

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PERILAKU HISTERESIS STRUKTUR RANGKA
BRESING KONSENTRIS KHUSUS DENGAN VARIASI PELAT
SIMPUL TERHADAP BEBAN SIKLIK**

**Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan
Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung**



Disusun Oleh :

Abyan Hafizh Muhandis

NIM : 30202100011

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PERILAKU HISTERESIS STRUKTUR RANGKA BRESING KONSENTRIS KHUSUS DENGAN VARIASI PELAT SIMPUL TERHADAP BEBAN SIKLIK

Diajukan oleh :



Aryan Hafizh Muhandis
NIM : 30202100011

Telah disetujui dan disahkan di Semarang,

2025 :

Tim Penguji :

1. Dr. Ir. H. Sumirin, MS.

NIDN : 0004056302

2. Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.

NIDN: 0605046703

Tanda Tangan :

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.

NIDN: 0625059102

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No. : 59 / A.2 / SA - T / IV / 2025

Pada hari ini tanggal Agustus 2025 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing :

Nama : Dr. Ir. H. Sumirin, MS.

Jabatan Akademik : Lektor

Jabatan : Dosen Pembimbing Pendamping

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut dibawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir ;

Abyan Hafizh Muhandis

NIM : 30202100011

Judul : "ANALISIS PERILAKU HISTERESIS STRUKTUR RANGKA
BRESING KONSENTRIS KHUSUS DENGAN VARIASI PELAT SIMPUL
TERHADAP BEBAN SIKLIK"

Dengan tahapan sebagai berikut :

No.	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan Dosen Pembimbing	16/04/2025	ACC
2	Seminar Proposal	10/07/2025	
3	Pengumpulan Data	11/07/2025	
4	Analisis Data	15/07/2025	
5	Penyusunan Laporan	17/07/2025	
6	Selesai Laporan	13/08/2025	ACC

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan

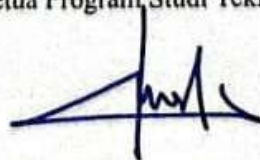
Mengetahui,

Dosen Pembimbing

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Dr. Ir. H. Sumirin, MS.



Muhammad Rusli Ahyar, ST., M. Eng.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

1. Nama : Abyan Hafizh Muhandis

NIM : 30202100011

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

ANALISIS PERILAKU HISTERESIS STRUKTUR RANGKA BRESING
KONSENTRIS KHUSUS DENGAN VARIASI PELAT SIMPUL TERHADAP
BEBAN SIKLIK

benar bebas dari plagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku. Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

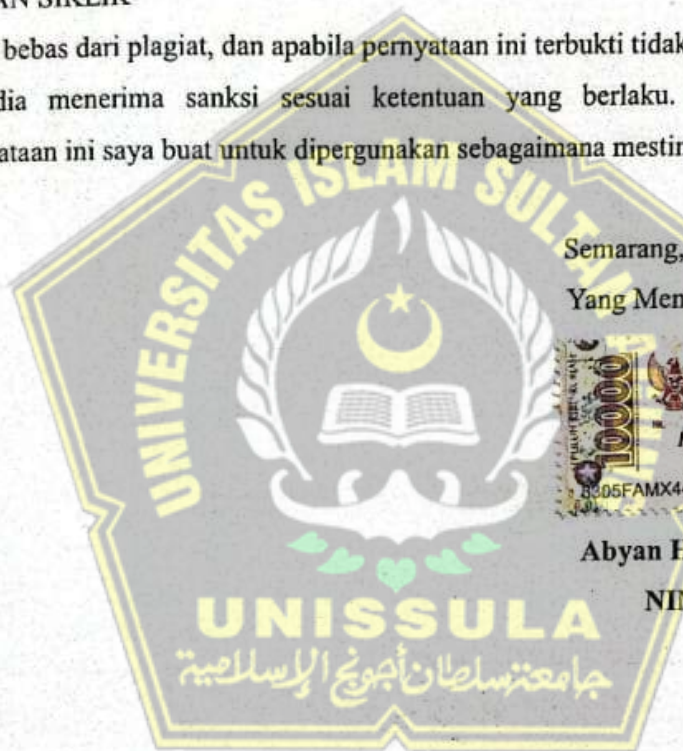
Semarang, Agustus 2025

Yang Membuat Pernyataan,



Abyan Hafizh Muhandis

NIM : 30202100011



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

1. Nama : Abyan Hafizh Muhandis

NIM : 30202100011

Judul : ANALISIS PERILAKU HISTERESIS STRUKTUR RANGKA BRESING KONSENTRIS KHUSUS DENGAN VARIASI PELAT SIMPUL TERHADAP BEBAN SIKLIK

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran, dan pemaparan saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka kami bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Semarang, Agustus 2025

Yang Membuat Pernyataan,



Abyan Hafizh Muhandis

NIM : 30202100011

MOTTO

“Maka nikmat Tuhanmu yang manakah yang kamu dustakan?”

(Q.S. Ar-Rahman: 13)

“Sesungguhnya urusan-Nya apabila Dia menghendaki sesuatu hanyalah berkata kepadanya: ‘Jadilah!’ Maka jadilah ia.”

(Q.S. Yasin: 82)

“Tidaklah mungkin bagi matahari mengejar bulan dan malam pun tidak dapat mendahului siang. Masing-masing beredar pada garis edarnya.”

(Q.S. Yasin: 40)

“Allah mempergantikan malam dan siang. Sungguh, pada yang demikian itu terdapat pelajaran.”

(Q.S. An-Nur: 44)

“There are no secrets about the world of nature. There are secrets about the thoughts and intentions of men.”

(J. Robert Oppenheimer)

“The most incomprehensible thing about the universe is that it is comprehensible.”

(Albert Einstein)

“I didn’t think. I investigated.”

(Wilhelm Rontgen)

“Ilmu pengetahuan dan iman adalah dua hal yang harus berjalan berdampingan. Iman tanpa ilmu bagaikan lentera di siang hari, dan ilmu tanpa iman adalah bagaikan lentera di malam hari tapi tak memiliki arah.”

(Bacharuddin Jusuf Habibie)

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, kami memohon pertolongan, pengampunan serta petunjuk-Nya. Serta Shalawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Dengan ini, saya persembahkan laporan Tugas Akhir ini kepada :

1. Ayah dan ibu tercinta, yang tak pernah lelah mendoakan dan menjadi cahaya langkah dalam setiap keputusan dan perjuangan. Terima kasih atas cinta kesabaran, dan pengorbanan yang tak terhitung sejak awal.
2. Saudara-saudaraku dan sahabat seperjuangan, yang selalu hadir memberi semangat, tawa, dan bahu saat jatuh. Terima kasih telah menjadi bagian dari cerita panjang ini.
3. Bacharuddin Jusuf Habibie, yang sejak saya kecil telah menjadi teladan dalam menjembatani ilmu dan iman. Semangat beliau dalam berkarya untuk bangsa menjadi nyala motivasi hingga halaman ini terwujud.
4. Bapak Dr. Ir. H. Sumirin, MS., yang dengan sabar membimbing, mengarahkan, dan mendorong untuk terus berpikir kritis dan berproses secara ilmiah. Terima kasih atas waktu dan ilmunya.
5. Bapak Taufiq Adi Wijoyo, ST., M. Eng., yang telah banyak membantu, menginspirasi, dan memberi masukan praktis selama saya berproses.
6. Diriku sendiri, atas keberanian untuk betahan di tengah keraguan, dan tekad untuk terus berjalan walau pelan.

Abyan Hafizh Muhandis

NIM : 30202100011

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “Analisis Perilaku Histeresis Struktur Rangka Bresiing Konsentris Khusus Dengan Variasi Pelat Simpul Terhadap Beban Siklik” guna untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

1. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST., MT. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang;
2. Bapak Muhammad Rusli Ahyar ST., M. Eng. Selaku Ketua Program Studi Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah membantu dalam urusan akademik.
3. Bapak Dr. Ir. H. Sumirin, MS. Selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan wawasan ilmu pengetahuan kepada penulis selama menulis skripsi ini;
4. Seluruh Dosen Program Studi Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan wawasan ilmu pengetahuan selama menempuh Program Studi S-1 Teknik Sipil.

Akhir ini dapat bermanfaat baik bagi penulis maupun para pembaca.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Semarang, Agustus 2025

Penulis

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN	v
MOTTO.....	vi
PERSEMBAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
ABSTRAK	xvi
 BAB I : PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan Laporan	4
 BAB II : TINJAUAN PUSTAKA.....	 6
2.1 Pengertian Struktur Baja Tahan Gempa	6
2.2 Baja Struktural	7
2.2.1 Pengertian Baja	7
2.2.2 Jenis Material Baja	7
2.2.3 Jenis Profil Baja	9
2.3 Sifat Mekanik Material	13
2.3.1 Tegangan	13
2.3.2 Regangan.....	13
2.3.3 Elastisitas dan Plastisitas.....	14
2.3.4 Titik Luluh.....	14
2.3.5 Tegangan <i>Von Mises</i>	14
2.4 Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK).....	16
2.4.1 Persyaratan Bresing.....	17
2.4.2 Persyaratan Balok dan Kolom.....	17
2.4.3 Desain Sambungan RBKK.....	18
2.5 Sistem Sambungan Struktur Baja.....	20
2.5.1 Jenis Sambungan Prakualifikasi.....	21
2.5.2 Jenis Sambungan Pelat simpul pada RBKK	25
2.5.3 Metode Perancangan	27
2.6 Beban Siklik	28
2.6.1 Pengertian Beban Siklik.....	28
2.6.2 Karakteristik Histeresis pada Rangka Bresing Konsentris Khusus.....	29
2.6.3 Protokol FEMA 461	30

2.7 Mekanisme Sendi Plastis pada Struktur Baja.....	31
2.8 Kajian Terdahulu	32

BAB III : METODE PERANCANGAN.....	36
3.1 Pendahuluan	36
3.2 Pengumpulan Data	36
3.2.1 Data Geometri Struktur.....	36
3.2.2 Data Material.....	38
3.2.3 Data Sambungan	41
3.2.4 Data Pembebanan.....	50
3.3 Permodelan dan Analisis Numerik.....	51
3.3.1 Permodelan Tiap <i>Part</i>	51
3.3.2 Permodelan Material	58
3.3.3 Definisi Perakitan, Interaksi, dan Sambungan	61
3.3.4 Definisi <i>Step</i>	67
3.3.5 <i>Meshing</i>	69
3.3.6 Kondisi Batas dan Tumpuan	71
3.3.7 <i>Geometry Imperfection</i>	72
3.3.8 Prosedur Pembebanan.....	74
3.3.9 Pembuatan <i>Job</i> dan Simulasi	77
3.4 Bagan Alur Penelitian	79

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN	82
4.1 Perilaku Umum Struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus	82
4.2 Perbandingan Perilaku Histeresis Antar Variasi Pelat Simpul	82
4.2.1 Fenomena Tiap Spesimen	82
4.2.2 Analisis Kurva Histeresis Global antar Variasi Pelat Simpul.....	106
4.2.3 Perbandingan Kinerja Ketiga Spesimen terhadap Struktur Rangka Momen Khusus (RMK).....	125
4.3 Kurva <i>Back Bone</i>	129
4.3.1 Spesimen 1 (SP-01).....	129
4.3.2 Spesimen 2 (SP-02).....	130
4.3.3 Spesimen 3 (SP-03).....	131
4.3.4 Analisis Perbandingan.....	132

BAB V : KESIMPULAN	134
5.1 Kesimpulan	134
5.2 Saran.....	135

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Mutu Material Baja sesuai standar ASTM.....	9
Tabel 2.2 Sambungan Momen Terprakualifikasi (SNI 7972:2020).....	21
Tabel 2.3 Kajian Terdahulu.....	33
Tabel 3.1 Parameter Material dengan <i>kinematic hardening parameter</i>	39
Tabel 3.2 Parameter Material Isotropic Cyclic Hardening	40
Tabel 4.1 Fenomena tiap spesimen.....	105
Tabel 4.2 Tahapan Perilaku Kurva Histeresis Spesimen 1 Berdasarkan Rentang Siklus.....	111
Tabel 4.3 Tahapan Perilaku Kurva Histeresis Spesimen 2 Berdasarkan Rentang Siklus.....	115
Tabel 4.4 Tahapan Perilaku Kurva Histeresis Spesimen 3 Berdasarkan Rentang Siklus.....	120
Tabel 4.5 Perbandingan Karakteristik Kurva Histeresis Antar Spesimen	125
Tabel 4.6 Rekapitulasi Perilaku Histeresis Struktur.....	128
Tabel 4.7 Hasil Kapasitas Base Shear Maksimum dan Rasio Tiap Spesimen....	133



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Profil Baja IWF dan H.....	10
Gambar 2.2 Profil C.....	10
Gambar 2.3 Profil Baja Equal Angle	11
Gambar 2.4 Profil Baja Unequal Angle	11
Gambar 2.5 Profil Tee Section.....	12
Gambar 2.6 Profil Hollow Structural Section	12
Gambar 2.7 Diagram Tegangan Normal.....	15
Gambar 2.8 Diagram Tegangan Geser.....	15
Gambar 2.9 Diagram tegangan von mises	16
Gambar 2.10 Penampang Balok Tereduksi (PBR)	22
Gambar 2.11 Pelat Ujung di Perpanjang Berbaut Tanpa Pengaku dan dengan Pengaku.....	23
Gambar 2.12 Pelat Sayap Berbaut (PSB)	23
Gambar 2.13 Sayap di Las Tanpa Penguat-Badan di Las (SLTKBL)	23
Gambar 2.14 Braket Kaiser Berbaut (BKB).....	24
Gambar 2.15 Sambungan Momen ConXtech ConXL.....	24
Gambar 2.16 Sambungan Momen SidePlate	24
Gambar 2.17 Sambungan Momen Simpson Strong-Tie Strong Frame	24
Gambar 2.18 Sambungan Momen T Ganda	25
Gambar 2.19 Clearance Requirement dari Tapered Gusset Plate.....	27
Gambar 2.20 Sketsa displacement-controlled loading history	29
Gambar 2.21 Kurva Histeresis Special Concentrically Braced Frame.....	30
Gambar 2.22 Contoh sistem instrumentasi dan akuisisi data	31
Gambar 2.23 Perilaku Inelastis Struktur Rangka Bresing Konsentrik	32
Gambar 3.1 Profil kolom H 400x400x20x42	37
Gambar 3.2 Profil balok WF 600x300x15x25	38
Gambar 3.3 Profil HSS 150x10.....	38
Gambar 3.4 Perilaku plastisitas material ASTM A572 Gr. 50 dengan <i>kinematic hardening half cycle</i>	39
Gambar 3.5 Perilaku plastisitas material dengan <i>kinematic hardening parameter</i>	39
Gambar 3.6 Perilaku plastisitas material dengan <i>isotropic cyclic hardening</i>	40
Gambar 3.7 Kurva Equivalent Plastic Strain to Failure vs Stress Triaxiality.....	41
Gambar 3.8 Detail Sambungan Bresing-Kolom spesimen 1 dan 2	42
Gambar 3.9 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Kolom spesimen 1 dan 2	42
Gambar 3.10 Detail Sambungan Bresing-Kolom spesimen 3	43
Gambar 3.11 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Kolom spesimen 3	43
Gambar 3.12 Detail Sambungan Bresing-Balok-Kolom spesimen 1 dan 2	44
Gambar 3.13 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Balok-Kolom spesimen 1 dan 2	44
Gambar 3.14 Detail Sambungan Bresing-Balok-Kolom spesimen 3	45
Gambar 3.15 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Balok-Kolom spesimen 3	45
Gambar 3.16 Detail Sambungan Bresing-Balok spesimen 1	46
Gambar 3.17 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Balok spesimen 1	46
Gambar 3.18 Sambungan Bresing-Balok Spesimen 2.....	47

Gambar 3.19 Tampilan 3D Bresing-Balok Spesimen 2.....	47
Gambar 3.20 Sambungan Bresing-Balok Spesimen 3.....	48
Gambar 3.21 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Balok spesimen 3	48
Gambar 3.22 Detail Sambungan Balok-Kolom.....	49
Gambar 3.23 Sambungan Balok-Kolom	49
Gambar 3.24 Beban siklik berdasarkan displacement-controlled untuk SCBF (Sumber : <i>Uriz & Mahin</i> , 2008).....	50
Gambar 3.25 Pembebanan yang akan digunakan pada spesimen	51
Gambar 3.26 Permodelan Kolom	52
Gambar 3.27 Permodelan Balok.....	52
Gambar 3.28 Permodelan Bresing.....	53
Gambar 3.29 Tampilan Jendela dari Pembuatan Part Beserta Tipe Elemen.....	53
Gambar 3.30 Tampilan Jendela dari Pembuatan Sketsa Part	54
Gambar 3.31 Tampilan Jendela dari Ekstrusi Sketsa Part	54
Gambar 3.32 Permodelan Endplate Balok Lantai 2	55
Gambar 3.33 Permodelan Endplate Balok Lantai 3	56
Gambar 3.34 Permodelan Pelat Pengaku pada Balok	56
Gambar 3.35 Permodelan Gusset Plate	57
Gambar 3.36 Tampilan Jendela dari Pembuatan Part Beserta Tipe Elemen.....	57
Gambar 3.37 Tampilan Jendela dari Pembuatan Sketsa Part	58
Gambar 3.38 Tampilan Jendela Penyuntingan Material.....	59
Gambar 3.39 Tampilan Jendela Data Material yang dapat didefinisikan	59
Gambar 3.40 Tampilan Jendela Penyuntingan Bagian Penampang	60
Gambar 3.41 Tampilan Jendela Penyuntingan Penentuan Penampang	60
Gambar 3.42 Perakitan Komponen pada Model Perangkat Lunak FEM	61
Gambar 3.43 Visualisasi perakitan SCBF spesimen 1.....	62
Gambar 3.44 Visualisasi perakitan SCBF spesimen 2.....	62
Gambar 3.45 Visualisasi perakitan SCBF spesimen 3.....	63
Gambar 3.46 Tampilan Jendela Create Constraint	63
Gambar 3.47 Tampilan Jendela Edit Constraint untuk Tie Constraint	64
Gambar 3.48 Menu Special pada Perangkat Lunak Numerik	65
Gambar 3.49 Tampilan Jendela Create Springs/Dashpot	65
Gambar 3.50 Tampilan Jendela Edit Springs/Dashpot.....	66
Gambar 3.51 Tampilan Jendela Create Constraint	66
Gambar 3.52 Tampilan Jendela Edit Constraint untuk MPC Constraint.....	67
Gambar 3.53 Letak Create Step pada modul Step.....	67
Gambar 3.54 Tampilan Jendela Create Step.....	68
Gambar 3.55 Tampilan Jendela Edit Step.....	68
Gambar 3.56 Tampilan Jendela Edit Step.....	69
Gambar 3.57 Tampilan User Interface Perangkat Lunak Numerik	70
Gambar 3.58 Opsi Seed Part pada Perangkat Lunak Numerik.....	70
Gambar 3.59 Tampilan Jendela Global Mesh pada Perangkat Lunak Numerik..	70
Gambar 3.60 Letak Create Boundary Condition pada modul Load	71
Gambar 3.61 Tampilan Jendela Create Boundary Condition	71
Gambar 3.62 Tampilan Jendela Edit Boundary Condition.....	72
Gambar 3.63 Buckling mode 1-4 spesimen 1.....	73
Gambar 3.64 Buckling mode 1-4 spesimen 2.....	73
Gambar 3.65 Buckling mode 1-4 spesimen 3.....	73

Gambar 3.66 Menu Tools dan Amplitude pada Perangkat Lunak Numerik.....	74
Gambar 3.67 Tampilan Jendela Create Amplitude	75
Gambar 3.68 Tampilan Jendela Edit Amplitude	75
Gambar 3.69 Letak Create Boundary Condition pada modul Load	76
Gambar 3.70 Tampilan Jendela Create Boundary Condition	76
Gambar 3.71 Tampilan Jendela Edit Boundary Condition	77
Gambar 3.72 Letak Create Job pada Modul Job	77
Gambar 3.73 Tampilan Jendela Create Job	78
Gambar 3.74 Tampilan Jendela Edit Job	78
Gambar 4.1 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (Loading 0,20625% Story Drift).....	83
Gambar 4.2 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (Loading 0,5% Story Drift)	84
Gambar 4.3 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (Loading 1% Story Drift)	85
Gambar 4.4 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (Loading 1,5% Story Drift)	86
Gambar 4.5 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (Loading 2 % Story Drift)	87
Gambar 4.6 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (Loading 2,5% Story Drift)	88
Gambar 4.7 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 setelah Unloading	89
Gambar 4.8 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (Loading 0,20625% Story Drift).....	90
Gambar 4.9 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (Loading 0,5% Story Drift)	91
Gambar 4.10 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (Loading 1% Story Drift)	92
Gambar 4.11 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (Loading 1,5% Story Drift).....	93
Gambar 4.12 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (Loading 2% Story Drift)	94
Gambar 4.13 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (Loading 2,5% Story Drift).....	95
Gambar 4.14 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 setelah Unloading	96
Gambar 4.15 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (Loading 0,20625% Story Drift).....	98
Gambar 4.16 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (Loading 0,5% Story Drift).....	99
Gambar 4.17 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (Loading 1% Story Drift)	100
Gambar 4.18 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (Loading 1,5% Story Drift).....	101
Gambar 4.19 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (Loading 2% Story Drift)	102

Gambar 4.20 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (Loading 2,5% Story Drift).....	103
Gambar 4.21 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada spesimen 3 setelah unloading.....	104
Gambar 4.22 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 1-6.....	107
Gambar 4.23 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 7-10.....	108
Gambar 4.24 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 11-14.....	108
Gambar 4.25 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 15-16.....	109
Gambar 4.26 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 17-18.....	109
Gambar 4.27 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 19-20.....	110
Gambar 4.28 Kurva Histeresis Spesimen 1.....	110
Gambar 4.29 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 1-6.....	112
Gambar 4.30 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 7-10.....	112
Gambar 4.31 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 11-14.....	113
Gambar 4.32 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 15-16.....	113
Gambar 4.33 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 17-18.....	114
Gambar 4.34 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 19-20.....	114
Gambar 4.35 Kurva Histeresis Spesimen 2.....	115
Gambar 4.36 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 1-6.....	116
Gambar 4.37 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 7-10.....	117
Gambar 4.38 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 11-14.....	117
Gambar 4.39 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 15-16.....	118
Gambar 4.40 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 17-18.....	118
Gambar 4.41 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 19-20.....	119
Gambar 4.42 Kurva Histeresis Spesimen 3.....	119
Gambar 4.43 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 1-6...	121
Gambar 4.44 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 7-10.	122
Gambar 4.45 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 11-14	122
Gambar 4.46 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 15-16	123
Gambar 4.47 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 17-18	123
Gambar 4.48 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 19-20	124
Gambar 4.49 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen.....	124
Gambar 4.50 Kurva Histeresis RMK.....	126
Gambar 4.51 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen dengan Struktur Acuan.....	127
Gambar 4.52 Kurva Back Bone Spesimen 1.....	129
Gambar 4.53 Kurva Back Bone Spesimen 2.....	130
Gambar 4.54 Kurva Backbone Spesimen 3.....	131
Gambar 4.55 Perbandingan Antara Kurva Backbone Antar Spesimen.....	132

ANALISIS PERILAKU HISTERESIS STRUKTUR RANGKA BRESING KONSENTRIK KHUSUS DENGAN VARIASI PELAT SIMPUL TERHADAP BEBAN SIKLIK

Abstrak

Sistem struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) merupakan salah satu alternatif efektif dalam mendesain bangunan tahan gempa karena mampu meningkatkan kapasitas lateral dan kontrol *drift*. Namun, performanya sangat dipengaruhi oleh konfigurasi elemen pendukung, salah satunya adalah pelat simpul yang menjadi titik transisi antara bresing dan rangka utama. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku histeresis struktur RBKK dengan tiga variasi kekakuan pelat simpul terhadap pembebanan siklik, serta membandingkannya dengan struktur acuan tanpa bresing.

Metode yang digunakan berupa simulasi numerik menggunakan analisis elemen hingga. Model struktur terdiri dari balok, kolom, dan bresing dengan sambungan baut *Eight Bolted Stiffened (8ES)* serta variasi pelat simpul yang menghasilkan karakteristik semi-rigid hingga rigid. Analisis dilakukan dengan pendekatan pembebanan siklik *quasi-static*. Parameter utama yang diamati meliputi respons kurva histeresis, *backbone curve*, dan fenomena struktural yang muncul selama proses pembebanan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa semua specimen RBKK mampu menahan beban lateral secara signifikan dibandingkan struktur acuan (tanpa bresing). Spesimen dengan pelat simpul paling rigid memiliki kapasitas *base shear* tertinggi namun menunjukkan degradasi kekuatan lebih cepat. Sebaliknya, specimen semi-rigid menunjukkan kurva histeresis yang relatif stabil. *Backbone curve* dari tiap specimen menunjukkan variasi pola pasca puncak yang mencerminkan karakteristik plastisitas masing-masing konfigurasi.

