan *drift* dengan nilai terbesar, yaitu 7.17 mm dikarenakan WLYS100 memiliki nilai rotasi yang terbesar. Disamping itu, hasil perhitungan *drift* pada keseluruhan spesimen memiliki selisih yang tidak terlampaui jauh satu dengan lainnya, seperti yang dicantumkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Persentase Selisih *Drift* dengan Simpangan Ijin

No	Spesimen	Drift (mm)	Simpangan ijin (mm)	Selisih (%)
1	WBRL1	6.500	74	8.78
2	WBRL41	6.849	74	9.26
3	WLYS100	7.171	74	9.69
4	WLYS160	6.608	74	8.93
5	WLYS225	6.779	74	9.16
6	WBRL2	6.709	74	9.07
7	WBLR3	6.318	74	8.54
8	WBRL4	6.213	74	8.40

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa numerik yang dilakukan pada 8 jenis spesimen *replaceable link* dengan modifikasi, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada *preliminary design*, pemberian variasi berupa *diagonal stiffeners* serta *web-connection plate* menghasilkan perbedaan yang signifikan terhadap hasil analisa. Pemberian *web-connection plate* mampu mengakomodasi *link* untuk mampu menahan gaya geser lebih besar, namun menghasilkan rotasi yang lebih kecil. Pengkombinasian keduanya mampu menghasilkan *link* dengan performa disipasi energi yang lebih baik. Namun, pemberian *diagonal stiffeners* saja pada elemen hanya mampu memberikan peningkatan kekuatan serta rotasi yang kecil yaitu hanya sebesar 1% untuk gaya geser dan 1.03% untuk nilai rotasi.
2. Sedangkan hasil analisa terhadap tegangan, kurva histeresis, rotasi, kemampuan dalam mendisipasi energi, serta mode kegagalan didapatkan hasil sebagai berikut:
 - a. Dalam kemampuan spesimen dalam menahan gaya geser, spesimen WBRL1 mampu menahan gaya reaksi sebesar 671,37 kN. Kemampuan mendisipasi energi geser terbaik dilakukan oleh spesimen WBRL4. Apabila dibandingkan dengan spesimen uji lain, WBRL4 mampu mendisipasi gaya geser 1.31% lebih besar dibandingkan dengan WBRL1. Sedangkan pendisipasi energi geser terkecil yaitu spesimen WLYS100, dengan kemampuan menahan gaya geser 1.303% lebih kecil dari WBRL1
 - b. Dalam kemampuan *link* menahan rotasi, keseluruhan spesimen mampu melampaui persyaratan rotasi yang diberikan yaitu 0.08 rad untuk *link* geser. *Link* WLYS100 memiliki rotasi terbesar yaitu 1.103% lebih besar dibanding dengan WBRL1.
 - c. Dalam kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi, spesimen WBRL1 mampu mendisipasi energi sebesar 97276.84 kNmm. Pada

- WBRL4, spesimen mampu mendisipasi energi 1.48% lebih besar bila dibandingkan dengan WBRL1.
- d. Seluruh spesimen uji mampu melampaui nilai daktilitas yang disyaratkan yaitu 4. Spesimen WBRL1 memiliki nilai daktilitas sebesar 4.11. sedangkan nilai daktilitas tertinggi dimiliki oleh WLYS100 yaitu 1.88% lebih besar dibandingkan dengan WBRL1.
3. Seluruh spesimen mampu mengakomodasi nilai *drift* sesuai dengan persyaratan, yaitu tidak lebih dari 0.02 dari tinggi *frame* dengan selisih masing-masing spesimen dengan batasan persyaratan berkisar antara 8% - 10%. Spesimen WLYS100 memiliki *drift* terbesar yaitu 7.17 mm dan memiliki selisih 9.69% dari batas *drift* yang disyaratkan, dimana hal tersebut karena spesimen tersebut juga mengalami rotasi *link* paling besar yaitu sebesar 0.103 rad.

5.2 Saran

Dalam merencanakan balok *replaceable link*, pemberian variasi berupa *diagonal stiffeners* perlu dilakukan perhitungan secara terperinci agar balok *link* yang diberi pengaku tetap dapat berperilaku inelastik. Selain itu, ketebalan *web-connection plate* juga perlu diperhitungkan untuk menghindari terjadinya kegagalan pada balok induk akibat dari terlalu kakunya sambungan *link* yang dapat membuat elemen balok induk mengalami pelelehan terlebih dahulu.

Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan pengujian spesimen *replaceable link* secara eksperimental di laboratorium untuk mengetahui secara lebih detail tentang bagaimana kapasitas dari *replaceable link* apabila diberi beban secara langsung dikarenakan keterbatasan dari pemodelan numerik yang telah dilakukan.

Selain itu, untuk spesimen yang menggunakan material *low yield point steel* (LYP) perlu dilakukan pengetesan elemen *replaceable link* di laboratorium untuk mengetahui secara pasti bagaimana pengaruh dari regangan material LYP terhadap perilaku dari *link*, khususnya terhadap rotasi yang dihasilkan oleh elemen. Hal tersebut dilakukan karena adanya keterbatasan pada program Abaqus untuk mendeteksi kegagalan yang terjadi pada elemen akibat pembebanan dan juga

program analisa numerik akan mengalami ketidakstabilan apabila material serta elemen yang digunakan sangat rumit dan juga telah mengalami kondisi leleh.

Selain itu, perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana perilaku suatu *Frame* EBF yang menggunakan elemen *replaceable link*, serta perlu dilakukan studi tentang keefektifan pembongkaran *replaceable link* setelah terkena beban gempa.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abaqus Online Documentation, 2013, Abaqus Analysis User's Manual, Dassault Systemes, viewed 8 January 2020,
<<http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>>
- ANSI/AISC 341-16, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of *Steel Construction*, Illinois.
- ANSI/AISC 360-16, *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of *Steel Construction*, Illinois.
- Ashikov, A. Clifton, C. Belev, B. (2016), "Finite Element Analysis of Eccentrically Braced Frames with a New Type of Bolted *Replaceable Active Link*". *NZSEE Conference*.
- Binder, J. Gray, M. Christopoulos, C. dan de Oliveira, C. (2017), "Cast *Steel Replaceable Modular Links* for Eccentrically Braced Frames", *Structures Congress*, hal. 202-2012.
- Bozkurt, M. dan Topkaya, C. (2017), "*Replaceable Link* with Direct Brace Attachments for Eccentrically Braced Frames", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Bruneau, M, Uang, C, and Sabelli, R, (2011), *Ductile Design of Steel Structure*, 2nd edition, The McGraw-Hill Companies, New York.
- Cook, R. Malkus, D. Plesha, M. Witt, R, (2002), *Concept and Application of Finite Element Analysis*, 4th edition, John Wiley and Sons inc, USA.
- Daneshmand, A. Hashemi, B. (2011), "Performance of Intermediate and Long *Link* in Eccentrically Braced Frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 70, No. 11, hal: 167-176.
- Dewobroto, W, (2015), *Struktur Baja, Perilaku, Analisis & Desain –AISC 2010* edisi pertama, Lumina Press, Tangerang:
- Dubina, D. Stratan, A. dan Dinu, F. (2008), "Dual High-Strength *Steel Eccentrically Braced Frames* with Removable *Links*", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, hal. 1703-1720.
- Dusicka, P. Itani, A. Buckle, G. (2010), "Cyclic Behavior of Shear *Links* of Various Grades of Plate *Steel*", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No. 4, hal. 370-378.
- Ji, X. Wang, Y. Ma, Q. Okazaki, T. (2015), "Cyclic Behavior of Very Short *Steel Shear Links*", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 142, Issue 2 (February 2016).
- Ji, X. Wang, Y. Ma, Q. Okazaki, T. (2016), "Cyclic Behavior of *Replaceable Steel Coupling Beams*", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, ISSN 0733-9445.