Kata kunci : *Rangka Bresing Konsentris Khusus; beban siklik; kurva histeresis; backbone curve.*

HYSTERETIC BEHAVIOR ANALYSIS OF SPECIAL CONCENTRICALLY BRACED FRAME STRUCTURES WITH GUSSET PLATE VARIATIONS UNDER CYCLIC LOADING

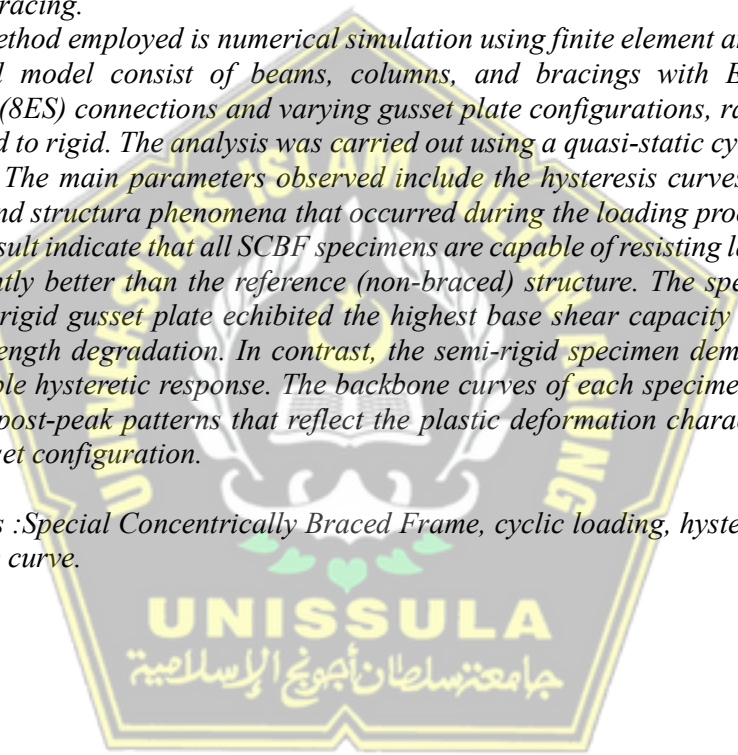
Abstract

The Special Concentrically Braced Frame (SCBF) system is one of the effective alternatives in designing earthquake-resistant building due to its ability to enhance lateral strength and control drift. However, its performance is highly influenced by the configuration of supporting elements, one of which is the gusset plate that serves as the transition zone between the bracing and the main frame. This study aims to analyze the hysteretic behavior of SCBF structures with three levels of gusset plate stiffness under cyclic loading, and to compare them with a reference structure without bracing.

The method employed is numerical simulation using finite element analysis. The structural model consists of beams, columns, and bracings with Eight-Bolted Stiffened (8ES) connections and varying gusset plate configurations, ranging from semi-rigid to rigid. The analysis was carried out using a quasi-static cyclic loading protocol. The main parameters observed include the hysteresis curves, backbone curves, and structural phenomena that occurred during the loading process.

The results indicate that all SCBF specimens are capable of resisting lateral loads significantly better than the reference (non-braced) structure. The specimen with the most rigid gusset plate exhibited the highest base shear capacity but showed faster strength degradation. In contrast, the semi-rigid specimen demonstrated a more stable hysteretic response. The backbone curves of each specimen presented different post-peak patterns that reflect the plastic deformation characteristics of each gusset configuration.

Keywords : *Special Concentrically Braced Frame, cyclic loading, hysteresis curve, backbone curve.*



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konstruksi telah menjadi bagian penting dalam membangun peradaban manusia sepanjang sejarah, namun saat ini muncul tantangan baru dengan meningkatnya pembangunan gedung-gedung tinggi di area perkotaan. Tantangan yang paling serius terjadi saat gempa bumi, ketika percepatan tanah mempengaruhi struktur bangunan dan menciptakan gaya inersia yang mengakibatkan pergerakan lateral (Munteanu et al., 2025). Amerika Serikat yang berada di kawasan dengan aktivitas seismik tinggi, terutama sepanjang San Andreas Fault di California, zona subduksi Cascadia di Pacific Northwest, dan New Madrid Seismic Zone di Midwest, dimana peta bahaya seismik probabilistik USGS menunjukkan percepatan tanah puncak (PGA) dengan peluang terlampaui 2% dalam 50 tahun mencapai 0,6-0,8 g di banyak wilayah barat AS. Peristiwa gempa bersejarah seperti Northridge 1994 menegaskan kebutuhan akan perancangan struktur yang mampu menahan deformasi plastis dan beban lateral. Pergeseran lateral ini merupakan indikator penting dari kekuatan struktur dan berhubungan erat dengan mekanisme kerusakan struktural. Ketika pergeseran ini menciptakan gaya internal yang melampaui batas elastis komponen struktur, kerusakan akan terjadi. Hal ini dapat mengancam fungsi bangunan atau, dalam situasi yang lebih parah, menyebabkan bangunan runtuh.

Ketika terjadi gempa besar, struktur baja tahan gempa dirancang untuk mengabsorpsi energi gempa secara efisien melalui pembentukan sendi plastis pada bagian-bagian tertentu yang berfungsi sebagai "sekring". Komponen sekring ini harus didesain untuk mampu mengalami deformasi inelastis yang signifikan sebelum mengalami patah atau ketidakstabilan. Sementara itu, elemen-elemen struktur lainnya dibuat lebih kuat dibandingkan sekring, sehingga proses penyerapan energi dapat dipusatkan pada area sekring dengan cara yang terkontrol dan stabil (Moestopo, 2012).

Sambungan baja prakualifikasi lahir dari kegagalan struktural yang terungkap saat gempa Northridge 1994, ketika sambungan las sudut yang dianggap daktil mengalami kegagalan rapuh pada lebih dari 200 bangunan. Penemuan mengejutkan

ini mendorong FEMA mendanai program penelitian besar-besaran untuk mengevaluasi berbagai tipe sambungan di bawah beban siklik yang merepresentasikan kondisi gempa.

Protokol pengetesan beban siklik dirancang untuk mengevaluasi karakteristik kinerja komponen yang perilakunya ditentukan oleh gaya seismik atau perpindahan akibat aktivitas seismik. Dalam metodologi ini, dampak gempa dapat disimulasikan melalui penerapan beban siklik berkecepatan/berdeformasi rendah yang mengikuti pola yang sudah ditetapkan. Protokol ini memiliki kegunaan yang luas dalam menghasilkan data kerapuhan untuk berbagai komponen struktural. Selain itu, protokol ini juga bermanfaat untuk mendapatkan data berupa hubungan gaya-deformasi dan data perilaku histeresis komponen struktural, yang merupakan informasi penting untuk analisis dan evaluasi struktural.

Pendekatan terkini untuk mewujudkan struktur yang kokoh menitikberatkan pada perancangan bangunan yang menjamin kelancaran fungsi hanya dalam kasus peristiwa ekstrem dengan periode ulang yang singkat. Ketika mempertimbangan peristiwa yang lebih merusak, pertimbangan ekonomi menyebabkan tujuan utama beralih pada penjaminan keselamatan penghuni, dengan mengorbankan keutuhan fungsi dan struktur. Dalam situasi semacam ini, kerusakan menyeluruh pada komponen struktural dan non-struktural, serta ketidakberfungsian bangunan untuk sementara waktu, dianggap masih dapat diterima. Pada intinya, unsur struktural dirancang untuk menyerap sebagian besar energi internal yang dihasilkan oleh gerakan seismik melalui deformasi inelastis, yang berwujud energi histeresis yang termanifestasi dalam kerusakan struktural. Pentingnya penggunaan analisis dinamis nonlinier baru-baru ini ditekankan untuk meneliti respons struktural dalam kondisi beban ekstrem.

Meskipun sistem struktur baja tahan gempa, khususnya Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK), telah banyak diterapkan dan dikaji di negara-negara maju seperti Amerika Serikat dan Jepang, penerapan sistem ini di kawasan Asia Tenggara, termasuk Indonesia, masih relatif jarang dilakukan studi mendalam, terutama dengan pendekatan simulasi numerik berbasis analisis nonlinier. Padahal, kompleksitas karakteristik gempa di wilayah Indonesia serta peningkatan

pembangunan gedung baja di perkotaan menuntut adaptasi desain RBKK yang sesuai dengan kondisi lokal.

Studi terkait perilaku histeresis RBKK di bawah beban siklik di Indonesia umumnya masih terbatas pada uji empiris skala kecil atau analisis linier. Penelitian ini berupaya menjawab kebutuhan tersebut dengan melakukan simulasi numerik yang mampu menangkap respons nonlinier material dan geometri, sekaligus membandingkan pengaruh mutu baja terhadap performa seismik. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis terhadap pengembangan pedoman desain struktur baja tahan gempa di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam menyusun Tugas Akhir ini terdapat beberapa masalah yang muncul yang harus dihadapi antara lain:

- a. Apakah konfigurasi RBKK memiliki performa histeresis yang lebih unggul dibandingkan RMK tanpa bresing dalam pembebanan siklik?
- b. Bagaimana pengaruh variasi desain sambungan pelat simpul terhadap kapasitas disipasi energi pada Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) sesuai dengan AISC 341-16 ketika dibebani secara siklik?
- c. Bagaimana bentuk kurva histeresis yang dihasilkan dari masing-masing desain sambungan pelat simpul?
- d. Bagaimana pola kerusakan dan mekanisme terbentuknya sendi plastis pada variasi sambungan pelat simpul struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) saat mengalami beban siklik?

1.3 Tujuan

Tujuan penyusunan Tugas Akhir ini antara lain :

- a. Membandingkan perilaku histeresis antara struktur RMK dan RBKK, khususnya dalam hal disipasi energi, kekakuan lateral, dan degradasi kekuatan.
- b. Menganalisis pengaruh variasi desain sambungan pelat simpul terhadap kapasitas disipasi energi pada struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) di bawah beban siklik;

- c. Mengevaluasi kurva histeresis dan perilaku inelastis struktur RBKK dengan berbagai desain sambungan pelat simpul;
- d. Mengidentifikasi pola kerusakan dan terbentuknya sendi plastis pada RBKK akibat beban siklik.

1.4 Batasan Masalah

Di dalam penulisan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Analisis Histeresis Pembebanan Siklik pada *Chevron Braced Frame*” dengan beberapa masalah yang perlu diperhatikan dalam penyusunan Tugas Akhir ini antara lain :

- a. Penelitian ini hanya membahas struktur baja dua lantai;
- b. Jenis struktur yang dianalisis adalah Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) dengan variasi yang terbatas pada desain sambungan pelat simpul;
- c. Simulasi beban siklik dilakukan secara *quasi-static* menggunakan perangkat lunak FEM dengan *displacement controlled*;
- d. Beban siklik diberikan pada lantai 2 dengan protokol FEMA 461;
- e. Material yang digunakan adalah ASTM A572 Gr. 50 untuk elemen balok dan kolom serta ASTM A500 Gr. B untuk elemen bresing;
- f. Analisis difokuskan pada respons global dan lokal struktur terhadap beban lateral, kapasitas disipasi energi, kurva histeresis, dan pola kerusakan sambungan tanpa mempertimbangkan pengaruh beban vertikal tambahan seperti beban vertikal terfaktor;
- g. Faktor-faktor seperti degradasi material akibat korosi, dan efek temperatur tidak dimasukkan dalam model analisis.

1.5 Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan yang akan disusun pada Tugas Akhir ini, penyusun terbagi menjadi 5 (lima) bab yaitu sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan dari penyusunan Tugas Akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan mengenai teori, rumus, dan segala sesuatu yang dibutuhkan penyusun sesuai dengan judul untuk menyelesaikan Tugas Akhir.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode pengumpulan data, pengelolaan data, serta sistematika perencanaan yang akan digunakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan tentang hasil dan pembahasan dari penyusunan Tugas Akhir.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang menjawab tujuan yang telah di tulis serta saran yang dapat diberikan untuk melanjutkan penulisan yang sudah dikerjakan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Struktur Baja Tahan Gempa

Indonesia, negeri kepulauan yang terletak di Cincin Api Pasifik, menghadapi tantangan alam yang tak terelakkan. Dengan posisi geografis yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia-Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik-negeri ini telah menjadi saksi bisu berbagai peristiwa gempa bumi yang menyebabkan kehancuran dan kehilangan nyawa yang tak terhitung. Sebagai perencana bangunan yang bertanggung jawab untuk menciptakan konstruksi yang kuat, kaku, dan aman, memahami berbagai alternatif desain struktur tahan gempa menjadi kewajiban profesional.

Baja memiliki keunggulan alami dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, menghasilkan struktur yang relatif ringan yang merupakan aspek penting dalam desain bangunan tahan gempa. Material baja juga memiliki karakteristik berkekuatan tinggi, relatif kaku, dan sangat daktil. Sifat daktilitas ini merupakan persyaratan ideal untuk menghadapi beban yang tidak terduga seperti gempa.

Keunggulan tambahan konstruksi baja terletak pada kualitasnya yang seragam karena diproduksi di pabrik dengan sistem kontrol mutu. Komponen baja memiliki ukuran dan bentuk yang terstandarisasi, dibuat terpisah dan baru dirakit di lokasi konstruksi. Meskipun sistem ini memiliki keterbatasan dalam menciptakan struktur monolit dan memerlukan detail sambungan yang baik, kondisi ini justru dapat dimanfaatkan dengan merancang detail khusus yang memungkinkan perbaikan terfokus pada bagian yang rusak akibat gempa tanpa harus mengganti seluruh struktur.

Faktor-faktor tersebut mendorong berkembangnya berbagai variasi sistem struktur tahan gempa pada konstruksi baja dibandingkan dengan material konstruksi lainnya. Karakteristik inilah yang menjadikan struktur baja sebagai pilihan utama untuk dipelajari dalam pengembangan bangunan tahan gempa yang andal.

2.2 Baja Struktural

2.2.1 Pengertian Baja

Baja struktural merupakan paduan logam berbasis besi yang mengandung karbon dalam jumlah terkendali, umumnya kurang dari 0,25%. Selain itu, baja juga mengandung unsur-unsur lain seperti mangan, kromium, aluminium, vanadium, molibdenum, niobium, dan tembaga dalam kadar jejak. Unsur-unsur paduan tersebut berperan penting dalam mengendalikan ukuran butir mikrostruktur baja, yang pada akhirnya memengaruhi sifat mekaniknya, termasuk peningkatan kekuatan, daktilitas, serta ketangguhan terhadap retak (*fracture toughness*) (MacGinley, 2002).

Menurut SNI 1729:2020 yang mengacu pada AISC 360-16, baja struktural harus memenuhi kriteria mutu bahan tertentu yang meliputi batas leleh minimum, kuat tarik maksimum, modulus elastisitas, dan rasio perpanjangan.

2.2.2 Jenis Material Baja

Beberapa jenis material baja struktural yang umum digunakan meliputi :

a. ASTM A36

ASTM A36 merupakan salah satu baja struktural paling umum dan telah digunakan luas sejak lama. ASTM A36 ini merupakan plat baja karbon yang memenuhi standar spesifikasi dari *American Society for Testing and Materials* (ASTM) dengan klasifikasi A36. Standar ini menetapkan komposisi kimia, sifat mekanis, dan toleransi dimensi untuk baja karbon struktural. Material ini memiliki kuat leleh minimum sebesar 250 MPa dan dikenal karena kemudahannya dalam proses fabrikasi dan pengelasan. Meskipun kekuatannya tergolong rendah dibanding baja modern lainnya, A36 masih banyak digunakan untuk elemen non-kritis seperti pelat sambungan, stiffener, dan elemen-elemen struktural sekunder. Namun, dalam sistem struktur tahan gempa, penggunaannya terbatas karena tidak memiliki daktilitas yang cukup.

b. ASTM A572 Grade 50

Baja ASTM A572 Gr.50 memiliki kekuatan tarik dan batas leleh yang lebih tinggi, yakni minimum 345 MPa, dengan elongasi yang baik. Baja ini merupakan pilihan

yang lebih unggul dibanding A36 untuk elemen struktural utama seperti balok dan kolom dalam sistem rangka biasa maupun rangka tahan gempa. Sifat mekaniknya memungkinkan perancangan penampang yang lebih efisien dan ringan, serta meningkatkan kapasitas struktur terhadap gaya lateral. Baja ini juga sering digunakan sebagai pengganti A36 ketika struktur memerlukan kekuatan lebih tanpa peningkatan massa yang signifikan.

c. ASTM A992

ASTM A992 adalah baja struktural yang secara khusus dikembangkan untuk digunakan pada profil Wide Flange (WF), yang umumnya digunakan sebagai balok dan kolom utama dalam bangunan baja. Baja ini memiliki batas leleh minimum sebesar 345 MPa dan kekuatan tarik minimum sebesar 450 MPa, dengan rasio F_y/F_u yang dibatasi $\leq 0,85$ dan elongasi minimum 18%. Pengendalian parameter ini dimaksudkan untuk menjamin perilaku daktil dari elemen struktur saat mengalami deformasi plastis. Oleh karena itu, ASTM A992 sangat direkomendasikan untuk digunakan dalam sistem struktur tahan gempa seperti RBKK dan Rangka Momen Khusus (RMK), sesuai ketentuan AISC 341.

d. ASTM A500 Grade B/C

Baja ASTM A500 digunakan untuk elemen struktur berbentuk *Hollow Structural Section* (HSS), baik bulat maupun persegi panjang. Untuk keperluan struktural, Grade B dan Grade C merupakan pilihan utama, dengan nilai batas leleh minimum berturut-turut sebesar 315 MPa dan 345 MPa. Penggunaan HSS banyak ditemukan pada elemen bresing, khususnya dalam sistem RBKK. Penampang tertutup ini memberikan performa baik dalam menahan gaya aksial dan memiliki keunggulan dari sisi estetika serta efisiensi dalam fabrikasi. Dalam perancangan RBKK, HSS Grade B sering dipilih karena kekuatannya lebih tinggi dan lebih sesuai dengan persyaratan *overstrength* dalam sambungan bresing.

e. ASTM A588

ASTM A588, atau dikenal juga sebagai *weathering steel*, merupakan baja struktural yang memiliki ketahanan terhadap korosi lebih tinggi dibanding baja konvensional.

Hal ini diperoleh dari kandungan tembaga (Cu) dan elemen paduan lain yang menyebabkan terbentuknya patina pelindung pada permukaan baja. Meskipun tidak umum dalam struktur bangunan konvensional, jenis baja ini banyak digunakan dalam struktur luar ruang seperti jembatan atau elemen arsitektural yang terekspos lingkungan agresif.

Tabel 2.1 Mutu Material Baja sesuai standar ASTM

No.	Material	Tegangan Leleh [fy] (MPa)	Tegangan Tarik Ultimit [fu] (MPa)
1.	ASTM A36	250	400-550
2.	ASTM A572	345	450-620
3.	ASTM A992	345	450-620
4.	ASTM A588	345	485
5.	ASTM A500	290	400

(Sumber : Pribadi)

2.2.3 Jenis Profil Baja

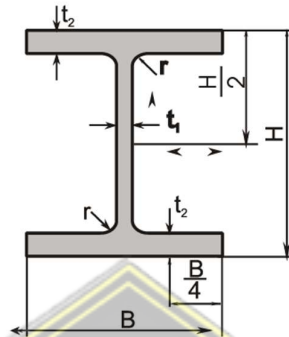
Dalam konstruksi berbasis struktur baja, penggunaan profil baja menjadi komponen fundamental. Profil baja hadir dalam beragam bentuk dan dimensi yang disesuaikan dengan kebutuhan konstruksi. Secara definisi, profil baja merupakan batang baja memanjang dengan berbagai variasi penampang, umumnya tersedia dalam panjang 6 meter. Variasi penampang ini menjadi elemen dasar yang akan dirangkai untuk membentuk kerangka struktural bangunan baja.

Di pasaran konstruksi, tersedia beberapa jenis profil baja struktural yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi pembangunan. Keberagaman profil baja ini memungkinkan perencana untuk memilih jenis yang paling sesuai dengan kebutuhan. Setiap jenis profil memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri yang menjadikannya optimal untuk fungsi-fungsi tertentu dalam sistem struktur bangunan.

1. Profil I dan H (*Wide Flange Beam*)

Profil I atau H adalah salah satu jenis penampang yang paling umum digunakan dalam konstruksi bangunan. Profil ini terdiri dari satu badan (web) vertikal dan dua sayap (flange) horizontal yang simetris sehingga memiliki bentuk penampang melintang menyerupai huruf “I” dan “H” kapital, menjadikannya sangat efektif dalam menahan momen lentur dan geser, terutama pada elemen-elemen balok dan kolom dalam struktur bangunan. Karena kapasitasnya yang tinggi terhadap lentur

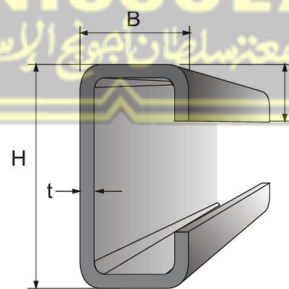
dan kekakuannya terhadap deformasi, profil ini banyak digunakan pada bangunan bertingkat, jembatan, hingga struktur industri skala besar. Meskipun demikian, bobotnya yang relatif berat membuat proses pengangkatan dan pemasangan memerlukan peralatan khusus.



Gambar 2.1 Profil Baja IWF dan H
(Sumber : Gunung Raja Paksi)

2. Profil C dan U (*C-Channel* dan *U-Channel*)

Profil C dan U, yang memiliki bentuk menyerupai huruf "C" atau "U" dan umumnya digunakan pada struktur sekunder seperti purlin, girts, atau rangka atap ringan. Profil ini lebih ringan dan mudah dipasang dibanding profil I, namun kurang efektif jika digunakan untuk pembebanan besar atau posisi yang memerlukan kekakuan torsi tinggi. Keunggulannya justru terletak pada fleksibilitas dan efisiensi biaya, sehingga banyak diterapkan dalam bangunan industrial ringan atau gudang.

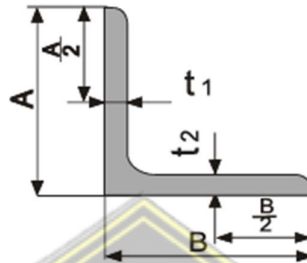


Gambar 2.2 Profil C
(Sumber : Gunung Raja Paksi)

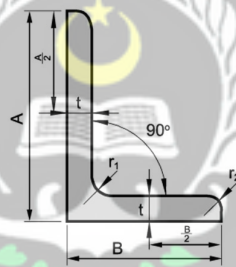
3. Profil L (*Angle Bar*)

Profil L atau yang lebih dikenal sebagai profil siku, merupakan penampang baja yang berbentuk sudut 90 derajat. Profil ini biasanya digunakan sebagai elemen

pendukung atau pengaku dalam struktur, seperti bresing atau anggota truss. Meskipun tidak memiliki kapasitas lentur sebesar profil I atau H, profil L sangat berguna dalam menahan gaya tarik maupun tekan, serta mudah disambungkan menggunakan baut atau las. Profil ini juga tersedia dalam dua jenis, yaitu *equal angle* dan *unequal angle*, tergantung pada panjang masing-masing sisi.



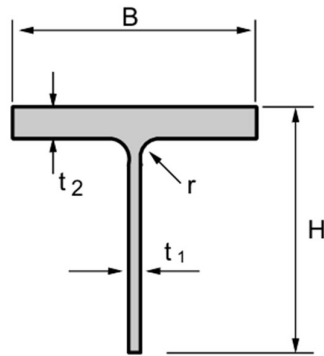
Gambar 2.3 Profil Baja *Equal Angle*
(Sumber : Gunung Raja Paksi)



Gambar 2.4 Profil Baja *Unequal Angle*
(Sumber : Gunung Raja Paksi)

4. Profil T (*Tee Section*)

Profil T biasanya dihasilkan dari pemotongan longitudinal pada balok I atau dibentuk secara khusus dari pelat baja. Profil ini digunakan untuk elemen-elemen struktural sekunder atau dalam aplikasi arsitektural karena bentuknya yang sederhana dan serbaguna. Namun karena tidak simetris secara horizontal, distribusi gaya pada profil T cenderung tidak merata, sehingga penggunaannya perlu diperhitungkan secara cermat.

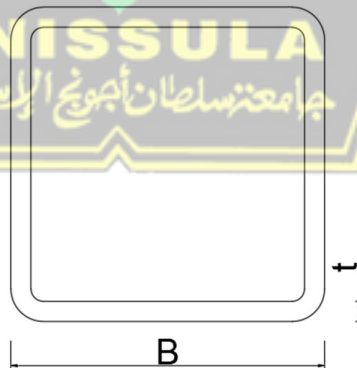


Gambar 2.5 Profil *Tee Section*

(Sumber : Gunung Garuda)

5. Pipa Baja (*Hollow Structural Sections*)

Profil pipa baja atau *Hollow Structural Section* (HSS) hadir dalam bentuk bulat maupun kotak. Profil ini memiliki kekuatan yang baik terhadap beban aksial maupun torsi, serta memberikan tampilan visual yang bersih dan modern. Oleh karena itu, profil pipa sering digunakan dalam desain arsitektural terbuka, *space frame*, tiang penyangga, maupun menara. Namun di balik tampilannya yang estetik, profil ini memiliki tantangan tersendiri dalam hal sambungan dan inspeksi, karena bagian dalamnya yang tertutup menyulitkan proses perawatan dan pengelasan internal.



Gambar 2.6 Profil *Hollow Structural Section*

(Sumber : Pribadi)

2.3 Sifat Mekanik Material

2.3.1 Tegangan

Tegangan merupakan ukuran intensitas gaya atau reaksi dalam yang terjadi pada setiap satuan luas. Tegangan dibagi menjadi dua jenis, yaitu *engineering stress* dan *true stress*. Dalam praktik teknik, gaya umumnya dinyatakan dalam satuan *pound* atau *newton*, sedangkan luas penampang dalam inci^2 atau mm^2 . Oleh karena itu, tegangan biasanya dituliskan dalam pound/inci^2 (psi) atau Newton/mm^2 (MPa). Besarnya tegangan pada suatu benda bergantung pada gaya yang bekerja.

Dalam praktik, istilah tegangan biasanya memiliki dua makna:

- Gaya per satuan luas atau intensitas tegangan, yang umumnya disebut sebagai tegangan satuan.
- Gaya dalam total pada suatu batang tunggal, yang biasanya disebut sebagai tegangan total.

Ketika suatu benda menerima beban sebesar P kg, panjangnya akan bertambah sebesar ΔL mm. Pada kondisi tersebut, material mengalami tegangan yang dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan:

σ = Tegangan (N/mm^2)

F = Beban yang diberikan (N)

A = Luas penampang (mm^2)

2.3.2 Regangan

Regangan adalah perbandingan antara perubahan panjang material terhadap panjang awalnya akibat pengaruh gaya tarik atau tekan. Pada daerah elastis, hubungan antara regangan dan tegangan bersifat linier hingga mencapai titik mulur. Setelah melewati batas ini, material memasuki fase plastis sehingga hubungan tidak lagi linier. Persamaan regangan yaitu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan:

ε = Regangan

ΔL = Perubahan panjang (mm)

L_0 = Panjang mula-mula (mm)

2.3.3 Elastisitas dan Plastisitas

Jika suatu material diberi beban dan mengalami regangan, namun kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan, maka material tersebut bersifat elastis. Sifat elastis ini terjadi pada daerah elastis, yaitu sebelum mencapai titik luluh (*yield point*). Selama berada di daerah ini, pelepasan beban akan membuat material kembali ke bentuk awalnya.

Ketika material mengalami tegangan, bentuknya akan berubah. Jika tegangan tersebut tidak melebihi batas elastis, perubahan bentuk yang terjadi bersifat sementara dan akan hilang ketika tegangan dihilangkan. Namun, jika tegangan melampaui batas elastis, sebagian perubahan bentuk akan tetap ada meskipun beban diangkat.

Plastisitas adalah kemampuan material mengalami perubahan bentuk permanen. Sifat ini berkaitan dengan keuletan (*ductility*). Material dengan keuletan tinggi dapat mengalami deformasi plastis yang besar, sedangkan material dengan keuletan rendah bersifat getas (*brittle*).

2.3.4 Titik Luluh

Jika beban pada material terus ditingkatkan hingga melampaui batas elastis, akan terjadi perpanjangan atau pemendekan permanen secara tiba-tiba. Kondisi ini disebut *yield point* atau batas luluh, yaitu titik di mana regangan bertambah meskipun tegangan tidak mengalami kenaikan signifikan. Setelah melewati titik ini, material tidak dapat kembali ke bentuk semula karena telah memasuki daerah plastis.

2.3.5 Tegangan Von Mises

Tegangan *von mises* adalah nilai tegangan ekuivalen yang digunakan untuk menentukan apakah suatu material akan mulai mengalami leleh, di mana material tidak akan mengalami leleh selama nilai tegangan *von mises* maksimum tidak melebihi tegangan leleh material tersebut. Secara tradisional, tegangan *von mises*

digunakan untuk material duktail seperti baja. Tegangan *von mises* dapat dihitung menggunakan rumus:

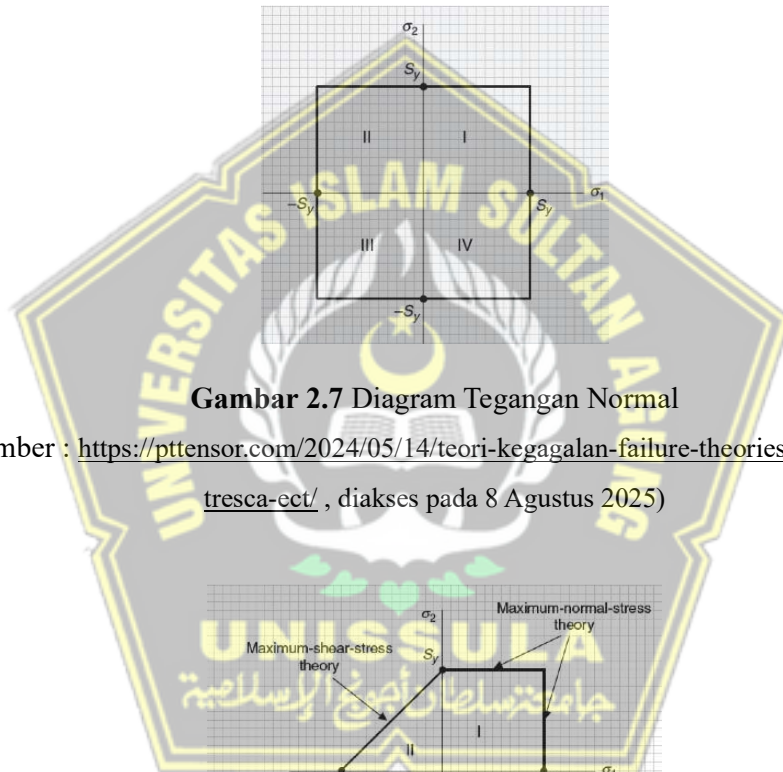
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2+6(\tau_{12}^2+\tau_{23}^2+\tau_{31}^2)}{2}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan :

σ_v = Tegangan *von mises* (*Equivalent Stress*) (MPa)

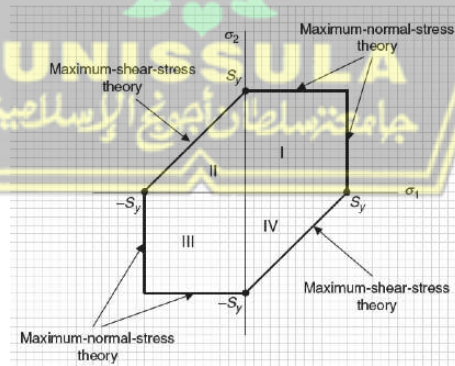
σ = Tegangan normal (MPa)

τ = Tegangan geser (MPa)



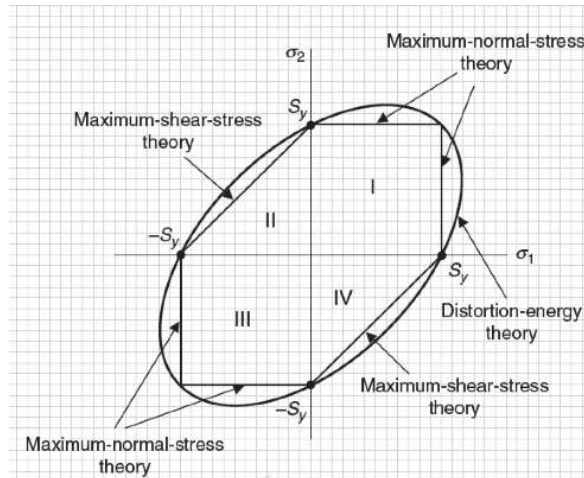
Gambar 2.7 Diagram Tegangan Normal

(Sumber : <https://pttensor.com/2024/05/14/teori-kegagalan-failure-theories-von-mises-tresca-ect/> , diakses pada 8 Agustus 2025)



Gambar 2.8 Diagram Tegangan Geser

(Sumber : <https://pttensor.com/2024/05/14/teori-kegagalan-failure-theories-von-mises-tresca-ect/> , diakses pada 8 Agustus 2025)



Gambar 2.9 Diagram tegangan *von mises*

(Sumber : <https://pttensor.com/2024/05/14/teori-kegagalan-failure-theories-von-mises-tresca-ect/>, diakses pada 8 Agustus 2025)

2.4 Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK)

Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) atau biasa disebut *Special Concentrically Braced Frame* (SCBF) pada AISC merupakan salah satu sistem penahan gaya lateral yang umum digunakan pada struktur baja di wilayah rawan gempa. Sistem ini menggunakan elemen bresing yang disusun secara konsentris, yaitu titik pertemuan antara bresing, balok, dan kolom berada pada satu titik pusat, sehingga gaya lateral disalurkan secara efisien ke fondasi. Meskipun secara konfigurasi mirip dengan Rangka Bresing Konsentris Biasa (RBKB), RBKK dirancang dengan detailing dan kriteria kekuatan khusus agar memiliki daktilitas tinggi dan mampu mendisipasi energi saat terjadi gempa besar (AISC 341-16, 2016)

Karakteristik utama dari RBKK adalah bahwa bresing-nya didesain untuk mengalami deformasi inelastik secara reversibel, terutama melalui mekanisme tarik-leleh dan tekuk. Bresing pada RBKK harus memenuhi batas kelangsingan tertentu agar dapat menunjukkan perilaku histeresis yang stabil dalam kondisi siklik. Selain itu, sambungan antar elemen dirancang dengan prinsip *capacity design*, di mana komponen non-kritis (misalnya sambungan dan pelat simpul) harus lebih kuat dari elemen bresing yang diharapkan mengalami leleh terlebih dahulu. Hal ini bertujuan untuk memastikan keruntuhan terjadi secara terkendali di lokasi yang telah dirancang. (FEMA P-750, 2009)

Detailing pada RBKK juga memperhatikan kebutuhan rotasi dan fleksibilitas pada sambungan, seperti penggunaan pelat *gusset* dengan bentuk dan dimensi tertentu agar tidak menghambat deformasi bresing. Semua aspek ini menjadikan RBKK sebagai sistem struktur yang tidak hanya kuat secara struktural, tetapi juga Tangguh dan aman saat menghadapi gempa kuat.

2.4.1 Persyaratan Bresing

Bresing diagonal dalam sistem struktur baja harus memenuhi persyaratan utama. Pertama, bresing harus memiliki rasio kelangsingan :

$$\frac{L_c}{r} \leq 200 \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan

L_c = panjang efektif bresing = KL, mm.

r = radius girasi yang menentukan, mm.

Untuk bresing tersusun, jarak antar konektor harus diatur sedemikian rupa sehingga rasio kelangsingan antar elemen individual (a/r_i) tidak melebihi 0,4 kali rasio kelangsingan dari kompoone struktur secara keseluruhan. Kekuatan geser konektor harus minimal sama atau lebih besar dari kekuatan tarik masing-masing elemen breis, dan konektor harus tersebar merata dengan minimal dua konektor dalam satu batang. Tidak diperbolehkan meletakkan konektor di seperempat panjang tengah breis bersih. Namun, bila tekuk yang terjadi bukan pada sumbu tekuk kritis yang memicu geser konektor, maka persyaratan ini dapat dikecualikan. Selain itu, luas bersih efektif dari breis tidak boleh melebihi luas bruto, kecuali memenuhi dua kondisi :

- Kekuatan leleh minimum terspesifikasi penguat harus paling sedikit sebesar kekuatan leleh minimum terspesifikasi bresing;
- Sambungan-sambungan penguat ke breis harus memiliki kekuatan yang cukup untuk mengembangkan kekuatan penguat terekspektasi pada setiap sisi dari penampang yang direduksi.

2.4.2 Persyaratan Balok dan Kolom

Kolom, balok, dan bresing harus memenuhi rasio kelangsingan untuk komponen struktur daktail tinggi.

2.4.3 Desain Sambungan RBKK

2.4.3.1 Sambungan las kritis perlu

Las-las yang berikut adalah las-las kritis perlu, dan harus memenuhi persyaratan Pasal A3.4b dan I2.3:

- Las-las gruv pada splais kolom
- Las-las pada sambungan kolom ke pelat dasar
Pengecualian: Suatu las tidak perlu dipertimbangkan sebagai kritis perlu jika semua kondisi berikut dipenuhi.
 - Pembentukan sendi plastis kolom yang berada di, atau dekat dengan, pelat dasar kolom tidak dimungkinkan oleh kondisi kekangan
 - Tidak terdapat tegangan tarik netto akibat kombinasi beban termasuk beban seismik kekuatan lebih
- Las-las pada sambungan balok ke kolom sesuai dengan Pasal F2.6b(c)

2.4.3.2 Sambungan Balok ke Kolom

Apabila breis atau pelat buhul menyambungkan seluruh komponen struktur pada sambungan balok ke kolom, maka sambungan tersebut harus dirancang sesuai dengan salah satu dari yang berikut :

1. Rakitan sambungan harus sambungan sederhana yang memenuhi persyaratan Spesifikasi Pasal B3.4a, di mana rotasi yang diperlukan ditetapkan sebesar 0,025 rad;
2. Rakitan sambungan harus didesain untuk menahan momen sebesar yang terkecil dari berikut ini:

- Momen yang berhubungan dengan kekuatan lentur balok terekspektasi,

$$\frac{1,1 \times R_y \times M_p}{\alpha_s} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan

M_p = Kapasitas lentur plastis, N-mm;

R_y = Rasio tegangan leleh terekspektasi terhadap tegangan leleh minimum terspesifikasi pelat buhul, R_y

α_s = Faktor penyesuaian tingkat gaya, LRFD = 1, ASD = 1,5

- Momen yang berhubungan dengan kekuatan lentur kolom terekspektasi,

$$\frac{1,1 \times R_y \times F_y \times Z}{\alpha_s} \dots\dots\dots(2.6)$$

F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi kolom, MPa;

R_y = Rasio tegangan leleh terekspektasi terhadap tegangan leleh minimum terspesifikasi pelat buhul, R_y

α_s = Faktor penyesuaian tingkat gaya, LRFD = 1, ASD = 1,5.

Z = Modulus penampang plastis terhadap sumbu lentur, mm^3

Momen ini harus diperhitungkan dalam kombinasi dengan kekuatan perlu dari sambungan breis dan sambungan balok, termasuk gaya-gaya kolektor diafragma yang ditentukan menggunakan beban seismik kekuatan lebih.

3. Sambungan balok ke kolom harus memenuhi persyaratan Pasal E1.6b(c).

2.4.3.3 Sambungan Breis

Kekuatan yang diperlukan pada sambungan breis, baik dalam kondisi tarik, tekan, maupun lentur (termasuk sambungan balok ke kolom apabila merupakan bagian dari sistem rangka bresing), harus ditentukan sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Penentuan kekuatan tersebut dapat dilakukan secara terpisah untuk masing-masing jenis gaya tanpa mempertimbangkan interaksi antar gaya.

Kekuatan tarik perlu harus yang terkecil dari berikut ini :

- Kekuatan leleh terekspektasi breis dalam kondisi tarik

$$\frac{R_y \times F_y \times A_g}{\alpha_s} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan:

F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi breis, MPa;

R_y = rasio tegangan leleh terekspektasi terhadap tegangan leleh minimum terspesifikasi pelat buhul, R_y

A_g = Luas bruto, mm;

α_s = Faktor penyesuaian tingkat gaya, LRFD = 1, ASD = 1,5.

- Efek beban maksimum, yang ditunjukkan oleh analisis, yang dapat disalurkan ke breis melalui sistem.

Sambungan breis harus didesain untuk kuat tekan perlu, berdasarkan kondisi batas tekuk,

$$\frac{1 \times F_{cre} \times A_g}{0.877} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan:

F_{cre} = tegangan kritis yang dihitung dari spesifikasi Bab E menggunakan tegangan leleh terekspektasi, MPa;

A_g = Luas bruto, mm;

α_s = Faktor penyesuaian tingkat gaya, LRFD = 1, ASD = 1,5.

Kekuatan breis pasca-tebuk terekspektasi harus diambil maksimum sebesar 0,3 kali kekuatan breis terekspektasi dalam kondisi tekan.

2.4.3.4 Pelat Buhul

Untuk tebuk breis keluar bidang, las-las yang menyambungkan pelat buhul ke sayap balok atau sayap kolom secara langsung harus memiliki kekuatan geser tersedia sebesar:

$$\frac{R_y \times F_y \times t_p}{\alpha_s} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dengan

F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi pelat buhul, MPa;

R_y = rasio tegangan leleh terekspektasi terhadap tegangan leleh minimum terspesifikasi pelat buhul, R_y ;

t_p = ketebalan pelat buhul, mm.

Pengecualian: Sebagai alternatif, las-las tersebut boleh didesain untuk memiliki kekuatan tersedia untuk menahan gaya-gaya tepi pelat buhul yang berhubungan dengan gaya breis menurut Pasal F2.6c.2 yang dikombinasikan dengan kekuatan lentur sumbu lemah pelat buhul yang ditentukan dalam keberadaan gaya-gaya tersebut.

2.5 Sistem Sambungan Struktur Baja

Sambungan dalam struktur baja merupakan elemen krusial yang berperan menghubungkan elemen-elemen struktural seperti balok, kolom, dan *diagonal bracing*. Dalam struktur baja tahan gempa, sistem sambungan tidak hanya berfungsi sebagai pengikat antar komponen, tetapi juga memegang peran dalam mentransfer gaya, menjaga integritas struktur, serta mengontrol mekanisme keruntuhan saat terjadi gempa.

Kunci dari sambungan tahan gempa adalah kemampuannya untuk mengakomodasi rotasi plastis tanpa menyebabkan keruntuhan prematur (Bruneau,

2011). Salah satu pendekatan utama adalah pemrakualifikasian sambungan, yakni memastikan bahwa tipe sambungan tertentu telah diuji secara eksperimental dan terbukti memenuhi kriteria performa seismik. Contoh sambungan yang telah banyak digunakan adalah *Reduced Beam Section* (RBS), di mana bagian balok sengaja dilemahkan agar sendi plastis terbentuk jauh dari area kritis sambungan balok-kolom, sehingga sambungan tetap utuh selama siklus pembebanan.

Pengembangan sambungan baja tahan gempa sangat dipengaruhi oleh temuan pasca gempa Northridge 1994 berkekuatan 6,7 skala richter mengguncang wilayah Los Angeles, California, menyebabkan kerusakan signifikan pada berbagai bangunan, termasuk struktur baja yang mampu menahan gempa. Kegagalan terjadi terutama pada sambungan las balok-kolom, yang menunjukkan retak getas pada daerah sayap balok maupun kolom. Temuan tersebut memicu evaluasi ulang terhadap desain sambungan baja dan mendorong lahirnya konsep sambungan prakualifikasi.

2.5.1 Jenis Sambungan Prakualifikasi

Sambungan prakualifikasi adalah sambungan yang telah terbukti melalui pengujian eksperimental mampu mempertahankan kapasitas rotasi inelastik dan kinerja seismik yang memadai tanpa mengalami kegagalan prematur. Menurut SNI 7972:2020 dan AISC 358:16, sambungan ini diperbolehkan digunakan dalam sistem rangka momen tahan gempa tanpa perlu dilakukan pengujian tambahan, selama persyaratan *detailing*, dimensi, dan batasan geometri dipenuhi. Jenis sambungan tersebut dapat dibagi beberapa jenisnya antara lain seperti pada tabel dibawah ini :

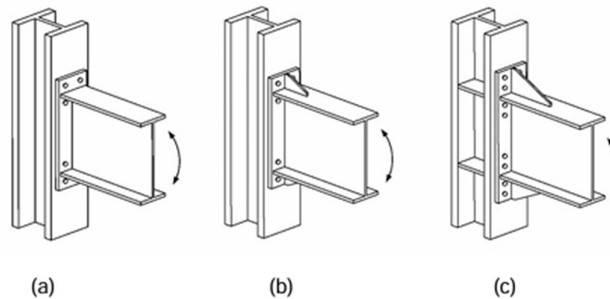
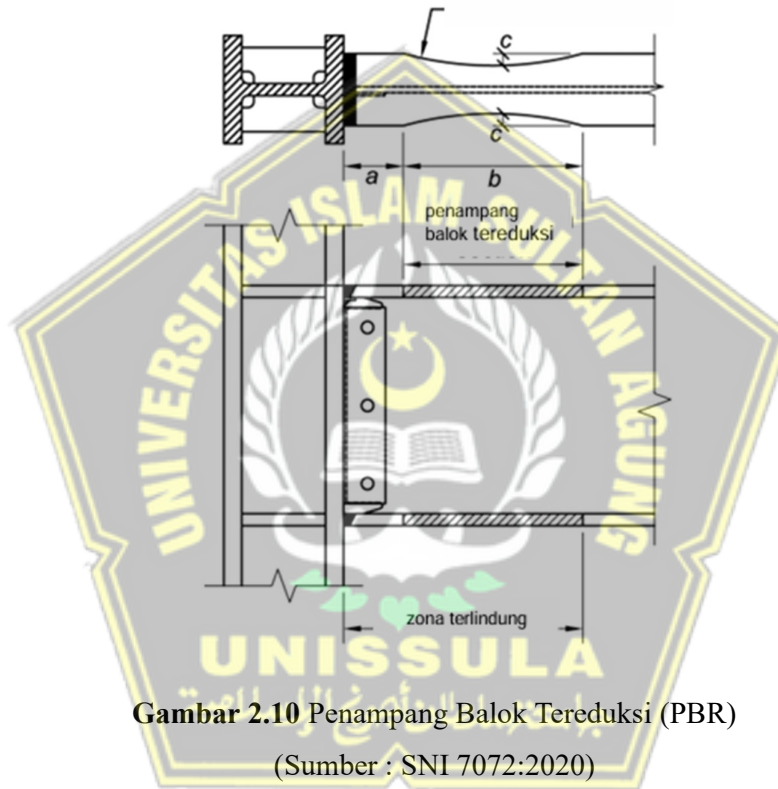
Tabel 2.2 Sambungan Momen Terprakualifikasi (SNI 7972:2020)

Sambungan Momen Terprakualifikasi (SNI 7972:2020)			
No	Tipe Sambungan	Bab	Sistem
1	Penampang Balok Tereduksi (PBR)	5	RMK dan RMT
2	Pelat Ujung di Perpanjang Berbaut dan Tanpa Pengaku (PUDBTP)	6	RMK dan RMT
3	Pelat Ujung di Perpanjang Berbaut dengan Pengaku (PUDBP)	6	RMK dan RMT
4	Pelat Sayap Berbaut (PSB)	7	RMK dan RMT
5	Sayap di Las Tanpa Penguat-Badan di Las (SLTKBL)	8	RMK dan RMT

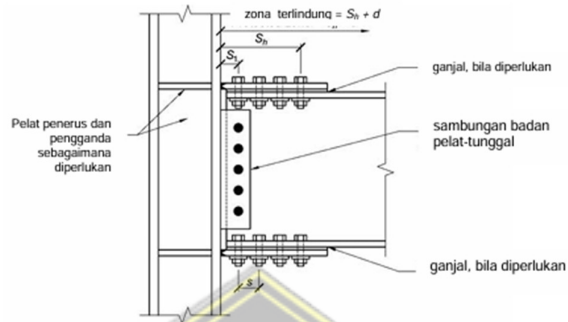
6	Braket Kaiser Berbaut (BKB)	9	RMK dan RMT
7	Sambungan Momen <i>ConXtech ConXL</i>	10	RMK dan RMT
8	Sambungan Momen <i>SidePlate</i>	11	RMK dan RMT
9	Sambungan Momen <i>Simpson Strong-Tie Strong Frame</i>	12	RMK dan RMT
10	Sambungan Momen T Ganda	13	RMK dan RMT

(Sumber : SNI 7972:2020)

Berikut merupakan gambar detail dari jenis sambungan momen terprakualifikasi (SNI 7972:2020)



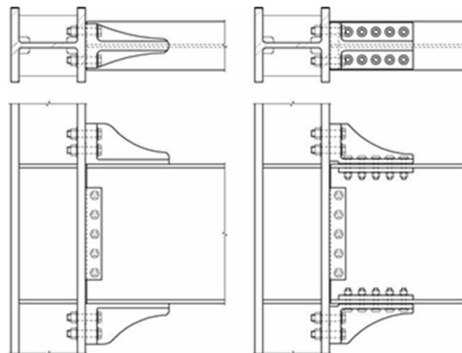
Gambar 2.11 Pelat Ujung di Perpanjang Berbaut Tanpa Pengaku dan dengan Pengaku
(Sumber : SNI 7072:2020)



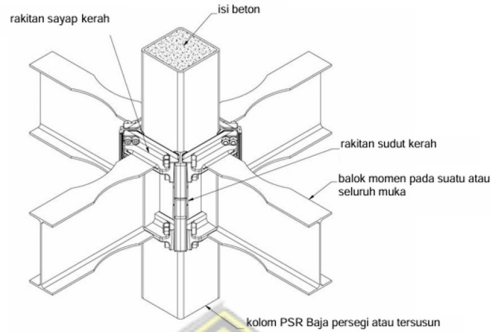
Gambar 2.12 Pelat Sayap Berbaut (PSB)
(Sumber : SNI 7972:2020)



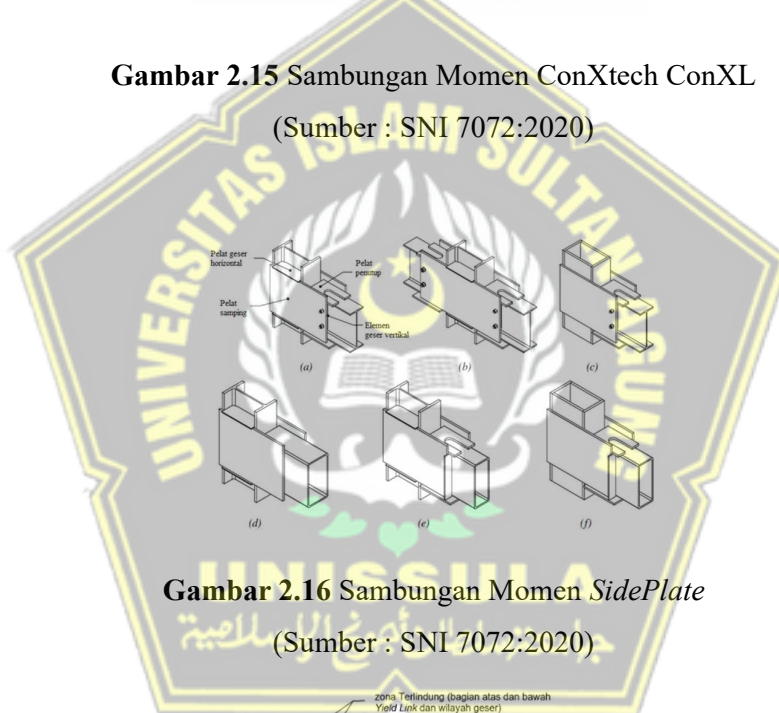
Gambar 2.13 Sayap di Las Tanpa Penguat-Badan di Las (SLTKBL)
(Sumber : SNI 7072:2020)



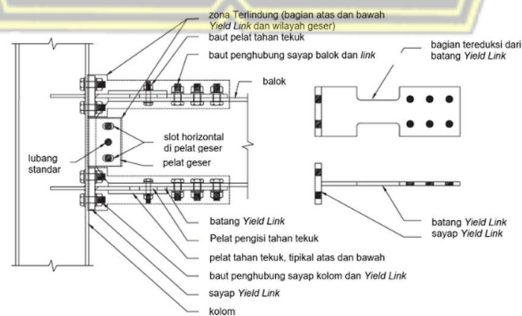
Gambar 2.14 Braket Kaiser Berbaut (BKB)
(Sumber : SNI 7072:2020)