- Kurdi, Budiono, B. dan Yurisman (2013), “Studi Numerik Usulan Jarak Pengaku Badan Diagonal *Link* Geser pada Struktur Baja Eccentrically Braced Frame Type - D”, *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 20, No. 2, hal. 87-96.
- Li, Shen, Liu, Y. dan Tian, J. (2017), “Experimental and Analytical Study of Eccentrically Braced Frames Combined with High-Strength *Steel*”, *International Journal of Steel Structures*.
- Liu X. Fan, J. Liu, Y. Nie, J. (2017), “Experimental Research of *Replaceable* Q345GJ *Steel* Shear *Links* Considering Cyclic Buckling and Plastic Overstrength”, *Journal of Constructional Steel*.
- Logan, D. (2012), *A First Course in the Finite Element Method*, 4th Edition, Global Engineering, USA.
- Mansour, N. Shen, Y. Christopoulos, C. Tremblay, R. (2008), “Experimental Evaluation of Nonlinear *Replaceable Links* in Eccentrically Braced Frames and Moment Resisting Frames”, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Mansour, N. Christopoulos, C. Tremblay, R. (2011), “Experimental Validation of *Replaceable* Shear *Links* for Eccentrically Braced *Steel* Frames”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, No. 10, hal. 1141-1152.
- Moestopo, M. Kusumastuti, D. Lim, E. Akbar, U. Ramadhita, M. (2018), “Experimental Study on the Seismic Behavior of *Replaceable* Shear *Links* Connected to Coupling Beam”, *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, Vol. 8, No. 2, hal. 532-539.
- Musbar, Budiono, B. Kusumastuti, D. Setio, H. (2017), “Numerical Study on the Modification of Long *Links* in Eccentrically Braced Frame”, *Proceeding of the 3rd International Conference and Construction and Building Engineering*.
- Musmar, M. (2012), “Effect of *Link* on Eccentrically Braced Frames” *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 40, No. 1, hal. 35-43.
- Okazaki, T. dan Engelhardt, M. (2006), “Cyclic Loading Behavior of EBF *Links* Constructed of ASTM A992 *Steel*”, *Journal of Constructional Steel*.
- Popov, E. Kasai, K. Engelhardt, M. (1987), “Advances in Design of Eccentrically Braced Frames”, *Proceeding of the Pacific Steel Conference*, Auckland. Vol. 1, Page 85-95.
- Rafael, J. dan Suswanto, B (2017), “Studi Perilaku *Link* Pendek, *Link* Menengah, dan *Link* Panjang pada Struktur Baja Sistem EBF”, *ITS Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, No. 1, hal. 25-31.
- Rancangan Standar Nasional Indonesia (RSNI) 1726:2019, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.

- Saeki, E. Sugisawa, M. Yamaguchi, T. (1998), "Mechanical Study of *Low yield point Steel*", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 10, No. 3, Page 143-152.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 1729:2015, *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Suswanto, B. Amalia, A. Wahyuni, E. Rafael, J. (2017), "Numerical Behavior Study of Short *Link*, Intermediate *Link*, and Long *Link* in Eccentrically Braced Frame *Steel Structure*", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, No. 21, hal. 11460-11471.
- Tan, K. Christopoulos, C. (2016), "Development of *Replaceable Cast Steel Links* for Eccentrically Braced Frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, ISSN 0733-9445.
- Wijaya T. (2012), "Studi Stabilitas pada Sistem Portal Baja Berpengaku Eksentrik (*Eccentrically Braced Frame*)", *Rekayasa Sipil*, 6 (1). Hal, 1-11, ISSN 1858-3695.
- Xiao, X. Zhang, P. Zhang, Q. (2018), "Seismic Energy Dissipation Analysis of Y and K Type Composite Eccentrically Braced *Steel Frames*", *International Workshop on Renewable Energy and Development (IWRED)*.
- Yu, P. Sun, J. Zhang, C. Zhao, J. (2018). "High Ductile of a Low-Yield-Strength *Steel* with a Part-through Curve Crack",
- Yurisman, Budiono, B. Moestopo, M. Suarjana, M. (2010), "Kajian Numerik Terhadap Kinerja *Link* Geser dengan Pengaku Diagonal pada Struktur Rangka Baja Berpenopang Eksentrik (EBF)", *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 17, No. 1, hal. 25-38.
- Zhang, C. Zhu, J. Wu, M. Yu, J. Zhao, J. (2016), "The Lightweight Design of a Seismic Low-Yield-Strength *Steel* Shear Panel Damper", MDPI
- Zhao, C. Gong, K. (2014), "Finite Element Analysis of the Seismic Behaviors on *Web-Bolted Connected of Replaceable Shear Link* for Eccentrically Braced *Steel Frame*", *Advance Material Research*, Vol. 1020, hal. 258-263.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan matriks kekakuan elemen *brick* 10x10x10 dengan matlab.

```
%Perhitungan kekakuan balok elemen 10x10x10
syms x y z
>Data Properties
E=20000 %N/mm2
v=0.3
a=5 %mm
b=5 %mm
c=5 %mm

%Determine Matrix D
%v1=1+v
v1=1+v
%v2=1-2v
v2=1-2*v
%Matrix [d]
d=[v1,v,v,0,0,0;
   v,v1,v,0,0,0;
   v,v,v1,0,0,0;
   0,0,0,v2/2,0,0;
   0,0,0,0,v2/2,0;
   0,0,0,0,0,v2/2]

d=
   1.3000    0.3000    0.3000         0         0         0
   0.3000    1.3000    0.3000         0         0         0
   0.3000    0.3000    1.3000         0         0         0
         0         0         0    0.2000         0         0
         0         0         0         0    0.2000         0
         0         0         0         0         0    0.2000

D=(E/(v1*v2))*d
D=
1.0e+04 *
   5.0000    1.1538    1.1538         0         0         0
   1.1538    5.0000    1.1538         0         0         0
   1.1538    1.1538    5.0000         0         0         0
         0         0         0    0.7692         0         0
         0         0         0         0    0.7692         0
         0         0         0         0         0    0.7692

%Determine Shape Function Of Element
%Ni=((a+-x)(b+-y)(c+-z))/8*a*b*c
n1=((-0.5+x)*(-0.5+y)*(0.5+z))/8*a*b*c
n2=((-0.5+x)*(-0.5+y)*(-0.5+z))/8*a*b*c
n3=((-0.5+x)*(0.5+y)*(-0.5+z))/8*a*b*c
```

```

n4=((-0.5+x)*(0.5+y)*(0.5+z))/8*a*b*c
n5=((0.5+x)*(-0.5+y)*(0.5+z))/8*a*b*c
n6=((0.5+x)*(-0.5+y)*(-0.5+z))/8*a*b*c
n7=((0.5+x)*(0.5+y)*(-0.5+z))/8*a*b*c
n8=((0.5+x)*(0.5+y)*(0.5+z))/8*a*b*c