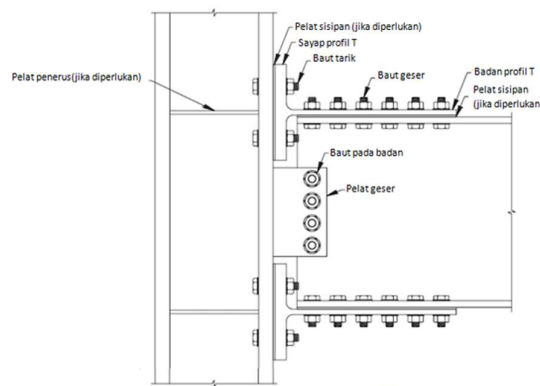
Gambar 2.15 Sambungan Momen ConXtech ConXL
(Sumber : SNI 7072:2020)



Gambar 2.16 Sambungan Momen *SidePlate*
(Sumber : SNI 7072:2020)



Gambar 2.17 Sambungan Momen
Simpson Strong-Tie Strong Frame
(Sumber : SNI 7072:2020)



Gambar 2.18 Sambungan Momen T Ganda

(Sumber : SNI 7072:2020)

2.5.2 Jenis Sambungan Pelat simpul pada RBKK

Sambungan bresing-balok baja tahan gempa yang tercantum dalam ANSI/AISC 341:16 telah diadopsi secara identic sebagai bagian dari peraturan perencanaan struktur baja di Indonesia, khususnya dalam SNI 7860:2020 yang mengatur sambungan untuk Rangka Bresing Konsentris Khusus struktur baja. Berdasarkan SNI 7860:2020, sambungan bresing-balok ini didesain berdasarkan *capacity design* atau *strong connection-weak member concept*. Filosofi desainnya adalah sambungan (termasuk pelat simpul dan las) harus mampu mengembangkan kekuatan penuh dari *brace member* bahkan ketika material bresing memiliki kekuatan aktual yang lebih tinggi dari nilai nominalnya. Ini memastikan bahwa *failure mode* yang diinginkan terjadi di bresing, bukan di sambungan. Selain itu, sambungan tetap elastis saat brace mengalami *inelastic behavior*, dan *ductility system* terjaga karena disipasi energi terjadi di bresing, bukan sambungan.

a. Parameter dan Geometri Fundamental Pelat Simpul

Karakteristik geometri gusset plate pada sistem Rangka Bresing Konsentris Khusus dengan konfigurasi Chevron didefinisikan oleh beberapa parameter kunci yang mempengaruhi perilaku struktur sambungan. Dowswell (2012) menganalisis *effective length factors* untuk *non-stiffened chevron* pelat simpul dengan mengusulkan nilai $k=0,65$ berdasarkan evaluasi 13 spesimen uji, yang

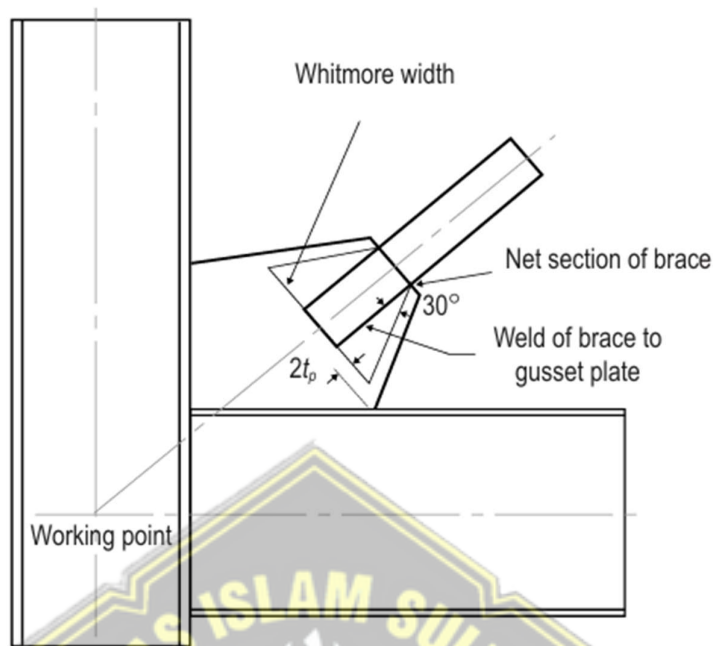
menunjukkan bahwa parameter geometri dan kondisi tumpuan mempengaruhi stabilitas pelat simpul secara signifikan (Dowswell, 2012).

Geometri pelat simpul dalam konfigurasi chevron memiliki kompleksitas tambahan karena adanya interaksi antara dua brace yang bertemu pada satu titik di balok, sehingga memerlukan pertimbangan khusus dalam desain *clearance* dan distribusi gaya (Astaneh-Asl et Al, 2006). Parameter geometri yang kritis meliputi panjang efektif, dimensi karakteristik, dan kondisi tumpuan yang mempengaruhi *mode buckling* dan kapasitas pelat simpul.

b. *Clearance Requirement* dan *Linear Offset*

Untuk mencapai rotasi ujung bresing yang memadai, pelat simpul dirancang menggunakan konsep *linear clearance* yang ditetapkan sebagai 2tp (dua kali ketebalan pelat simpul) antara ujung bresing dan garis kekangan pelat simpul (Roeder et Al, 2011). Pelat simpul dengan *tapered design* dan *linear clearance* sebesar 2tp antara ujung bresing dan *restrained lines* dari pelat simpul dipertimbangkan untuk mengizinkan rotasi yang diperlukan.

Konsep *clearance* ini bertujuan untuk mencegah pembatasan rotasi bresing yang dapat menyebabkan konsentrasi tegangan berlebihan pada sambungan. Penelitian menunjukkan bahwa pembengkokan *out-of-plane* pelat simpul akibat imperfeksi geometri juga berkontribusi terhadap pengembangan regangan plastis tinggi di ujung pelat simpul, sehingga desain *clearance* yang optimal menjadi kritis (Astaneh-Asl et Al, 2006).



Gambar 2.19 *Clearance Requirement dari Tapered Gusset Plate*

(Sumber : Seismic Design of Steel Special Concentrically Braced Frame Systems
NIST GCR 13-917-24)

2.5.3 Metode Perancangan

Perancangan struktur baja diatur dalam SNI 1729:2020 dan SNI 7860:2020 yang menyediakan dua metode utama, yaitu *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) dan *Allowable Strength Design* (ASD). Keduanya digunakan untuk memastikan struktur memiliki kekuatan yang cukup terhadap beban kerja, namun dengan pendekatan faktor keamanan yang berbeda.

a. *Load and Resistance Factor Design* (LRFD)

Metode LRFD menggunakan faktor beban dan faktor reduksi kekuatan untuk mengakomodasi ketidakpastian dalam beban dan kapasitas struktur. Struktur dianggap aman jika :

$$R_u \leq \phi R_n \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

R_u = Kuat Perlu (kN)

ϕ = Faktor Keamanan

R_n = Kuat Nominal (kN)

b. Allowable Strength Design (ASD)

Metode ASD atau perancangan berdasarkan kekuatan ijin, membandingkan beban kerja langsung dengan kekuatan ijin dari elemen struktur. Struktur dianggap aman jika :

$$R_u \leq \frac{R_n}{\Omega} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana:

R_u = Kuat Perlu (kN)

Ω = Faktor Keamanan

R_n = Kuat Nominal (kN)

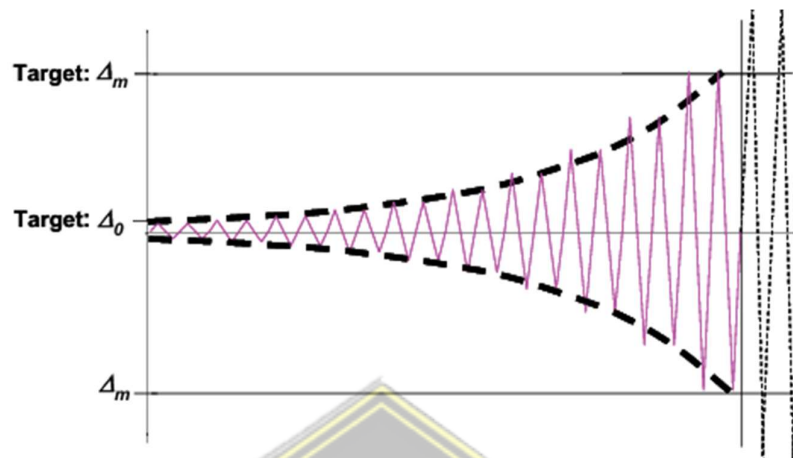
2.6 Beban Siklik

2.6.1 Pengertian Beban Siklik

Dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa, pemahaman terhadap respons elemen struktural terhadap beban gempa merupakan aspek yang sangat krusial. Gempa bumi menghasilkan gaya inersia yang bekerja secara bolak-balik, sehingga pembebanan yang dialami oleh struktur tidak bersifat statik melainkan bersifat dinamik dan berulang. Untuk merepresentasikan kondisi pembebanan tersebut, digunakan pendekatan berupa beban siklik, yaitu beban yang bekerja secara bergantian arah dan berulang dalam suatu rentang waktu tertentu. Beban ini meniru efek gempa terhadap elemen struktural, dan menjadi metode utama dalam pengujian performa seismik di laboratorium.

Kurva histeresis yang dihasilkan dari uji siklik tidak hanya menggambarkan hubungan gaya-deformasi tetapi juga mengungkapkan akumulasi kerusakan, degradasi kekakuan, dan energi yang terdisipasi (Chopra, 2012). FEMA 461 memperkuat konsep ini dengan menyediakan protokol pengujian sistematis, seperti pola pembebanan “*displacement-controlled*” yang mensimulasikan perpindahan seismik. Protokol ini mencakup siklus pembebanan dengan amplitudo yang

meningkat secara bertahap, memungkinkan identifikasi titik leleh, tekuk, dan kegagalan akhir komponen.

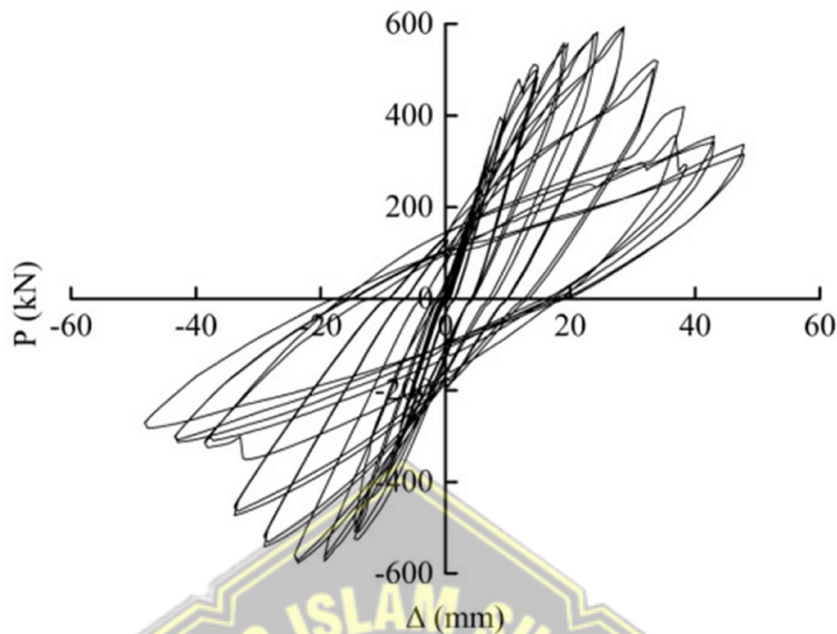


Gambar 2.20 Sketsa *displacement-controlled loading history*
(Sumber : FEMA 461)

2.6.2 Karakteristik Histeresis pada Rangka Bresing Konsentris Khusus

Pada sistem Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK), interaksi kompleks antara balok, kolom, dan *diagonal bracing* menciptakan perilaku histeresis yang unik. Desain optimal Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) harus memastikan bahwa bresing mencapai kapasitas plastis sebelum balok atau kolom mengalami kegagalan (Sabelli et al., 2003). Namun, tantangan utama terletak pada tekuk bresing saat tekan, yang menyebabkan asimetri kurva histeresis dan degradasi energi.

Selain itu, ada peran kritis sambungan dalam menjaga integritas histeresis. Sambungan las konvensional pada Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) rentan terhadap fatik akibat tegangan konsentrasi



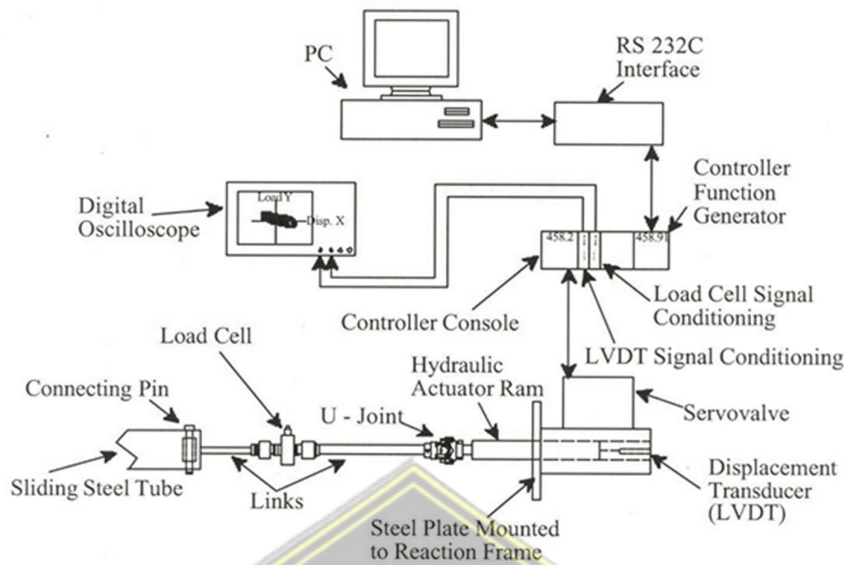
Gambar 2.21 Kurva Histeresis Rangka Bresing Konsentris Khusus
(Sumber : Rongqian et al., 2020)

2.6.3 Protokol FEMA 461

FEMA 461 mengadopsi pendekatan *displacement-controlled cyclic loading*, dimana deformasi dikontrol secara bertahap untuk mensimulasikan efek gempa berulang. Protokol ini menekankan pentingnya pola pembebanan, amplitudo target, dan jumlah siklus.

Tujuan utama dari FEMA 461 menyediakan kerangka kerja eksperimental yang konsisten untuk mengevaluasi kapasitas daktilitas, degradasi kekakuan, dan disipasi energi komponen. Selain itu juga memastikan hasil pengujian dapat direplikasi dan dibandingkan antar laboratorium serta mendukung pengembangan *fragility curves* (kurva kerapuhan) untuk analisa risiko seismik.

FEMA 461 merekomendasikan pengukuran parameter gaya dan deformasi, regangan lokal, perpindahan antar tingkat, dan pengamatan visual kerusakan. FEMA 461 juga menerapkan kriteria untuk mengevaluasi apakah suatu komponen memenuhi persyaratan kinerja seismik melalui pengecekan kapasitas deformasi inelastis, stabilitas histeresis, dan energi yang terdisipasi.



Gambar 2.22 Contoh sistem instrumentasi dan akuisisi data
(Sumber : FEMA 461)

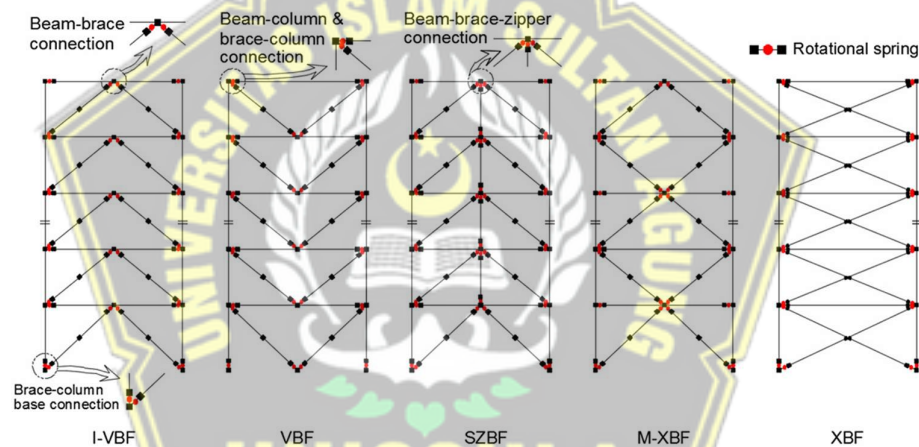
2.7 Mekanisme Sendi Plastis pada Struktur Baja

Mekanisme sendi plasti (*plastic hinge*) merupakan fenomena kritis dalam desain struktur baja tahan gempa, di mana suatu bagian elemen struktur (seperti balok atau kolom) mengalami deformasi inelastis terkonsentrasi sehingga memungkinkan redistribusi momen dan disipasi energi. Mekanisme ini menjadi dasar dari pendekatan desain kapasitas (*capacity design*), di mana sendi plastis diarahkan terbentuk di lokasi yang terkendali untuk mencegah kegagalan struktural yang tiba-tiba.

Mekanisme sendi plastis pada struktur baja dimulai saat beban eksternal, seperti gempa atau beban lateral, bekerja pada elemen struktur. Awalnya struktur merespons secara elastis, di mana hubungan antara momen dan rotasi bersifat linier, dan regangan baja masih di bawah batas leleh (*yield strain*). Fase ini ditandai dengan kekakuan tinggi, di mana deformasi yang terjadi bersifat reversibel (Bruneau et al., 2011). Namun, begitu beban melebihi momen leleh, serat-serat terluar penampang baja-biasanya di sayap tarik dan tekan balok *wide flange*-mulai meleleh. Leleh ini tidak terjadi secara instan, ia menyebar secara bertahap dari

permukaan penampang ke arah dalam, membentuk zona plastis yang semakin meluas

Ketika beban terus meningkat, zona plastis menjalar ke seluruh penampang, menyebabkan redistribusi tegangan. Pada tahap ini, baja mulai memanfaatkan sifat daktilitasnya, meskipun tegangan tidak lagi meningkat signifikan, regangan terus bertambah, dan deformasi terkonsentrasi di area tertentu. Fenomena ini dikenal sebagai *strain hardening*, di mana material "mengeras" secara bertahap sambil mempertahankan kapasitasnya menahan beban. Konsentrasi deformasi inilah yang memunculkan sendi plastis—suatu zona di mana rotasi inelastis terkumpul, berperilaku layaknya engsel yang memungkinkan struktur berdeformasi tanpa kehilangan kekuatan secara tiba-tiba.



Gambar 2.23 Perilaku Inelastis Struktur Rangka Bresing Konsentris

(Sumber : Yang, T. Y., Sheikh, H., & Tobber, L. (2019). *Influence of the brace configurations on the seismic performance of steel concentrically braced frames*. *Frontiers in Built Environment*, 5, 27.)

2.8 Kajian Terdahulu

Kajian terdahulu penting untuk memberikan dasar teoretis dan mengetahui perkembangan penelitian sejenis terkait perilaku struktur baja terhadap beban siklik, khususnya pada sistem *Concentrically Braced Frame* (CBF). Berikut merupakan kajian-kajian terdahulu yang memiliki studi kasus seperti laporan kami mengenai sebuah sambungan struktur baja.

Tabel 2.3 Kajian Terdahulu

No.	Penulis	Judul	Hasil Penelitian
1.	Yang Rongqian dan Zhou Xuejun, 2020	<i>Experimental study on the seismic behavior of concentrically braced steel frames with extended end-plate bolted connections</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa struktur <i>Concentrically Braced Frame</i> dengan sambungan <i>end-plate bolted connections</i> memiliki kinerja seismik yang baik, terutama ketika menggunakan konfigurasi <i>chevron brace</i> . Dibandingkan dengan <i>X-brace</i> , sistem <i>chevron brace</i> menunjukkan kapasitas beban yang tinggi, disipasi energi yang lebih besar, daktilitas yang baik, serta degradasi kekakuan yang lebih stabil.
2.	Hubdar Hussain, Xiangyu Gao, dan Anqi Shi, 2021	<i>A Finite Element Study on Compressive Resistance Degradation of Square and Circular Steel Braces under Axial Cyclic Loading</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa baja berbentuk kotak dan lingkaran berlubang memiliki performa seismik yang sangat dipengaruhi oleh rasio kelangsingan dan rasio lebar terhadap tebal dinding penampang. Melalui simulasi dengan menggunakan ABAQUS CAE, ditemukan bahwa specimen dengan rasio kelangsingan dan lebar yang lebih kecil menunjukkan performa histeresis yang lebih baik, kapasitas disipasi energi yang lebih tinggi, dan degradasi kekuatan tekan-tarik yang lebih lambat setelah terjadi tekuk global. Secara umum, <i>brace</i> berbentuk lingkaran menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan yang berbentuk kotak, terutama dalam mempertahankan kekuatan setelah siklus pembebanan berulang.
3.	Hayato Asada, Andrew D. Sen, Tao Li, Jeffrey W.	<i>Seismic Performance of Chevron-</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK)

	Berman, dan Dawn E. Lehman, 2020	<i>Configured Special Concentrically Braced Frames with Yielding Beams</i>	dengan konfigurasi <i>chevron</i> dan balok yang sengaja dirancang untuk mengalami leleh (<i>yielding</i>) memiliki kinerja seismik yang setara atau lebih baik dibandingkan RBKK konvensional. Dengan memungkinkan balok untuk mengalami leleh secara terkendali, struktur dapat menahan deformasi yang lebih besar sebelum <i>brace</i> mengalami patah, sehingga meningkatkan kapasitas daktilitas dan memperkecil risiko keruntuhan. Selain itu, metode desain baru ini mengurangi kebutuhan kekuatan balok, menghasilkan penghematan berat dan biaya konstruksi tanpa mengorbankan kinerja struktur terhadap gempa.
4.	S. M. Dehghan, M. A. Najafgholipour, dan H. Hooshangi, 2017	<i>Seismic behavior of chevron concentrically braced frames with weak beams</i>	Penelitian ini menyimpulkan bahwa kekuatan lentur balok sangat berpengaruh terhadap kinerja seismik sistem <i>chevron concentrically braced frame</i> (CBF). Balok yang kuat mampu menahan gaya tak seimbang akibat kombinasi tarik dan tekan pada <i>brace</i> , sehingga memungkinkan <i>brace</i> tarik mengalami leleh dan deformasi lateral tersebar merata. Sebaliknya, balok lemah menyebabkan deformasi vertikal besar, konsentrasi <i>drift</i> antar-lantai, terbentuknya soft story, serta penurunan kekakuan dan kekuatan lateral struktur. Meskipun konfigurasi X dua lantai dapat mengurangi sebagian efek negatif dari balok lemah, sistem <i>chevron</i> dengan balok kuat tetap menunjukkan performa

			seismik yang lebih unggul secara keseluruhan.
5.	Charles W. Roeder, Andrew D. Sen, Hayato Asada, Sara M. Ibarra, dan Dawn E. Lehman, 2020	<i>Inelastic Behavior and Seismic Design of Multistory Chevron-Braced Frames with Yielding Beams</i>	Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem <i>Special Chevron Concentrically Braced Frame</i> (SCBF) dengan balok yang sengaja didesain untuk mengalami leleh mampu meningkatkan kapasitas deformasi inelastik tanpa menyebabkan keruntuhan awal pada <i>brace</i>. Hasil uji eksperimental dan analisis numerik menunjukkan bahwa balok yangn meleleh membantu mengurangi gaya tarik berulang pada <i>brace</i>, memperlambat terjadinya patah pada <i>brace</i>, serta memungkinkan terjadinya <i>drift</i> antar-lantai hingga lebih dari 5% tanp kehilangan kapasitas lateral yang signifikan. Desain balok berdasarkan dua kondisi beban (saat awal tekuk dan setelah degradasi <i>brace</i> tekan) terbukti efektif, dan metode ini juga memungkinkan pengurangan ukuran balok dibandingkan ketentuan desain saat ini.

BAB III

METODE PERANCANGAN

3.1 Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam proses permodelan dan analisis struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) terhadap pembebanan siklik. Penelitian ini menggunakan simulasi numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM).

Permodelan struktur dilakukan secara bertahap, dimulai dari penentuan geometri dan properti material, dilanjutkan dengan pendefinisian *boundary condition* dan interaksi antar elemen struktur. Pembebanan siklik diberikan secara *displacement-controlled* dengan urutan pembebanan menyerupai karakteristik gempa bumi.

Proses analisis juga mencakup penanganan masalah numerik yang kerap muncul pada simulasi nonlinier, seperti masalah konvergensi akibat plastisitas material dan kontak antar elemen. Oleh karena itu, pengaturan teknik stabilisasi numerik menjadi bagian penting dalam metode ini.

3.2 Pengumpulan Data

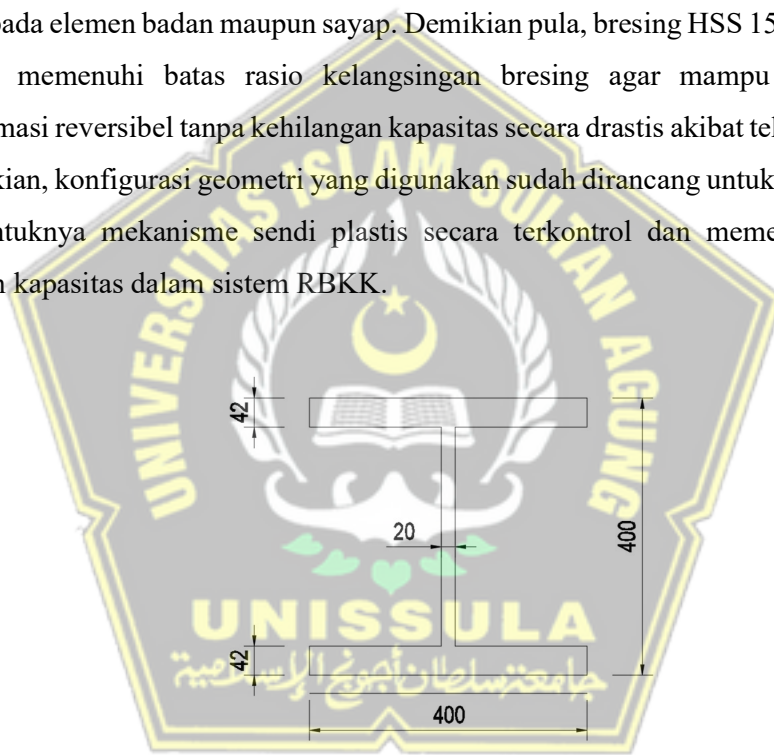
Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh parameter teknis yang dibutuhkan dalam proses permodelan numerik struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) pada perangkat lunak. Data yang dikumpulkan merupakan data yang bersumber dari standar desain, literatur ilmiah, serta dokumen referensi teknis lainnya.

3.2.1 Data Geometri Struktur

Data geometri meliputi dimensi utama dari struktur yang dimodelkan, seperti tinggi lantai, panjang bentang balok, tinggi kolom, dan konfigurasi bresing. Dalam penelitian ini, struktur dimodelkan sebagai portal dua dimensi dengan dua tingkat dan satu bentang menggunakan sistem *chevron bracing*. Konfigurasi ini dipilih berdasarkan studi terdahulu yang menunjukkan keefektifannya dalam disipasi energi seismik.

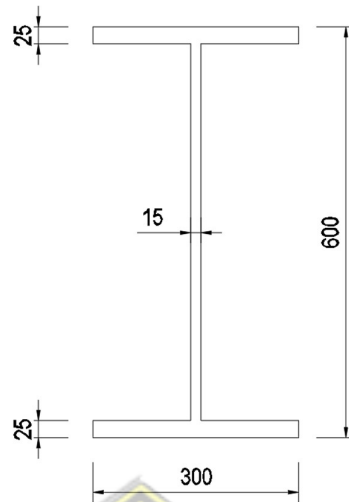
Dimensi elemen struktural yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan pertimbangan agar seluruh komponen memenuhi kriteria *seismic high ductile* sebagaimana disyaratkan dalam AISC 341-16 untuk struktur baja tahan gempa. Profil kolom, balok, dan bresing yang dipilih memiliki rasio kelangsingan, klasifikasi elemen penampang, dan spesifikasi material yang sesuai untuk mendukung perilaku inelastis yang stabil saat terjadi pembebanan siklik.

Geometri yang digunakan, seperti kolom dengan profil H 400x400x20x42 dan balok WF 600x300x15x25, telah diuji secara analitis dalam perhitungan dan dipastikan memenuhi batas rasio kelangsingan dan klasifikasi penampang daktail baik pada elemen badan maupun sayap. Demikian pula, bresing HSS 150x10 dipilih untuk memenuhi batas rasio kelangsingan bresing agar mampu mengalami deformasi reversibel tanpa kehilangan kapasitas secara drastis akibat tekuk. Dengan demikian, konfigurasi geometri yang digunakan sudah dirancang untuk mendukung terbentuknya mekanisme sendi plastis secara terkontrol dan memenuhi tujuan desain kapasitas dalam sistem RBKK.



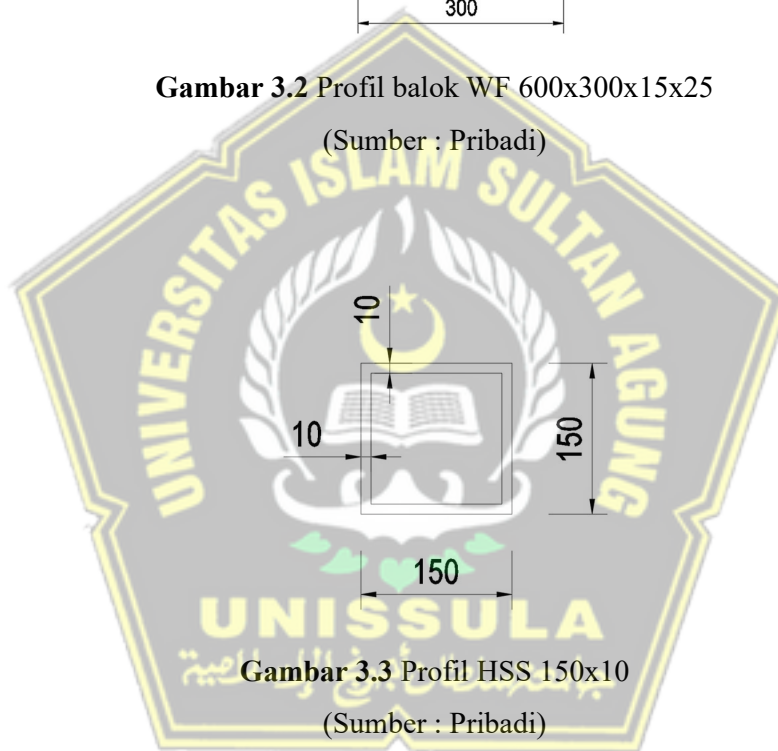
Gambar 3.1 Profil kolom H 400x400x20x42

(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.2 Profil balok WF 600x300x15x25

(Sumber : Pribadi)

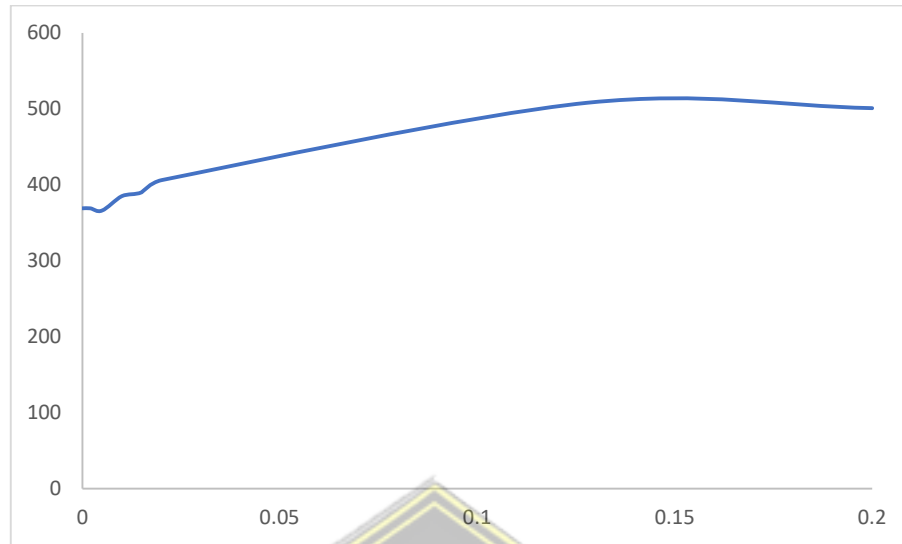


Gambar 3.3 Profil HSS 150x10

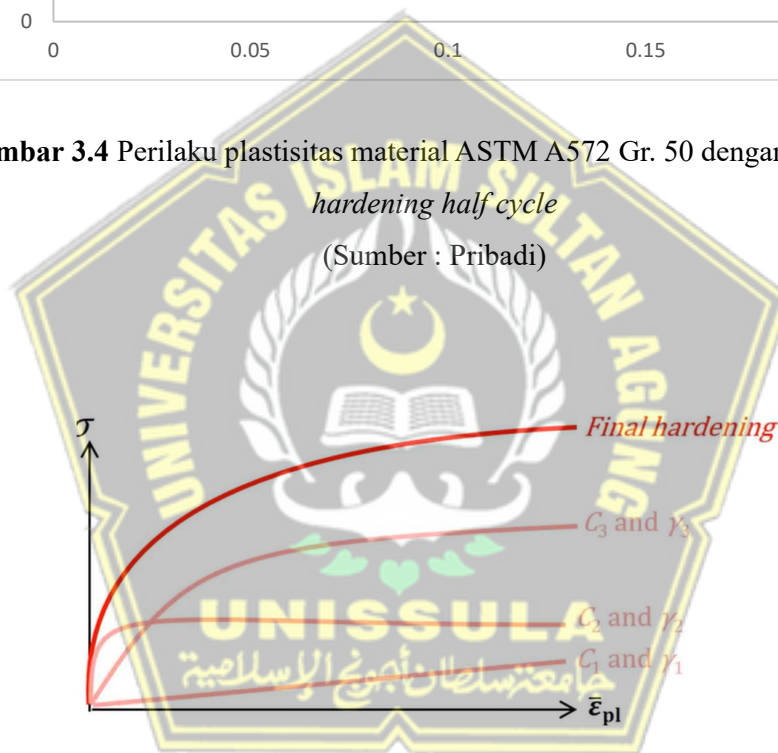
(Sumber : Pribadi)

3.2.2 Data Material

Spesifikasi material struktur baja dalam permodelan mengacu pada baja mutu tinggi ASTM A572 Gr. 50, dan ASTM A500 Gr. B. Model perilaku plastis material disimulasikan dengan pendekatan *kinematic hardening half cycle* dengan adanya *isotropic cyclic hardening* untuk ASTM A572 Gr. 50 dan *kinematic hardening parameters* dengan adanya *cyclic hardening* untuk ASTM A500 Gr. B yang memungkinkan terjadinya deformasi plastis setelah tegangan leleh tercapai.



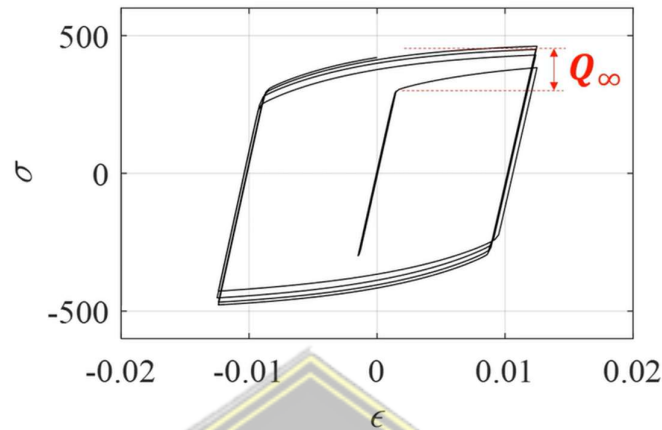
Gambar 3.4 Perilaku plastisitas material ASTM A572 Gr. 50 dengan *kinematic hardening half cycle*
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.5 Perilaku plastisitas material dengan *kinematic hardening parameter*
(Sumber : Ahmed Elkady, “*Metal Plasticity | Cyclic hardening*”, YouTube, <https://youtu.be/AqPV0SY0K2U?si=gmvuCl1tPrrAHL-vU>, diakses pada 4 Juli 2025)

Tabel 3.1 Parameter Material dengan *kinematic hardening parameter*

No.	Material	f_y (MPa)	C1 (MPa)	γ_1	C2 (MPa)	γ_2
1	ASTM A500 Gr. B	324,09	17707	207,18	1526,2	6,22

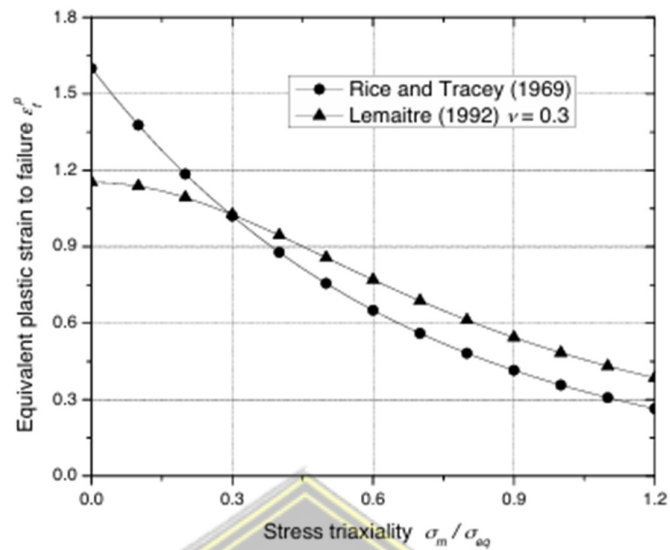


Gambar 3.6 Perilaku plastisitas material dengan *isotropic cyclic hardening*
(Sumber : Ahmed Elkady, “*Metal Plasticity | Cyclic hardening*”, YouTube,
<https://youtu.be/AqPV0SY0K2U?si=gmvuClPrrAHI-vU>, diakses pada 4 Juli
2025)

Tabel 3.2 Parameter Material *Isotropic Cyclic Hardening*

No.	Material	E (MPa)	f_y (MPa)	Q_{inf} (MPa)	b
1	ASTM A572 Gr. 50	206666	369	141,47	15,2
2	ASTM A500 Gr. B	191210	324,09	228,02	0,11

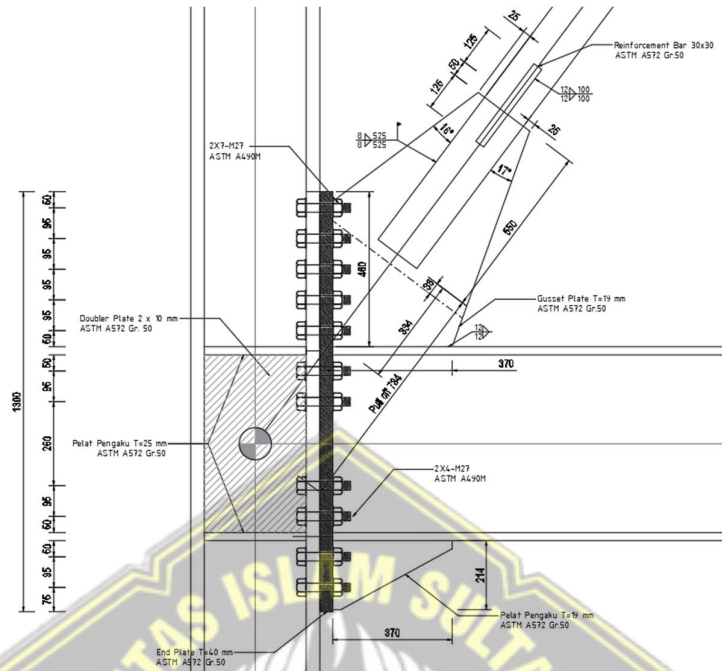
Data *ductile damage* untuk kedua material ini menggunakan acuan umum berdasarkan model dari *Rice & Tracey* (1969) untuk memahami perilaku kerusakan baja, meskipun nilai pastinya dapat berbeda tergantung jenis material yang digunakan. *Ductile damage* terjadi saat material menahan beban besar hingga mengalami regangan plastis yang akhirnya menyebabkan retak atau patah. Tingkat kerusakan ini dipengaruhi oleh kondisi tekanan di sekitar area retak atau biasa disebut triaksialitas tegangan. Semakin besar triaksialitas, semakin cepat material retak meski regangan plastisnya kecil. Hubungan ini digambarkan pada gambar di bawah, yang menunjukkan tren regangan plastis hingga gagal terhadap triaksialitas.



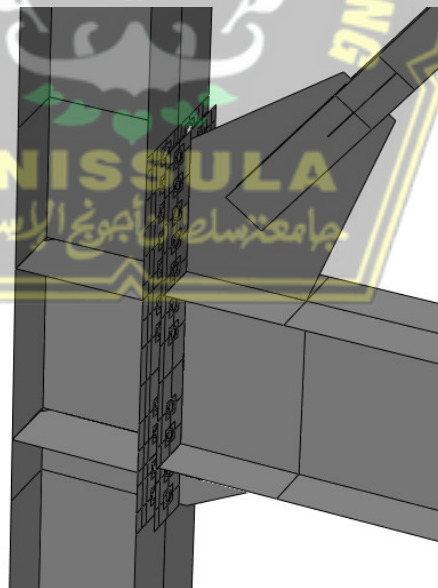
Gambar 3.7 Kurva *Equivalent Plastic Strain to Failure vs Stress Triaxiality*
(Sumber : Huang & Mahin, 2007)

3.2.3 Data Sambungan

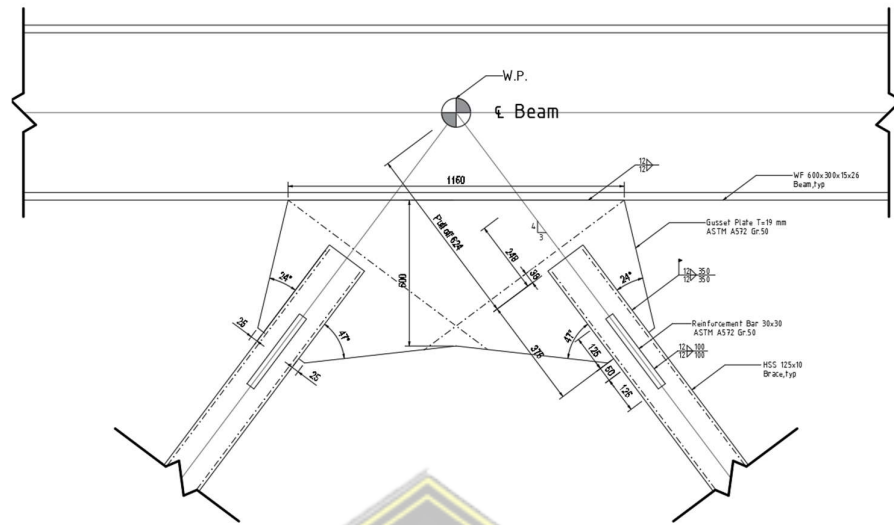
Data teknis sambungan untuk hubungan balok-kolom diperoleh dari standar AISC 358-16 yang mengatur sambungan tipe prakualifikasi. Dalam penelitian ini, digunakan tipe sambungan *Eight Bolt-Stiffened End Plate* dengan modifikasi khusus. Untuk sambungan bresing-balok, data teknis disesuaikan dengan AISC 341-16 karena tidak ada kode khusus yang mengatur spesifikasi sambungan bresing-balok secara langsung.



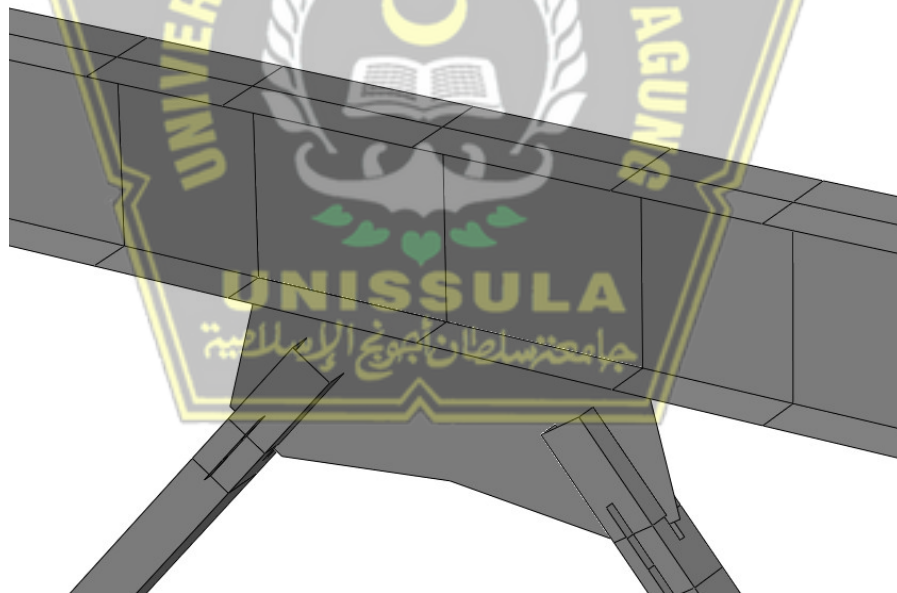
Gambar 3.12 Detail Sambungan Bresing-Balok-Kolom spesimen 1 dan 2
(Sumber : Pribadi)



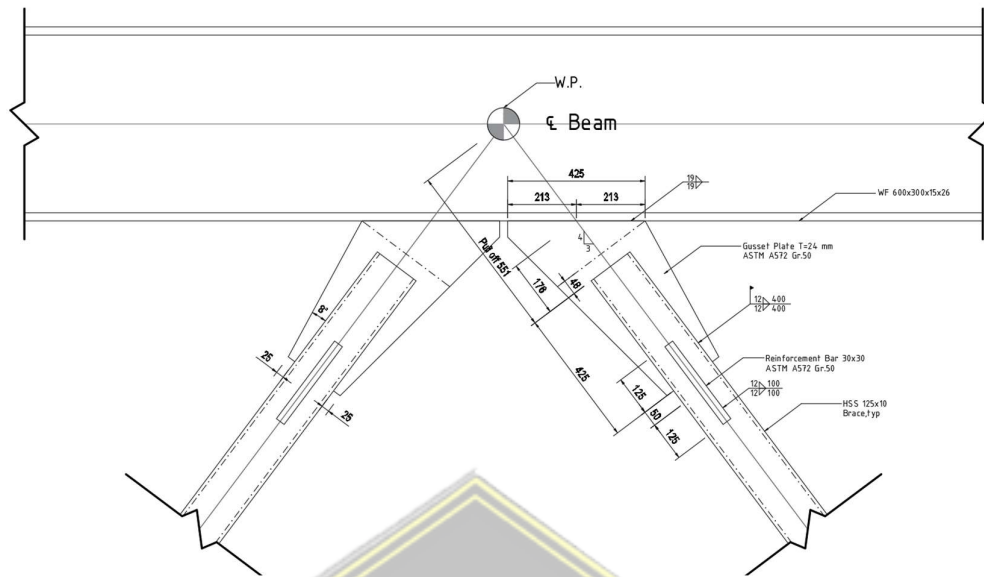
Gambar 3.13 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Balok-Kolom spesimen 1 dan 2
(Sumber : Pribadi)



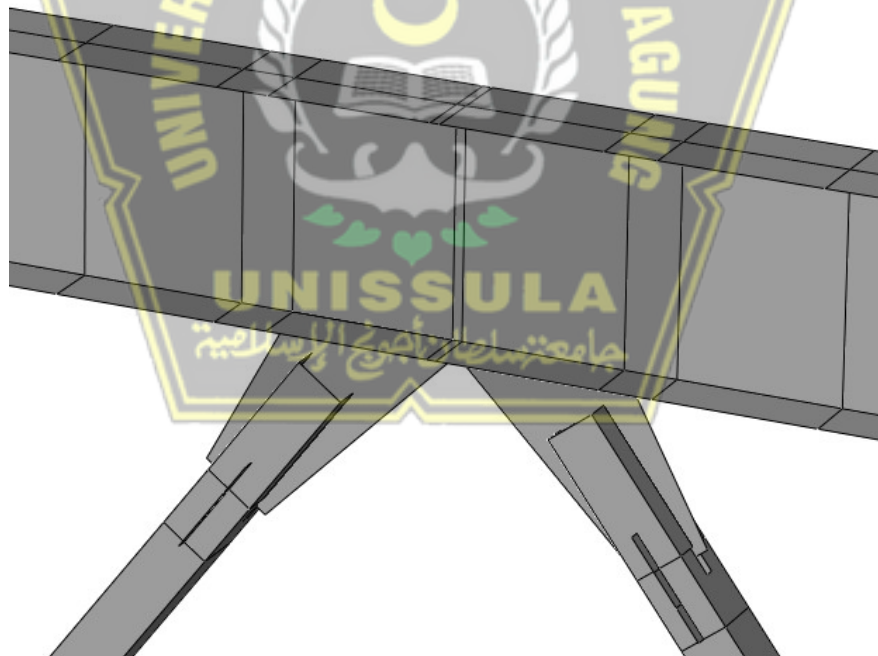
Gambar 3.16 Detail Sambungan Bresing-Balok spesimen 1
(Sumber : Pribadi)



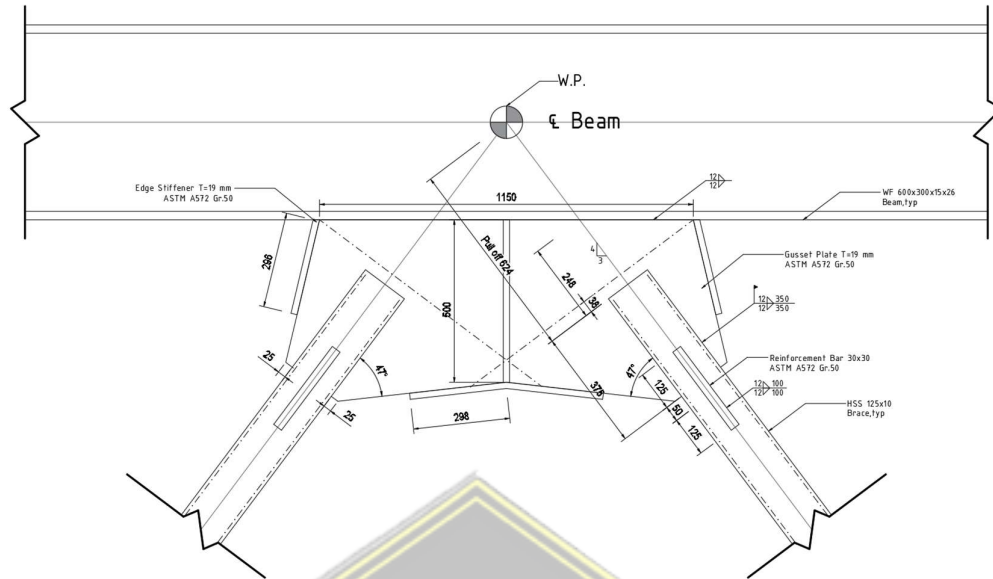
Gambar 3.17 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Balok spesimen 1
(Sumber : Pribadi)