```

```
%Determine Matrix B
```

```
%Differential X
```

```

xn1=diff(n1,x)
xn2=diff(n2,x)
xn3=diff(n3,x)
xn4=diff(n4,x)
xn5=diff(n5,x)
xn6=diff(n6,x)
xn7=diff(n7,x)
xn8=diff(n8,x)

```

```
%Differential Y
```

```

yn1=diff(n1,y)
yn2=diff(n2,y)
yn3=diff(n3,y)
yn4=diff(n4,y)
yn5=diff(n5,y)
yn6=diff(n6,y)
yn7=diff(n7,y)
yn8=diff(n8,y)

```

```
%Differential Z
```

```

zn1=diff(n1,z)
zn2=diff(n2,z)
zn3=diff(n3,z)
zn4=diff(n4,z)
zn5=diff(n5,z)
zn6=diff(n6,z)
zn7=diff(n7,z)
zn8=diff(n8,z)

```

```
B=
```

```

[xn1,0,0,xn2,0,0,xn3,0,0,xn4,0,0,xn5,0,0,xn6,0,0,xn7,0,0,xn8,0,0;
0,yn1,0,0,yn2,0,0,yn3,0,0,yn4,0,0,yn5,0,0,yn6,0,0,yn7,0,0,yn8,0;
0,0,zn1,0,0,zn2,0,0,zn3,0,0,zn4,0,0,zn5,0,0,zn6,0,0,zn7,0,0,zn8;
yn1,xn1,0,yn2,xn2,0,yn3,xn3,0,yn4,xn4,0,yn5,xn5,0,yn6,xn6,0,yn7,xn
7,0,yn8,xn8,0;
0,zn1,yn1,0,zn2,yn2,0,zn3,yn3,0,zn4,yn4,0,zn5,yn5,0,zn6,yn6,0,zn7,
yn7,0,zn8,yn8;
zn1,0,xn1,zn2,0,xn2,zn3,0,xn3,zn4,0,xn4,zn5,0,xn5,zn6,0,xn6,zn7,0,
xn7,zn8,0,xn8]