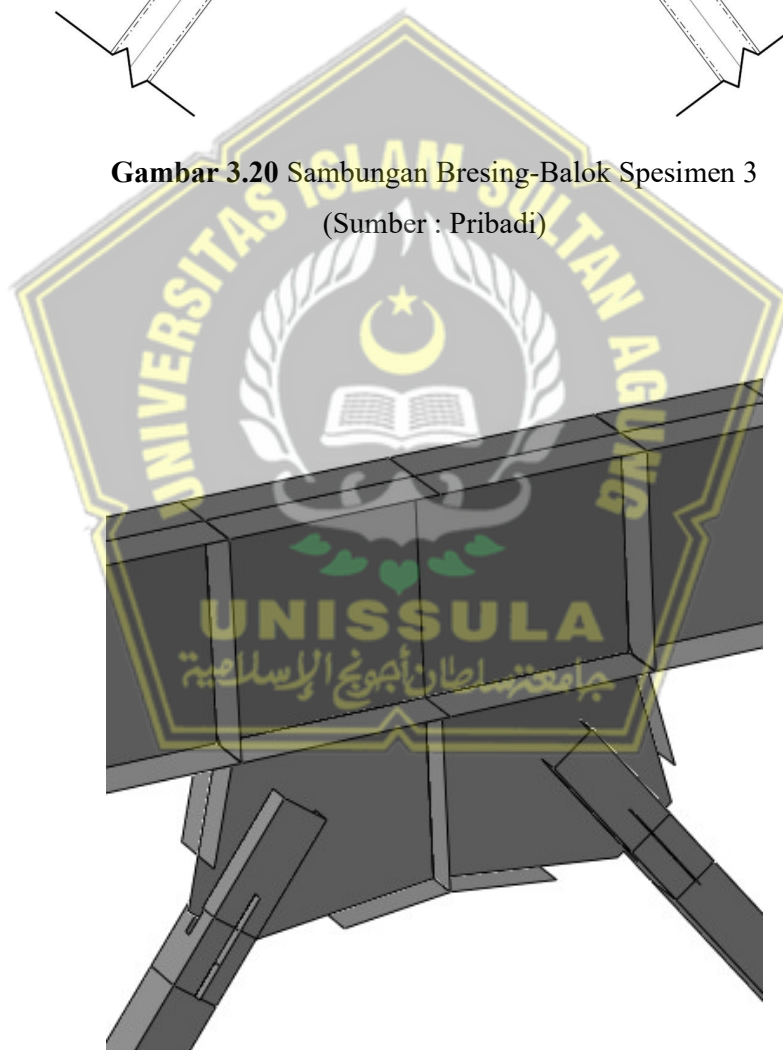
Gambar 3.18 Sambungan Bresing-Balok Spesimen 2
(Sumber : Pribadi)



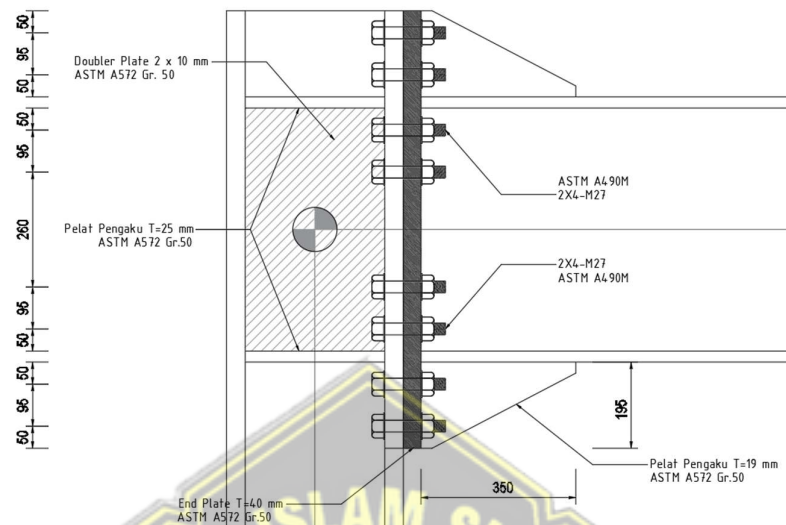
Gambar 3.19 Tampilan 3D Bresing-Balok Spesimen 2
(Sumber : Pribadi)



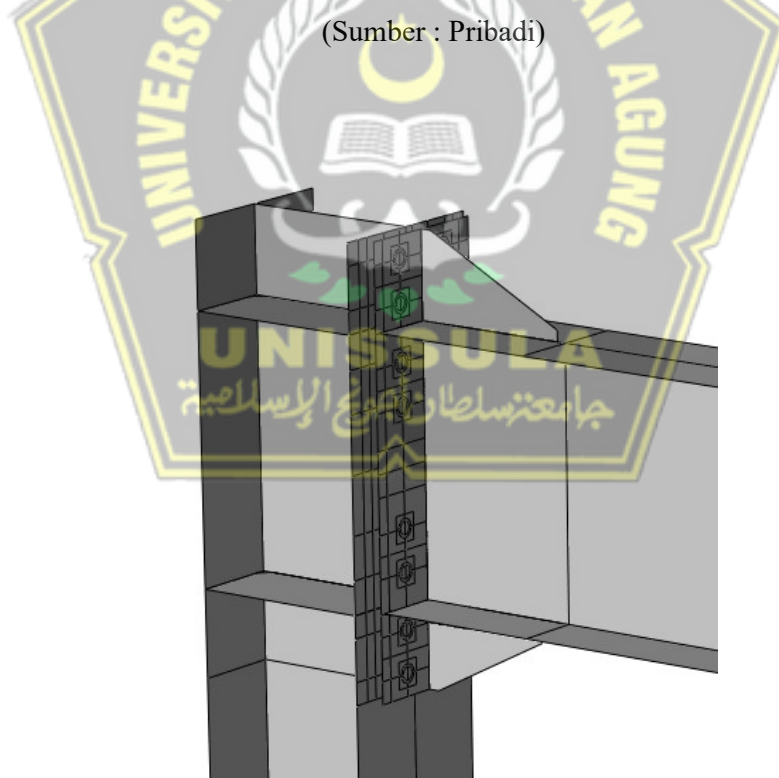
Gambar 3.20 Sambungan Bresing-Balok Spesimen 3
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.21 Tampilan 3D Sambungan Bresing-Balok spesimen 3
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.22 Detail Sambungan Balok-Kolom
(Sumber : Pribadi)



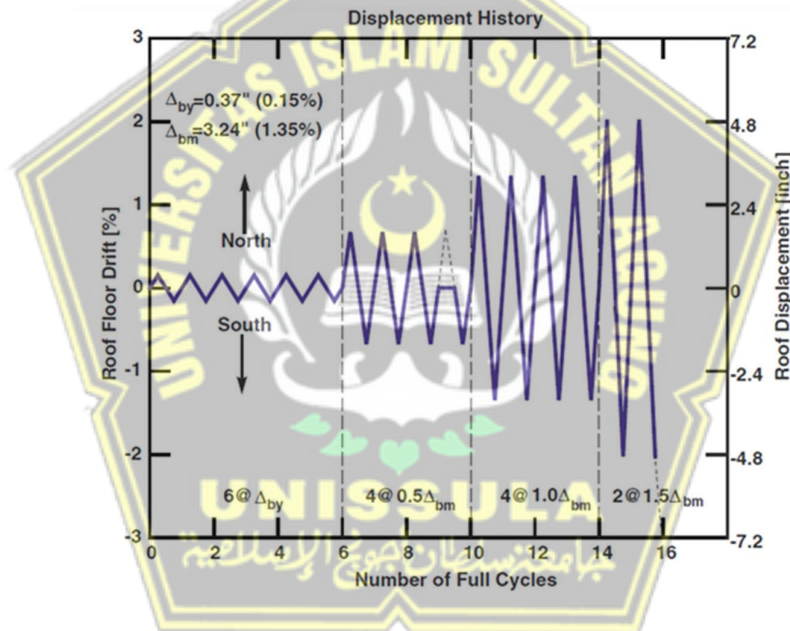
Gambar 3.23 Sambungan Balok-Kolom
(Sumber : Pribadi)

3.2.4 Data Pembebanan

Pola pembebanan yang diterapkan dalam simulasi mengacu pada protokol pembebanan siklik *displacement-controlled* berdasarkan FEMA 461. Data yang dikumpulkan meliputi :

- Urutan siklus beban (+ Δ , - Δ , +2 Δ , -2 Δ , dan seterusnya);
- Besar perpindahan target pada tiap siklus;
- Jumlah siklus per tingkat perpindahan;
- Tipe *loading* : *quasi-static cyclic*.

Data ini digunakan untuk mendefinisikan input pembebanan pada perangkat lunak FEM, sehingga perilaku struktur terhadap beban gempa dapat dimodelkan secara representatif.



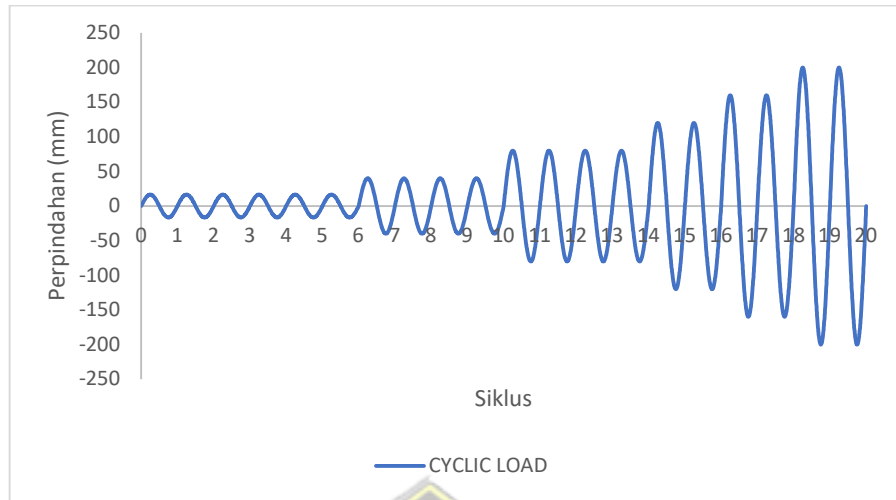
Gambar 3.24 Beban siklik berdasarkan displacement-controlled untuk RBKK

(Sumber : *Uriz & Mahin*, 2008)

Dimana :

Δ_{bm} = Nilai kuantitas deformasi, paling sedikit sama dengan *drift* tingkat desain yang sesuai (mm)

$\Delta\epsilon_{by}$ = Nilai dari kuantitas deformasi, pada leleh pertama dari spesimen uji (mm)



Gambar 3.25 Pembebanan yang akan digunakan pada spesimen

(Sumber : Pribadi)

3.3 Permodelan dan Analisis Numerik

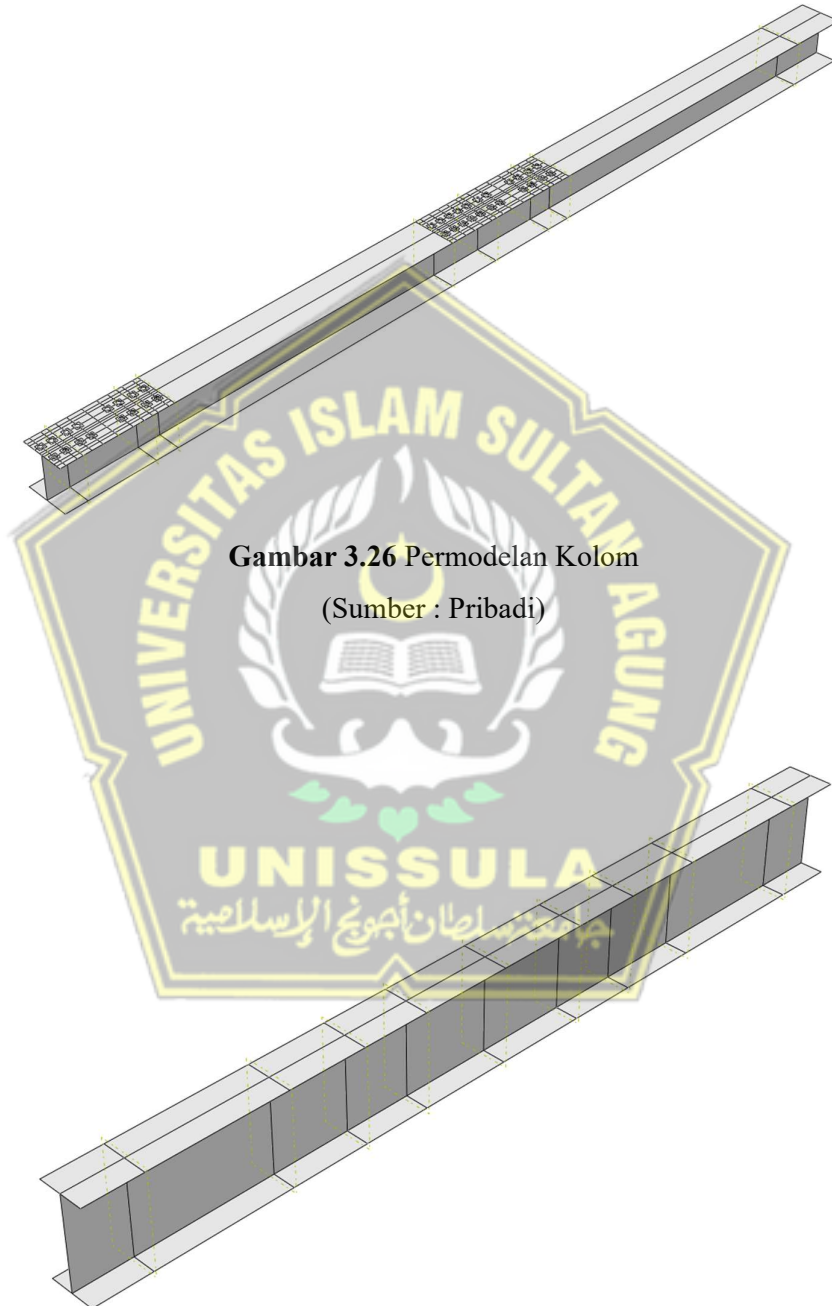
Dalam penelitian ini, proses permodelan dan analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak FEM. Tujuan utama dari permodelan ini adalah untuk menangkap respons nonlinier struktur baja tipe Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) konfigurasi *chevron* ketika dikenai beban siklik, khususnya untuk mengevaluasi perilaku histeretik, kapasitas plastis, dan potensi keruntuhan lokal.

3.3.1 Permodelan Tiap *Part*

Permodelan numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga untuk mensimulasikan respons struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) terhadap pembebanan siklik. Model dibuat dalam skala 1:1 sesuai dengan dimensi eksperimental. Permodelan ini mencakup beberapa komponen utama, yaitu kolom, balok, bresing, pelat simpul, pelat pengaku, dan *endplate*. Permodelan numerik dilakukan secara terpisah untuk masing-masing komponen struktur sebelum digabungkan dalam satu sistem Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK).

- **Kolom, Balok, dan Bresing**

Kolom, balok, dan bresing dimodelkan sebagai elemen *shell* untuk efisiensi komputasi serta kemampuan menangkap perilaku seperti *buckling* dan plastisitas, sesuai spesifikasi profil baja.

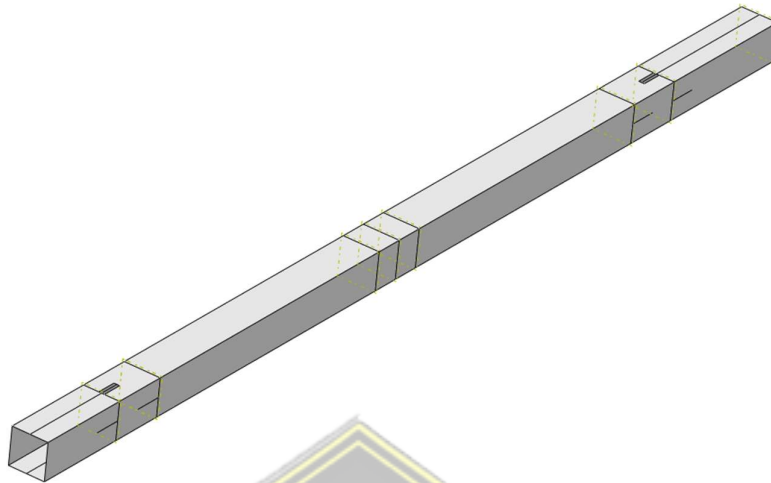


Gambar 3.26 Permodelan Kolom

(Sumber : Pribadi)

Gambar 3.27 Permodelan Balok

(Sumber : Pribadi)

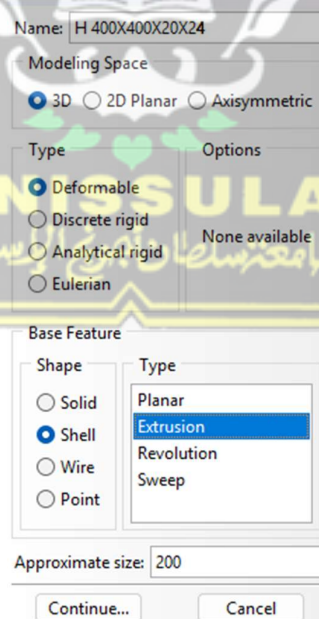


Gambar 3.28 Permodelan Bresing

(Sumber : Pribadi)

Langkah-langkah permodelan kolom, balok, dan bresing :

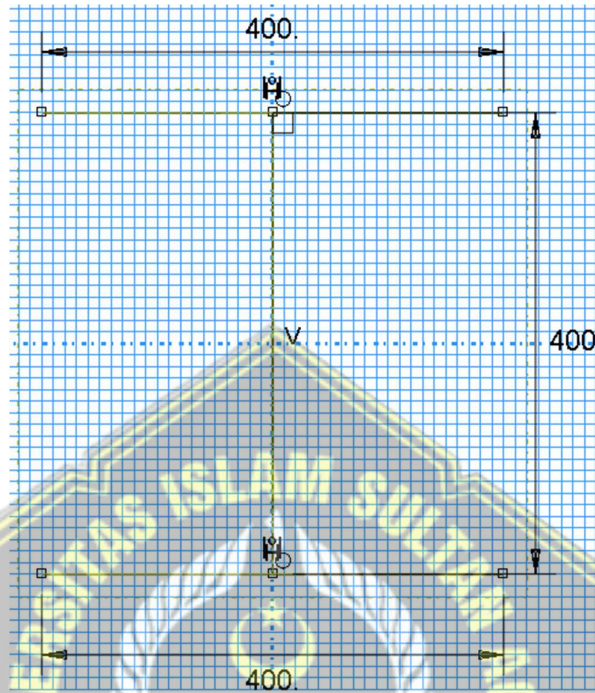
1. Membuat *part* baru pada perangkat lunak numerik di modul *part*, sesuaikan model *part* dengan tipe elemen, pilih opsi *extrusion*;



Gambar 3.29 Tampilan Jendela dari Pembuatan Part Beserta Tipe Elemen

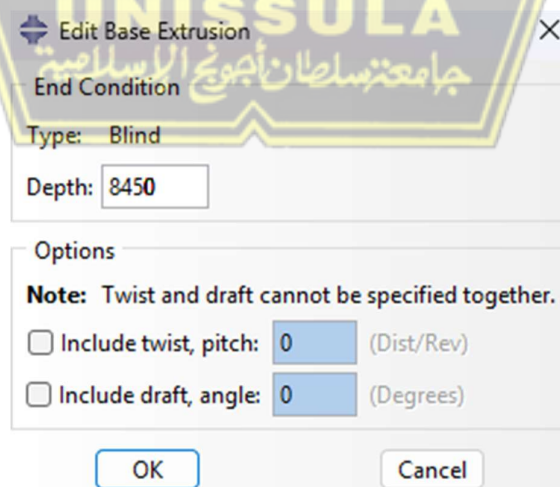
(Sumber : Pribadi)

2. Buat sketsa penampang *part* yang ingin dimodelkan sesuai spesifikasi dimensi aktual;



Gambar 3.30 Tampilan Jendela dari Pembuatan Sketsa *Part*
(Sumber : Pribadi)

3. Lakukan ekstrusi sepanjang panjang elemen;

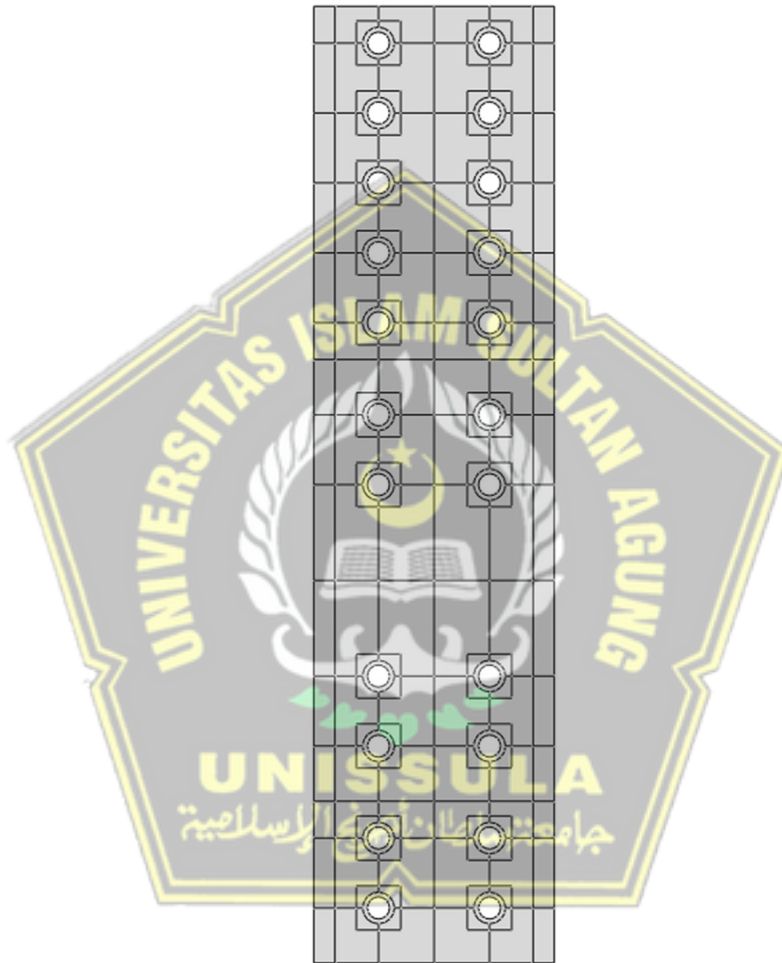


Gambar 3.31 Tampilan Jendela dari Ekstrusi Sketsa *Part*
(Sumber : Pribadi)

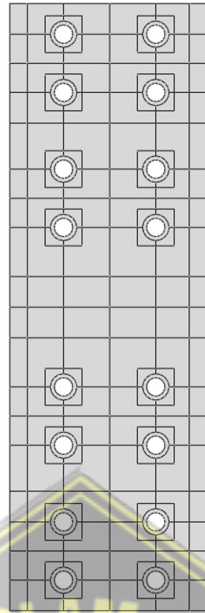
4. Lalu klik *done*.

- **Pelat simpul, Pelat Pengaku, dan *Endplate***

Pelat simpul, pelat pengaku, dan *endplate* dimodelkan sebagai elemen *shell* untuk efisiensi komputasi.



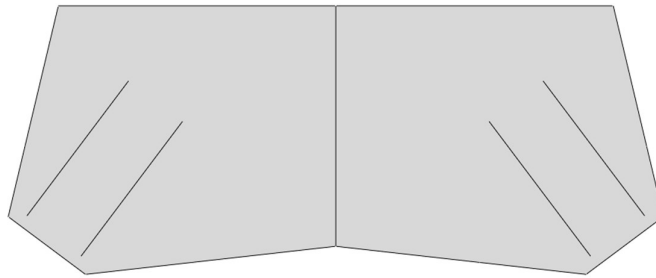
Gambar 3.32 Permodelan Endplate Balok Lantai 2
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.33 Permodelan Endplate Balok Lantai 3
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.34 Permodelan Pelat Pengaku pada Balok
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.35 Permodelan Pelat simpul

(Sumber : Pribadi)

Langkah-langkah permodelan pelat simpul, pelat pengaku, dan *endplate* :

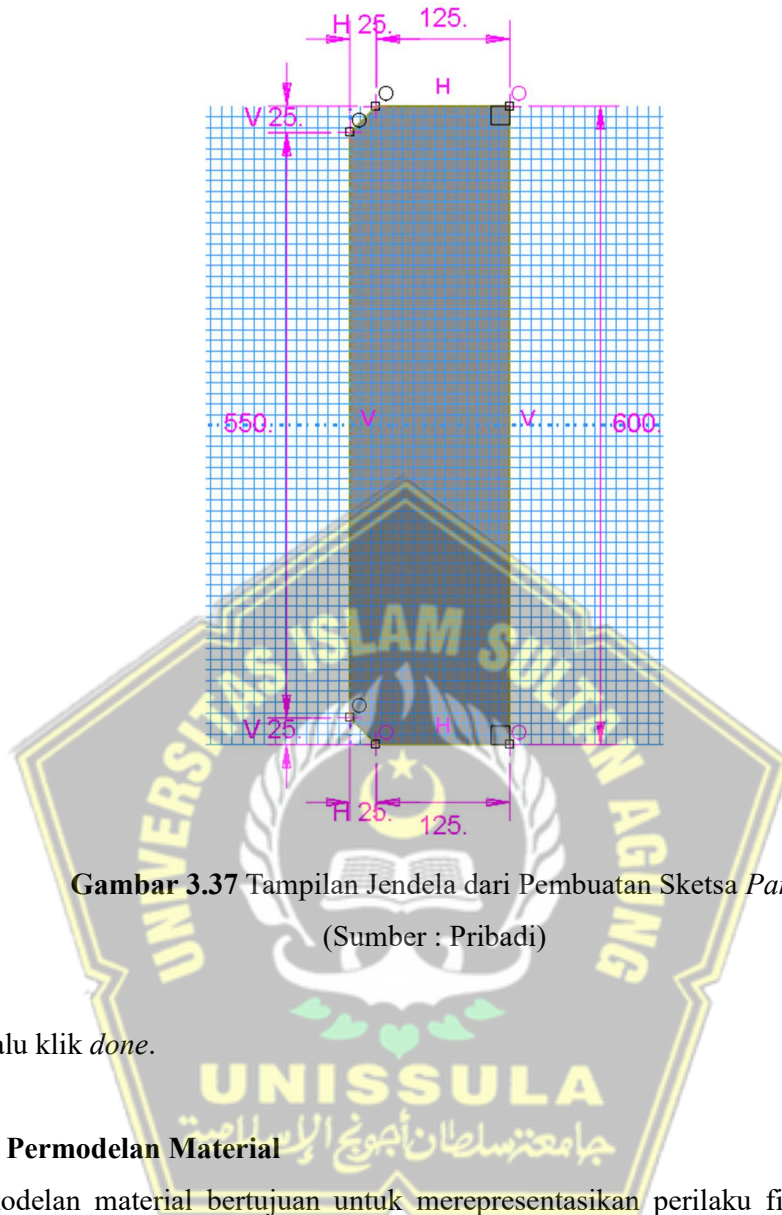
1. Membuat *part* baru pada perangkat lunak numerik di modul *part*, sesuaikan model *part* dengan tipe elemen, pilih opsi *planar*;



Gambar 3.36 Tampilan Jendela dari Pembuatan *Part* Beserta Tipe Elemen

(Sumber : Pribadi)

2. Buat sketsa penampang *part* yang ingin dimodelkan sesuai spesifikasi dimensi aktual;



Gambar 3.37 Tampilan Jendela dari Pembuatan Sketsa *Part*
(Sumber : Pribadi)

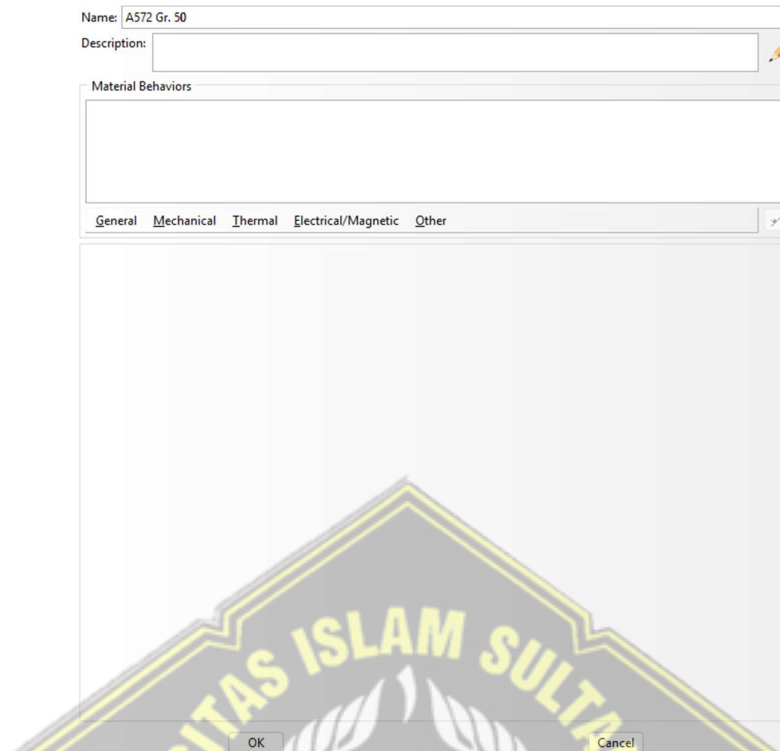
3. Lalu klik *done*.