```

```
B=
```

```

[ (125*(y - 1/2)*(z + 1/2))/8, 0,
0, (125*(y - 1/2)*(z - 1/2))/8, 0,
0, (125*(y + 1/2)*(z - 1/2))/8, 0,
0, (125*(y + 1/2)*(z + 1/2))/8, 0,
0, (125*(y - 1/2)*(z + 1/2))/8, 0,

```

```

0, (125*(y - 1/2)*(z - 1/2))/8, 0,
0, (125*(y + 1/2)*(z - 1/2))/8, 0,
0, (125*(y + 1/2)*(z + 1/2))/8, 0,
0]
[ 0, (125*(x - 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z + 1/2))/8,
0]
[0, 0, (125*(x - 1/2)*(y - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(y - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(y + 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(y + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y + 1/2))/8]
[(125*(x - 1/2)*(z + 1/2))/8, (125*(y - 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(y - 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(y + 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(z + 1/2))/8, (125*(y + 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z + 1/2))/8, (125*(y - 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(y - 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(y + 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(z + 1/2))/8, (125*(y + 1/2)*(z + 1/2))/8,
0]
[ (125*(x - 1/2)*(y - 1/2))/8, (125*(x - 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(y - 1/2))/8, (125*(x - 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(y + 1/2))/8, (125*(x - 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x - 1/2)*(y + 1/2))/8, (125*(x - 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y - 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(z + 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y - 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y + 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(z - 1/2))/8,
0, (125*(x + 1/2)*(y + 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(z + 1/2))/8]
[ (125*(x - 1/2)*(y - 1/2))/8, 0,
(125*(y - 1/2)*(z + 1/2))/8, (125*(x - 1/2)*(y - 1/2))/8,
0, (125*(y - 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(x - 1/2)*(y + 1/2))/8,
0, (125*(y + 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(x - 1/2)*(y + 1/2))/8,
0, (125*(y + 1/2)*(z + 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(y - 1/2))/8,
0, (125*(y - 1/2)*(z + 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(y - 1/2))/8,
0, (125*(y - 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(y + 1/2))/8,
0, (125*(y + 1/2)*(z - 1/2))/8, (125*(x + 1/2)*(y + 1/2))/8,
0, (125*(y + 1/2)*(z + 1/2))/8]

```

$B^T=B'$

$B^T=$

```

[(125*(conj(y) - 1/2)*(conj(z) + 1/2))/8, 0,0, (125*(conj(x) -
1/2)*(conj(z) + 1/2))/8, 0, (125*(conj(x) - 1/2)*(conj(y) -
1/2))/8]

```



```

[0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, 0, (125*(conj(y) -
1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) - 1/2))/8,
0]
[0, 0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) - 1/2))/8, 0, (125*(conj(x) +
1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, (125*(conj(y) - 1/2)*(conj(z) - 1/2))/8]
[ (125*(conj(y) + 1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, 0, 0, (125*(conj(x) +
1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, 0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) +
1/2))/8]
[0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, 0, (125*(conj(y) +
1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) + 1/2))/8,
0]
[0, 0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) + 1/2))/8, 0, (125*(conj(x) +
1/2)*(conj(z) - 1/2))/8, (125*(conj(y) + 1/2)*(conj(z) - 1/2))/8]
[ (125*(conj(y) + 1/2)*(conj(z) + 1/2))/8, 0, 0, (125*(conj(x) +
1/2)*(conj(z) + 1/2))/8, 0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) +
1/2))/8]
[0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(z) + 1/2))/8, 0, (125*(conj(y) +
1/2)*(conj(z) + 1/2))/8, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) + 1/2))/8,
0]
[0, 0, (125*(conj(x) + 1/2)*(conj(y) + 1/2))/8, 0, (125*(conj(x) +
1/2)*(conj(z) + 1/2))/8, (125*(conj(y) + 1/2)*(conj(z) + 1/2))/8]

```

%Find Element Stifness

```

k=BT*D*B
ka=int(k,a,-a)
kb=int(ka,b,-b)
K=int(kb,c,-c)

K= 10^10
[-117.61,   -1.01,    1.01,  -111.56,   -0.95,    0.20,   -
105.82,    -0.19,    0.19,  -111.56,   -0.20,    0.95,   -
115.99,    0.20,  -0.20,   -110.00,    0.19,  -1.01,   -
104.30,    0.95,  -0.95,   -110.00,    1.01,  -0.19]
[-1.01,   -117.61,    1.01,  -0.95,   -111.56,    0.20,  0.19,
-110.00,   -1.01,    0.20,  -115.99,   -0.20,   -0.20,
-111.56,    0.95,  -0.19,   -105.82,    0.19,  0.95,  -104.30,
-0.95,    1.01,  -110.00,   -0.19]
[1.01,    1.01,  -117.61,   -0.20,   -0.20,   -115.99,
-0.19,   -1.01,   -110.00,    0.95,  0.20,  -111.56,    0.20,
0.95,  -111.56,   -1.01,   -0.19,   -110.00,   -0.95,
-0.95,   -104.30,    0.19,  0.19,  -105.82]
[-111.56,  -0.95,   -0.20,   -117.61,   -1.01,   -1.01,
-111.56,  -0.20,   -0.95,   -105.82,   -0.19,   -0.19,
-110.00,    0.19,  1.01,  -115.99,    0.20,  0.20,  -110.00,    1.01,
0.19,  -104.30,    0.95,  0.95]