3.3.2 Permodelan Material

Permodelan material bertujuan untuk merepresentasikan perilaku fisik material struktur ketika mengalami gaya luar, baik dalam mengalami gaya luar, baik dalam rentang elastis maupun plastis. Semua elemen struktur dimodelkan sebagai baja struktural dengan karakteristik sesuai spesifikasi material yang digunakan.

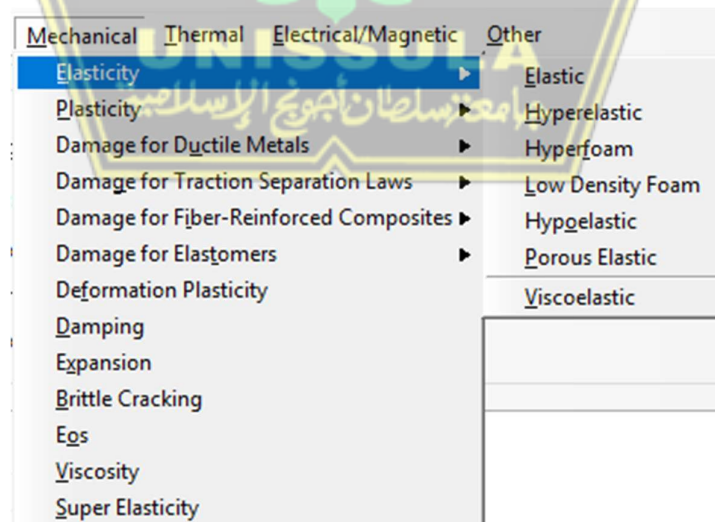
Langkah-langkah permodelan material :

1. Pada modul *property*, klik *create material* dan akan muncul tampilan jendela *create material*;



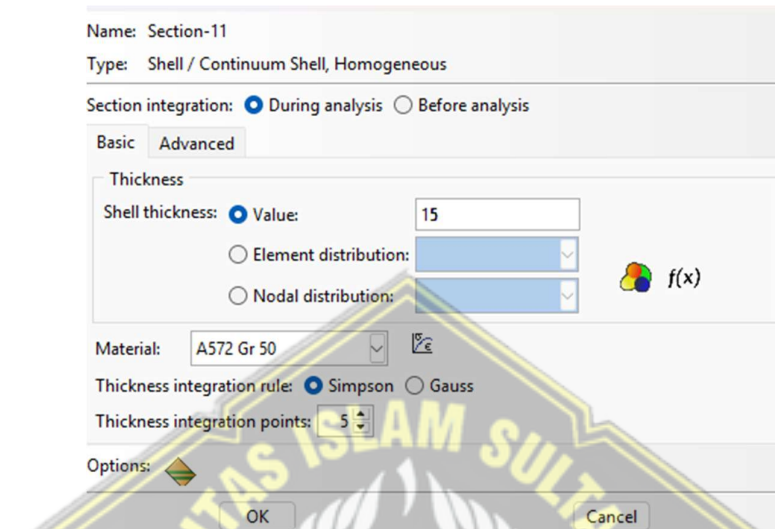
Gambar 3.38 Tampilan Jendela Penyuntingan Material
(Sumber : Pribadi)

2. Masukkan spesifikasi material struktur baja sesuai dengan spesifikasi yang dipakai dengan cara pilih data material yang ingin dimasukkan ;



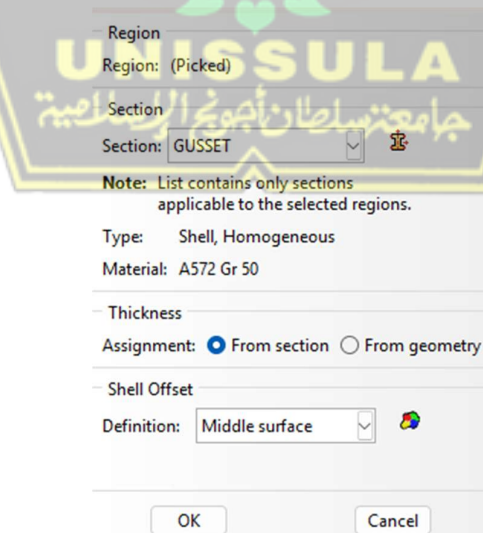
Gambar 3.39 Tampilan Jendela Data Material yang dapat didefinisikan
(Sumber : Pribadi)

3. Setelah selesai memasukkan data spesifikasi material, klik OK;
4. Lalu klik *Create Section* pada modul *Property* dan buat definisi penampang (termasuk tebal penampang) yang akan dimasukkan definisi material, setelah selesai klik OK;



Gambar 3.40 Tampilan Jendela Penyuntingan Bagian Penampang
(Sumber : Pribadi)

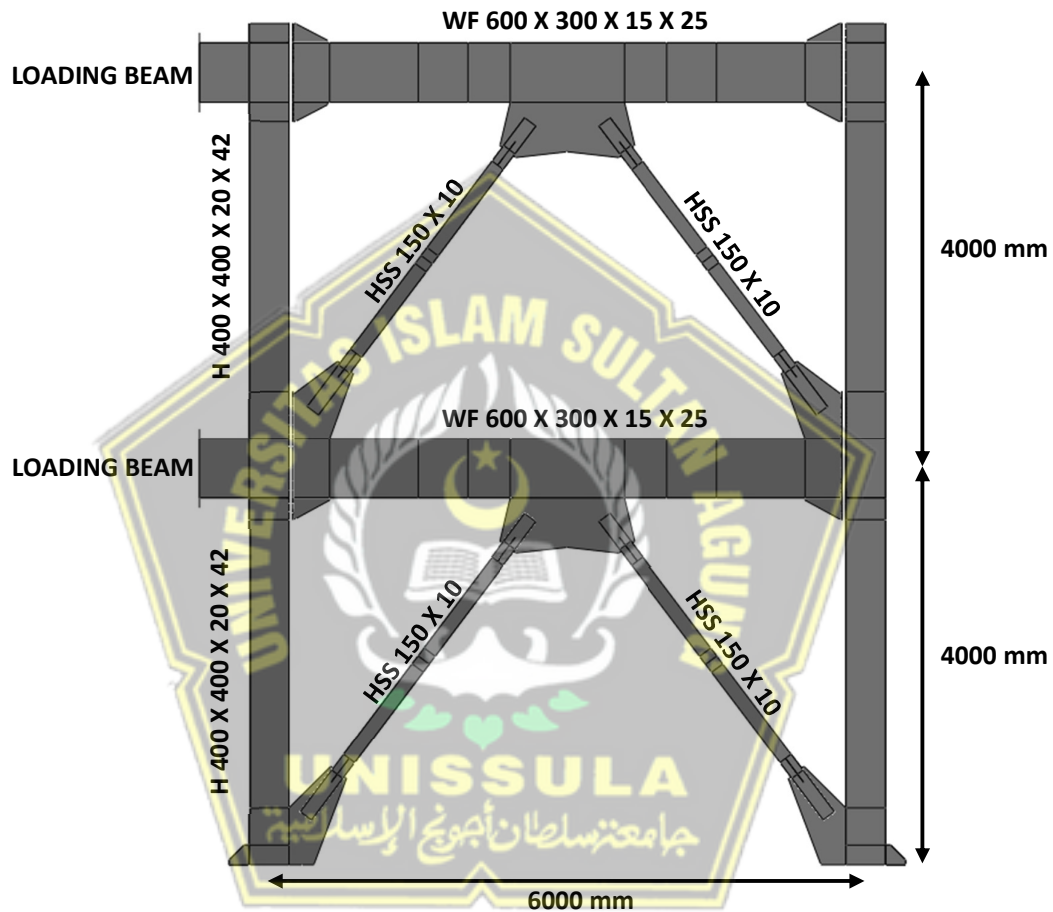
5. Tentukan penampang yang akan didefinisikan materialnya dengan menggunakan menu *assign section*;



Gambar 3.41 Tampilan Jendela Penyuntingan Penentuan Penampang
(Sumber : Pribadi)

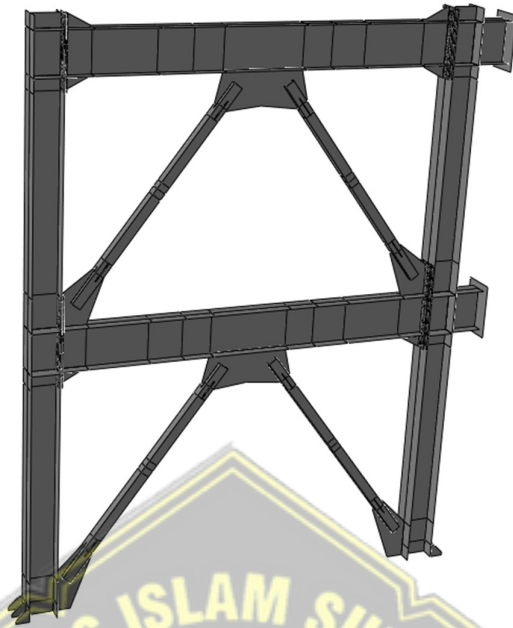
3.3.3 Definisi Perakitan, Interaksi, dan Sambungan

Proses perakitan (*assembly*) merupakan tahap lanjutan setelah permodelan setiap komponen struktur secara terpisah. Dalam tahap ini, seluruh elemen seperti balok, kolom, bresing, dan pelat sambungan disusun ke dalam satu sistem struktur lengkap. Penempatan elemen dilakukan secara presisi dengan pengaturan posisi sesuai koordinat global model.

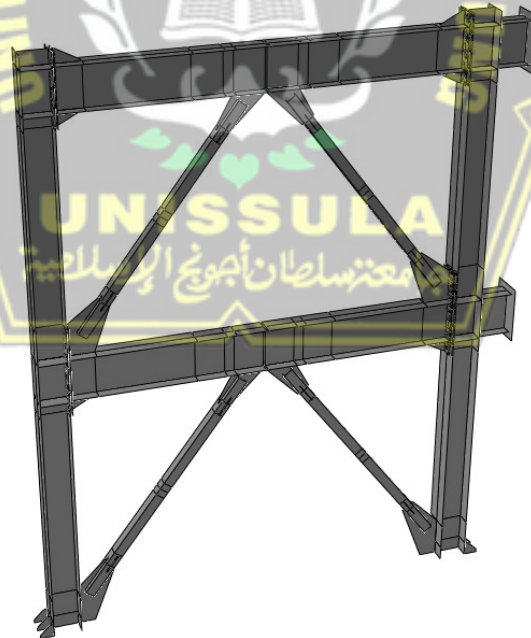


Gambar 3.42 Perakitan Komponen pada Model Perangkat Lunak FEM

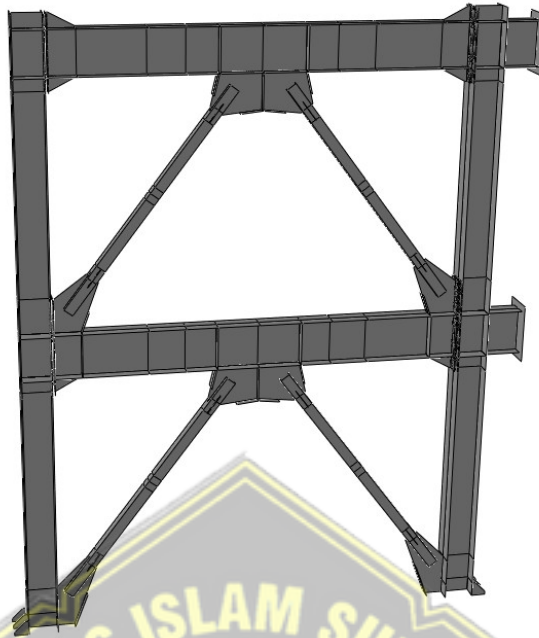
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.43 Visualisasi perakitan RBKK spesimen 1
(Sumber : Pribadi)



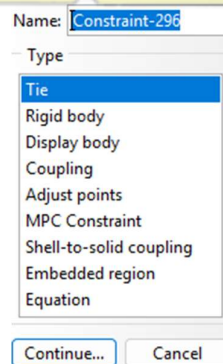
Gambar 3.44 Visualisasi perakitan RBKK spesimen 2
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.45 Visualisasi perakitan RBKK spesimen 3
(Sumber : Pribadi)

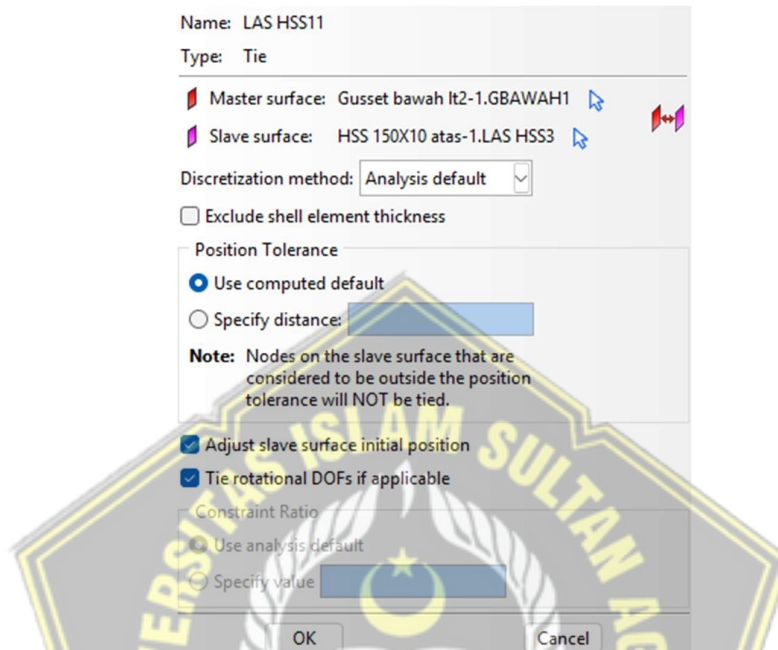
Sambungan antar komponen seperti antara bresing dan pelat simpul, atau antara balok dan kolom, dimodelkan dengan pendekatan yang disesuaikan terhadap perilaku aktual sambungan. Tiga pendekatan utama yang digunakan dalam mendefinisikan interaksi adalah :

- *Tie Constraint* : digunakan ketika sambungan diasumsikan menyatu sempurna (tanpa slip). Langkah-langkah permodelan *tie constraint* :
1. Pada modul *Interaction*, pilih *create constraint* lalu pilih *tie*;



Gambar 3.46 Tampilan Jendela *Create Constraint*
(Sumber : Pribadi)

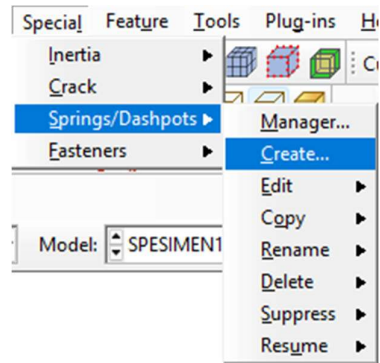
2. Lalu pilih permukaan yang akan dijadikan permukaan utama dan permukaan sekunder;
3. Lalu klik OK.



Gambar 3.47 Tampilan Jendela *Edit Constraint* untuk *Tie Constraint*
(Sumber : Pribadi)

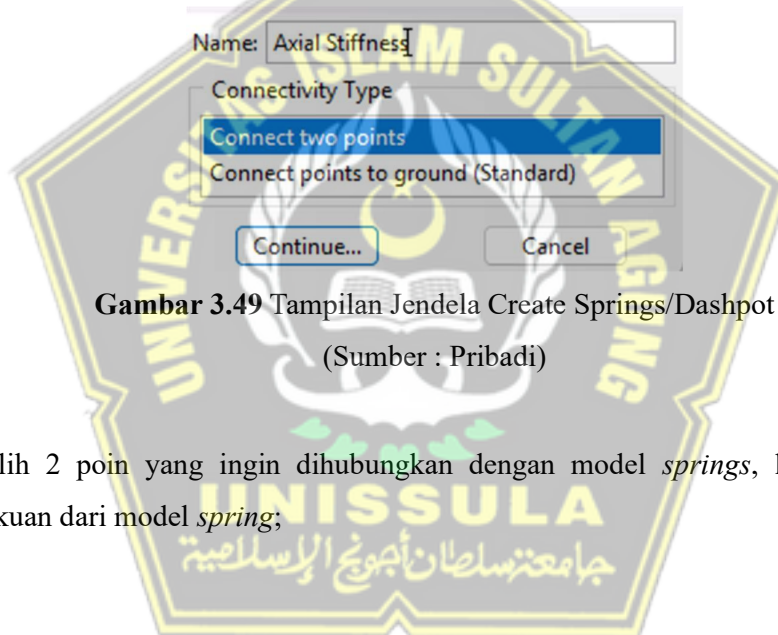
- *Gap Element* : digunakan untuk mensimulasikan interaksi yang hanya saat terjadi kontak, dan kekakuannya dipengaruhi oleh modulus elastisitas material serta ukuran *mesh* di area kontak, sehingga nilai kekakuannya tidak tetap melainkan tergantung kondisi lokal model. Langkah-langkah dalam mendefinisikan *gap element* yaitu :

1. Pada modul *Interaction*, pergi ke menu *Special*, lalu pilih *Springs/Dashpot*, lalu klik *create*;



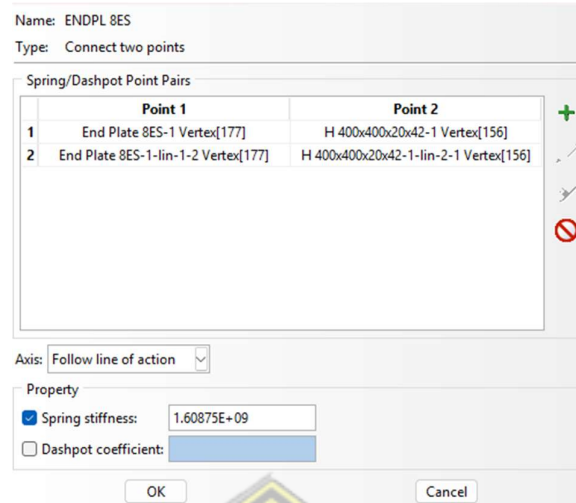
Gambar 3.48 Menu *Special* pada Perangkat Lunak Numerik
(Sumber : Pribadi)

2. Untuk tipe konektivitas pilih *connect two points* lalu klik OK;



Gambar 3.49 Tampilan Jendela Create Springs/Dashpot
(Sumber : Pribadi)

3. Pilih 2 poin yang ingin dihubungkan dengan model *springs*, lalu isi nilai kekakuan dari model *spring*;



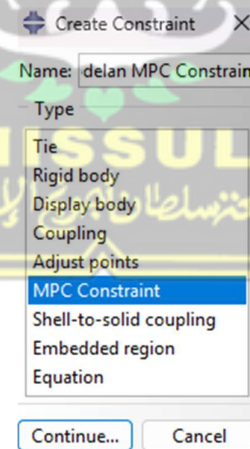
Gambar 3.50 Tampilan Jendela Edit Springs/Dashpot

(Sumber : Pribadi)

4. Klik OK.

- *Beam MPC Constraint* : digunakan untuk mengikat beberapa *node* untuk mensimulasikan kondisi batas atau perilaku sambungan yang kompleks tanpa harus membuat elemen tambahan. Langkah-langkah permodelan *Beam MPC Constraint*:

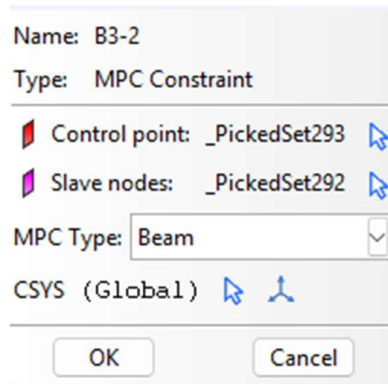
1. Pada modul *Interaction*, pilih *create constraint* lalu pilih *MPC Constraint*;



Gambar 3.51 Tampilan Jendela *Create Constraint*

(Sumber : Pribadi)

2. Pilih *node* yang akan dijadikan *control point* dan *slave point*, untuk tipe MPC, pilih *beam*;



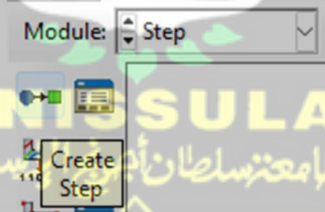
Gambar 3.52 Tampilan Jendela *Edit Constraint* untuk *MPC Constraint*
(Sumber : Pribadi)

3. Klik OK.

3.3.4 Definisi *Step*

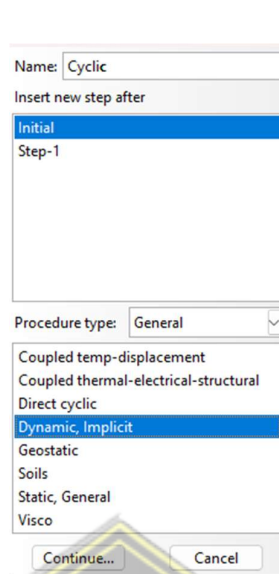
Dalam simulasi ini, proses pembebanan siklik terhadap struktur dimodelkan menggunakan pendekatan *Dynamic Implicit*, yang sesuai untuk analisis nonlinier *quasi-static* dengan pergerakan lambat. Langkah-langkah pendefinisian *step* :

1. Pada modul *Step*, pilih *Create Step*;



Gambar 3.53 Letak *Create Step* pada modul *Step*
(Sumber : Pribadi)

2. Pilih tipe *Dynamic Implicit*;



Gambar 3.54 Tampilan Jendela *Create Step*

(Sumber : Pribadi)

3. Atur parameter waktu sesuai dengan jumlah siklus beban, aktifkan *nonlinear geometry*, dan *quasi-static*;



Gambar 3.55 Tampilan Jendela *Edit Step*

(Sumber : Pribadi)

4. Pada menu *Incrementation*, atur *increment size* sesuai dengan yang dibutuhkan untuk analisis lalu klik OK;

Gambar 3.56 Tampilan Jendela *Edit Step*
(Sumber : Pribadi)

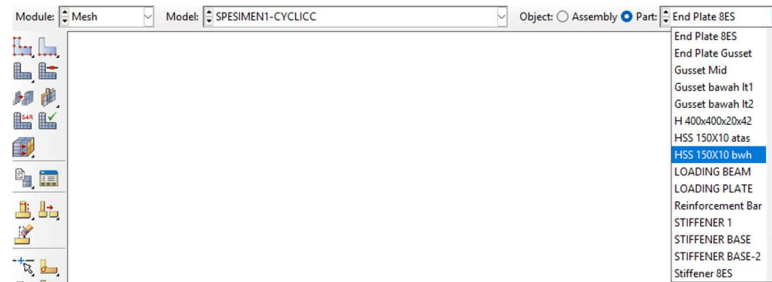
3.3.5 Meshing

Proses *meshing* pada elemen struktur bertujuan untuk mendeskripsikan elemen menjadi unit-unit diskret yang lebih kecil, sehingga memungkinkan analisis numerik yang akurat dan rinci. Tahapan ini meliputi :

- Pengaturan kontrol *mesh*, yang berfungsi untuk menentukan konfigurasi geometris elemen, seperti *hex*, *hex-dominated*, *tet*, dan *wedge*.
- Penentuan tipe elemen, yaitu pemilihan karakteristik elemen yang digunakan, seperti elemen *standard*, *linear*, atau *quadratic*, sesuai dengan kebutuhan analisis;
- Penentuan ukuran *mesh*, yang merujuk pada skala dimensi elemen. Ukuran ini dapat ditentukan secara manual ditentukan oleh pengguna atau otomatis oleh *software*.