```

[-0.95, -111.56, -0.20, -1.01, -117.61, -1.01,
 0.20, -115.99, 0.20, 0.19, -110.00, 1.01, -0.19, -
 105.82, -0.19, -0.20, -111.56, -0.95, 1.01,
 -110.00, 0.19, 0.95, -104.30, 0.95]
 [0.20, 0.20, -115.99, -1.01, -1.01, -117.61,
 -0.95, -0.20, -111.56, 0.19, 1.01, -110.00, 1.01,
 0.19, -110.00, -0.20, -0.95, -111.56, -0.19,
 -0.19, -105.82, 0.95, 0.95, -104.30]
 [-105.82, 0.19, -0.19, -111.56, 0.20, -0.95, -
 117.61, 1.01, -1.01, -111.56, 0.95, -0.20, -
 104.30, -0.95, 0.95, -110.00, -1.01, 0.19, -
 115.99, -0.20, 0.20, -110.00, -0.19, 1.01]
 [-0.19, -110.00, -1.01, -0.20, -115.99, -0.20,
 1.01, -117.61, 1.01, 0.95, -111.56, 0.20, -0.95, -
 104.30, -0.95, -1.01, -110.00, -0.19, 0.20,
 -111.56, 0.95, 0.19, -105.82, 0.19]
 [0.19, -1.01, -110.00, -0.95, 0.20, -111.56,
 -1.01, 1.01, -117.61, 0.20, -0.20, -115.99, 0.95,
 -0.95, -104.30, -0.19, 0.19, -105.82, -0.20,
 0.95, -111.56, 1.01, -0.19, -110.00]
 [-111.56, 0.20, 0.95, -105.82, 0.19, 0.19, -111.56, 0.95,
 0.20, -117.61, 1.01, 1.01, -110.00, -1.01, -0.19,
 -104.30, -0.95, -0.95, -110.00, -0.19, -1.01,
 -115.99, -0.20, -0.20]
 [-0.20, -115.99, 0.20, -0.19, -110.00, 1.01, 0.95,
 -111.56, -0.20, 1.01, -117.61, -1.01, -1.01,
 -110.00, 0.19, -0.95, -104.30, 0.95, 0.19, -105.82,
 -0.19, 0.20, -111.56, -0.95]
 [0.95, -0.20, -111.56, -0.19, 1.01, -110.00,
 -0.20, 0.20, -115.99, 1.01, -1.01, -117.61, 0.19,
 -0.19, -105.82, -0.95, 0.95, -104.30, -1.01,
 0.19, -110.00, 0.20, -0.95, -111.56]
 [-115.99, -0.20, 0.20, -110.00, -0.19, 1.01, -
 104.30, -0.95, 0.95, -110.00, -1.01, 0.19, -
 117.61, 1.01, -1.01, -111.56, 0.95, -0.20, -
 105.82, 0.19, -0.19, -111.56, 0.20, -0.95]
 [0.20, -111.56, 0.95, 0.19, -105.82, 0.19, -0.95,
 -104.30, -0.95, -1.01, -110.00, -0.19, 1.01,
 -117.61, 1.01, 0.95, -111.56, 0.20, -0.19, -110.00, -
 1.01, -0.20, -115.99, -0.20]
 [-0.20, 0.95, -111.56, 1.01, -0.19, -110.00, 0.95,
 -0.95, -104.30, -0.19, 0.19, -105.82, -1.01,
 1.01, -117.61, 0.20, -0.20, -115.99, 0.19, -1.01,
 -110.00, -0.95, 0.20, -111.56]
 [-110.00, -0.19, -1.01, -115.99, -0.20, -0.20,
 -110.00, -1.01, -0.19, -104.30, -0.95, -0.95,
 -111.56, 0.95, 0.20, -117.61, 1.01, 1.01, -111.56, 0.20,
 0.95, -105.82, 0.19, 0.19]
 [0.19, -105.82, -0.19, 0.20, -111.56, -0.95,
 -1.01, -110.00, 0.19, -0.95, -104.30, 0.95, 0.95,
 -111.56, -0.20, 1.01, -117.61, -1.01, -0.20, -
 115.99, 0.20, -0.19, -110.00, 1.01]


```

[-1.01,      0.19, -110.00,    0.20, -0.95,      -111.56,    0.19,
  -0.19,      -105.82,   -0.95,      0.95, -104.30,    -0.20,
    0.20, -115.99,    1.01, -1.01,      -117.61,    0.95, -0.20,
  -111.56,    -0.19,    1.01, -110.00]
[-104.30,   0.95, -0.95,      -110.00,   1.01, -0.19,    -
115.99,     0.20, -0.20,      -110.00,   0.19, -1.01,    -
105.82,    -0.19,    0.19, -111.56,   -0.20,    0.95, -
117.61,    -1.01,    1.01, -111.56,   -0.95,    0.20]
[0.95,      -104.30,   -0.95,      1.01, -110.00,   -0.19,
  -0.20,      -111.56,   0.95, -0.19,      -105.82,   0.19,
    0.19, -110.00,   -1.01,    0.20, -115.99,   -0.20,
  -1.01,      -117.61,   1.01, -0.95,      -111.56,   0.20]
[-0.95,    -0.95,   -104.30,   0.19, 0.19, -105.82,   0.20,
  0.95, -111.56,   -1.01,    -0.19, -110.00,   -0.19,
  -1.01,    -110.00,   0.95, 0.20, -111.56,   1.01, 1.01,
  -117.61,   -0.20,   -0.20,   -115.99]
[-110.00,   1.01 0.19 -104.30  0.95 0.95 -110.00  0.19
  1.01 -115.99  0.20 0.20 -111.56  -0.20 -0.95 -
105.82  -0.19 -0.19 -111.56  -0.95 -0.20 -117.61  -1.01
  -1.01]
[1.01,      -110.00,   0.19, 0.95, -104.30,   0.95, -0.19,
  -105.82,    -0.19,   -0.20,   -111.56,   -0.95,
    0.20, -115.99,    0.20, 0.19, -110.00,   1.01, -0.95,
  -111.56,   -0.20,   -1.01,   -117.61,   -1.01]
[-0.19,    -0.19,   -105.82,   0.95, 0.95, -104.30,   1.01,
  0.19, -110.00,   -0.20,   -0.95,   -111.56,   -0.95,
  -0.20,    -111.56,   0.19, 1.01, -110.00,   0.20, 0.20,
  -115.99,   -1.01,   -1.01,   -117.61]

```

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Aulia Indira Kumalasari. Penulis dilahirkan di Banyuwangi, 10 Desember 1994 serta merupakan anak tunggal. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK BA Restu Malang, MIN Malang 1, MTsN Malang 1, dan SMAN 1 Malang. Setelah lulus dari pendidikan SMA tahun 2013, penulis melanjutkan jenjang sarjana (S1) di Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Malang (UMM). Penulis mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S.T) setelah menyelesaikan pendidikan sarjana tahun 2017 dengan menyelesaikan Tugas akhir dengan konsentrasi Manajemen Konstruksi yang berjudul “Alternatif Pemilihan Metode Penjadwalan dan Estimasi Biaya Ptoyek dengan Menggunakan Simulasi Monte Carlo pada Pembangunan Gedung Neo Condotel Batu”. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan jenjang Pascasarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan program studi teknik sipil, bidang keahlian struktur.

Email: auliaindira09@gmail.com