Langkah-langkah dalam proses *meshing* pada perangkat lunak numerik :

1. Pada modul *Mesh*, pilih opsi *part* pada objek, dengan tujuan bahwa *meshing* dilakukan tiap bagian;



Gambar 3.57 Tampilan *User Interface* Perangkat Lunak Numerik
(Sumber : Pribadi)

2. Pilih *Seed Part*;



Gambar 3.58 Opsi *Seed Part* pada Perangkat Lunak Numerik
(Sumber : Pribadi)

3. Isi nilai ukuran *mesh* sesuai dengan satuan panjang yang dipakai;

Gambar 3.59 Tampilan Jendela *Global Mesh* pada Perangkat Lunak Numerik
(Sumber : Pribadi)

4. Klik *Apply*, lalu OK.

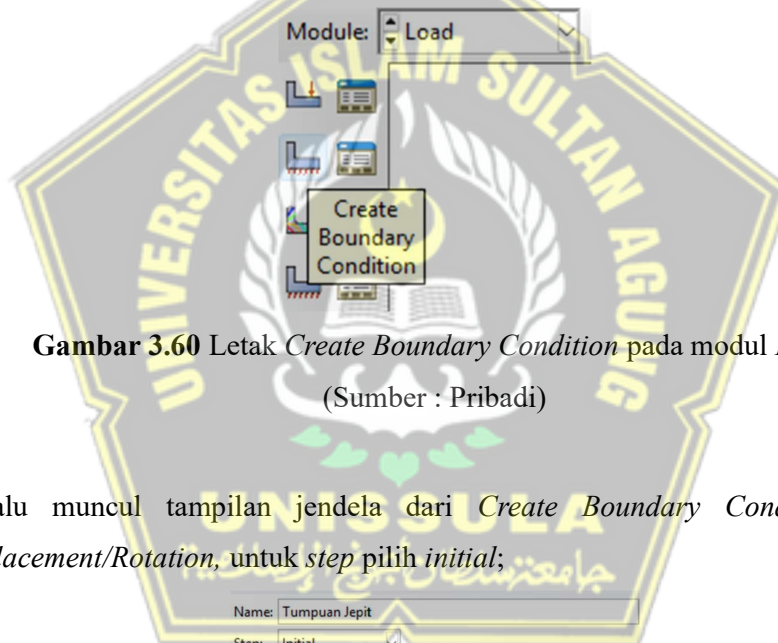
3.3.6 Kondisi Batas dan Tumpuan

Struktur dimodelkan dengan kondisi batas sebagai berikut :

- Kolom dasar ditumpu secara penuh (*fixed support*) untuk mencegah translasi dan rotasi (U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3);
- Ujung atas kolom dan simpul balok dibebaskan untuk menerima deformasi akibat beban lateral;
- Deformasi lateral diberikan pada titik kontrol (*reference point*) yang terhubung ke bagian atas struktur, pada bagian ujung atas kolom ini terdapat *loading beam* sebagai penyalur beban dari aktuator.

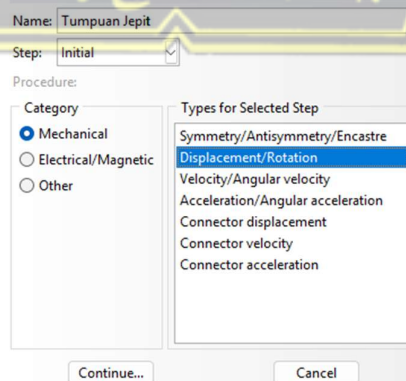
Langkah-langkah dalam permodelan kondisi batas :

1. Pada modul *Load*, klik *Create Boundary Condition*;



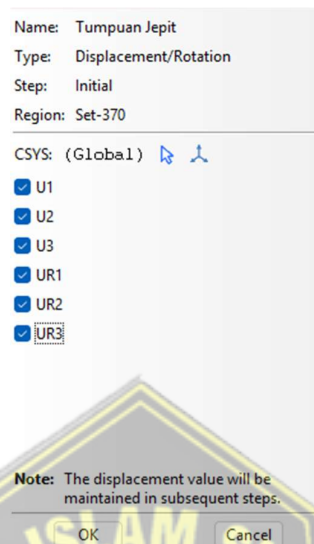
Gambar 3.60 Letak *Create Boundary Condition* pada modul *Load*
(Sumber : Pribadi)

2. Lalu muncul tampilan jendela dari *Create Boundary Condition*, pilih *Displacement/Rotation*, untuk step pilih *initial*;



Gambar 3.61 Tampilan Jendela *Create Boundary Condition*
(Sumber : Pribadi)

3. Pilih *node/surface* yang akan didefinisikan sebagai tumpuan;
4. Lalu centang arah perpindahan/rotasi yang akan didefinisikan sebagai tumpuan;



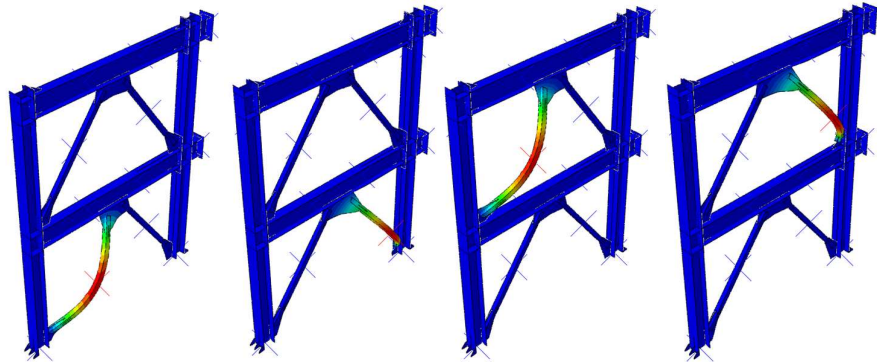
Gambar 3.62 Tampilan Jendela *Edit Boundary Condition*
(Sumber : Pribadi)

5. Klik OK.

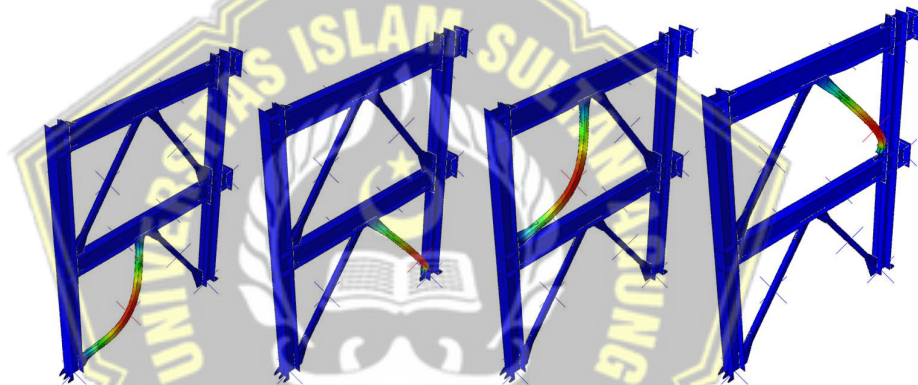
3.3.7 *Geometry Imperfection*

Geometry imperfection adalah penyimpangan bentuk geometri struktur dari kondisi ideal atau sempurna yang terjadi akibat ketidaksempurnaan fabrikasi, kesalahan konstruksi, atau kondisi awal struktur di lapangan. *Imperfection* ini bisa berupa kelengkungan awal pada kolom atau bresing, eksentrisitas sambungan, maupun ketidaklurusan akibat toleransi fabrikasi.

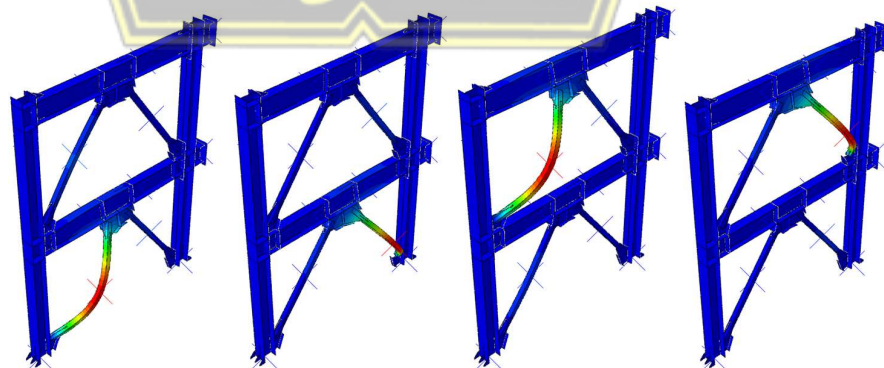
Dalam analisis numerik, *geometry imperfection* perlu dimasukkan ke model karena pada kenyataannya, tidak ada struktur yang benar-benar sempurna. *Imperfection* ini sangat berpengaruh terhadap respons inelastik, terutama dalam fenomena seperti *buckling* awal, perilaku pasca-*buckling*, dan kinerja seismik.



Gambar 3.63 *Buckling mode 1-4* spesimen 1
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.64 *Buckling mode 1-4* spesimen 2
(Sumber : Pribadi)



Gambar 3.65 *Buckling mode 1-4* spesimen 3
(Sumber : Pribadi)

3.3.8 Prosedur Pembebanan

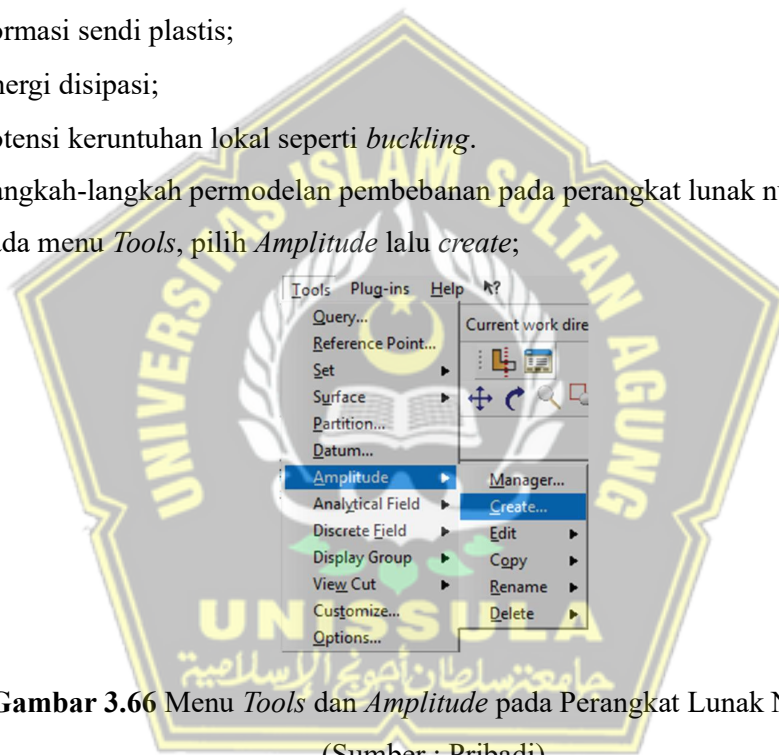
Pembebanan diterapkan menggunakan pendekatan *displacement-controlled quasi-static loading*. Titik kontrol yang ditetapkan pada puncak struktur akan diberikan perpindahan siklik maju mundur sesuai protokol FEMA 461. Pola pembebanan terdiri dari beberapa siklus yang makin meningkat amplitudonya untuk mensimulasikan beban gempa secara bertahap.

Siklus beban ini dirancang untuk mengamati fenomena seperti :

- Degradasi kekakuan;
- Degradasi kekuatan;
- Formasi sendi plastis;
- Energi disipasi;
- Potensi keruntuhan lokal seperti *buckling*.

Langkah-langkah permodelan pembebanan pada perangkat lunak numerik:

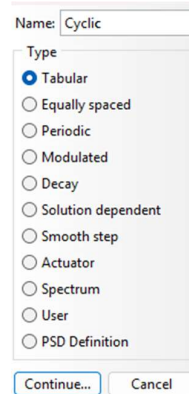
1. Pada menu *Tools*, pilih *Amplitude* lalu *create*;



Gambar 3.66 Menu *Tools* dan *Amplitude* pada Perangkat Lunak Numerik

(Sumber : Pribadi)

2. Pilih tipe dari *amplitude* sesuai dengan yang ingin didefinisikan;



Name: Cyclic

Type

☒ Tabular

☐ Equally spaced

☐ Periodic

☐ Modulated

☐ Decay

☐ Solution dependent

☐ Smooth step

☐ Actuator

☐ Spectrum

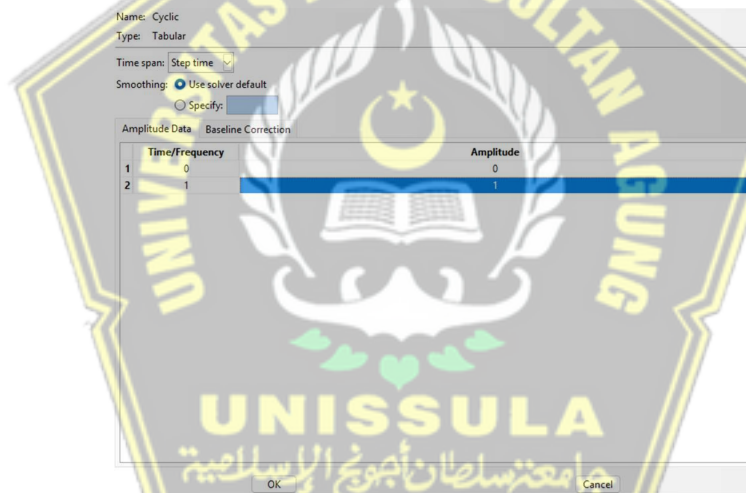
☐ User

☐ PSD Definition

Continue... Cancel

Gambar 3.67 Tampilan Jendela *Create Amplitude*
(Sumber : Pribadi)

3. Masukkan data sesuai dengan *loading history* yang dipakai, lalu klik OK;



Name: Cyclic

Type: Tabular

Time span: Step time

Smoothing: ☒ Use solver default

☐ Specify:

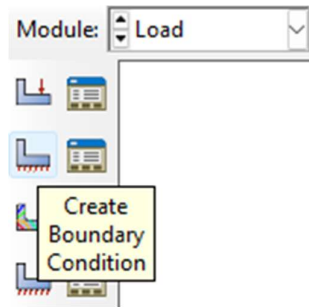
Amplitude Data Baseline Correction

	Time/Frequency	Amplitude
1	0	0
2	1	1

OK Cancel

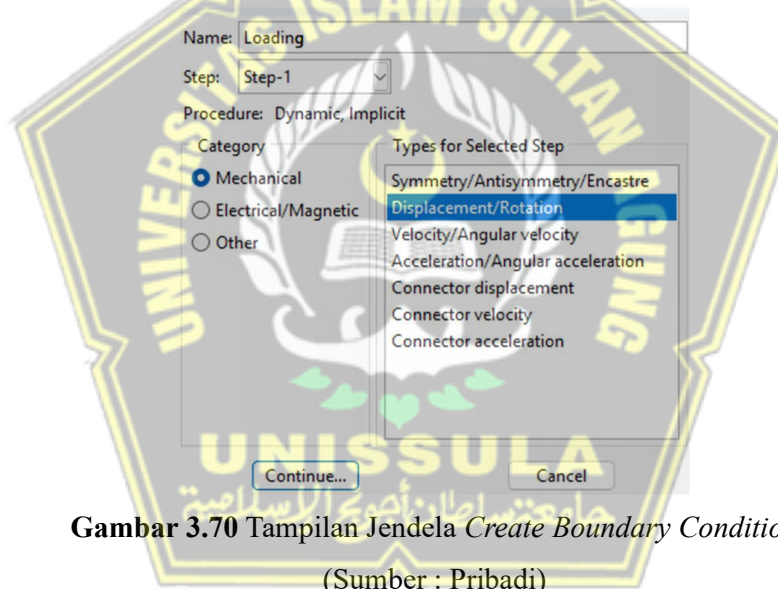
Gambar 3.68 Tampilan Jendela *Edit Amplitude*
(Sumber : Pribadi)

4. Pada modul *Load*, klik *Create Boundary Condition*;



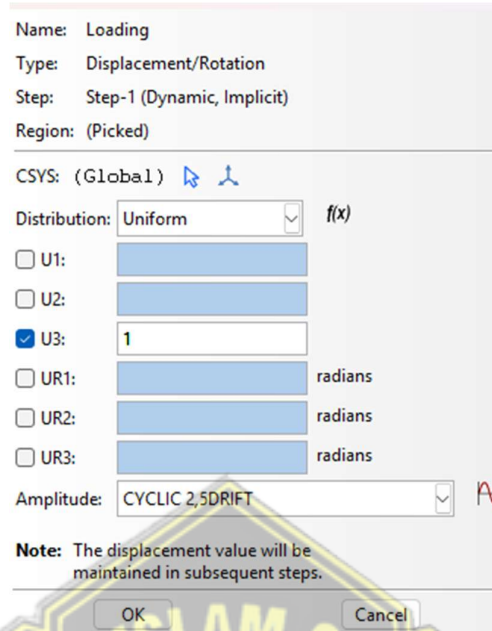
Gambar 3.69 Letak *Create Boundary Condition* pada modul *Load*
(Sumber : Pribadi)

5. Lalu muncul tampilan jendela dari *Create Boundary Condition*, pilih *Displacement/Rotation*, untuk *step* pilih *step* yang sudah didefinisikan sebelumnya untuk analisis;



Gambar 3.70 Tampilan Jendela *Create Boundary Condition*
(Sumber : Pribadi)

6. Pilih *node* yang akan dibebani;
7. Lalu centang dimana arah beban yang akan dilakukan pembebanan beserta nilai dari beban tersebut, pilih *Amplitude* sesuai dengan yang sudah didefinisikan sebelumnya;



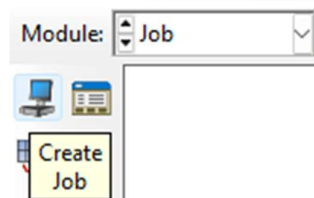
Gambar 3.71 Tampilan Jendela *Edit Boundary Condition*
(Sumber : Pribadi)

8. Klik OK.

3.3.9 Pembuatan *Job* dan Simulasi

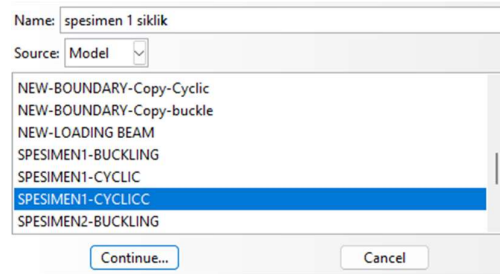
Setelah seluruh elemen dalam model termasuk geometri, material, *boundary condition*, dan step analisis selesai didefinisikan, proses selanjutnya adalah pembuatan *job* untuk menjalankan simulasi numerik. Langkah-langkah pembuatan *job* :

1. Pada modul *Job*, klik *Create Job*;



Gambar 3.72 Letak *Create Job* pada Modul *Job*
(Sumber : Pribadi)

2. Pilih model dan step yang sudah dibuat sebelumnya;



Gambar 3.73 Tampilan Jendela *Create Job*

(Sumber : Pribadi)

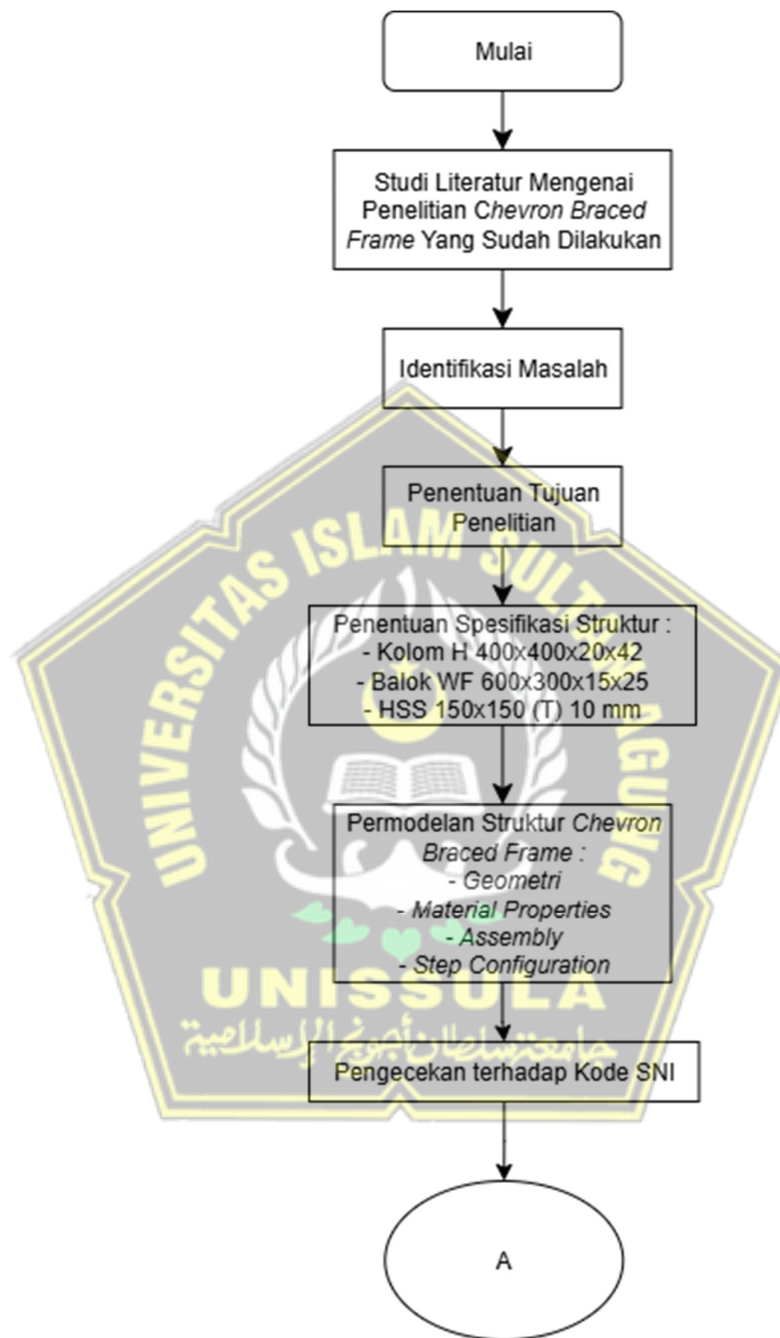
3. Atur parameter *Job*, pastikan *Precision*, *Memory*, dan *Parallelization* disesuaikan.

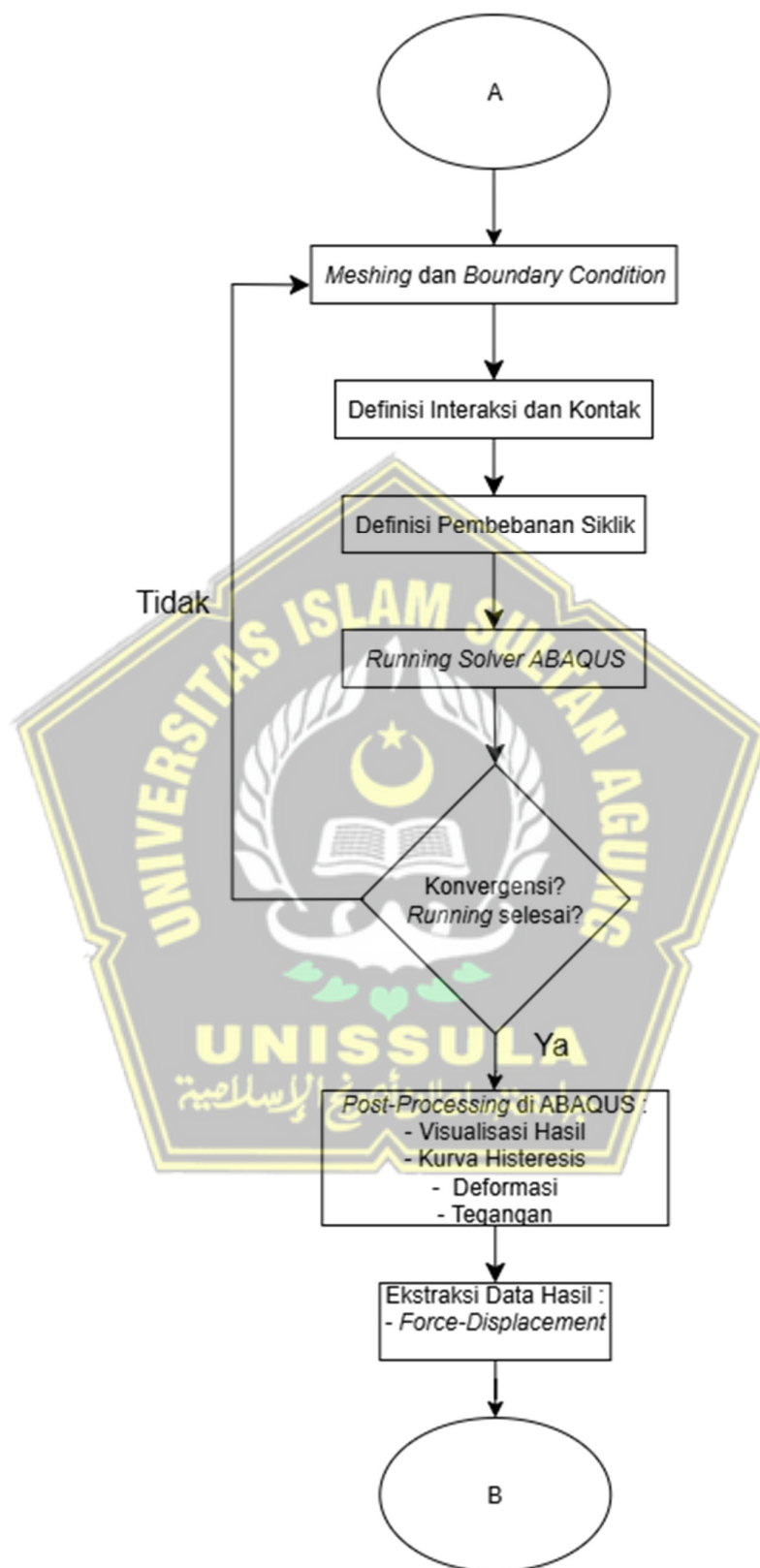


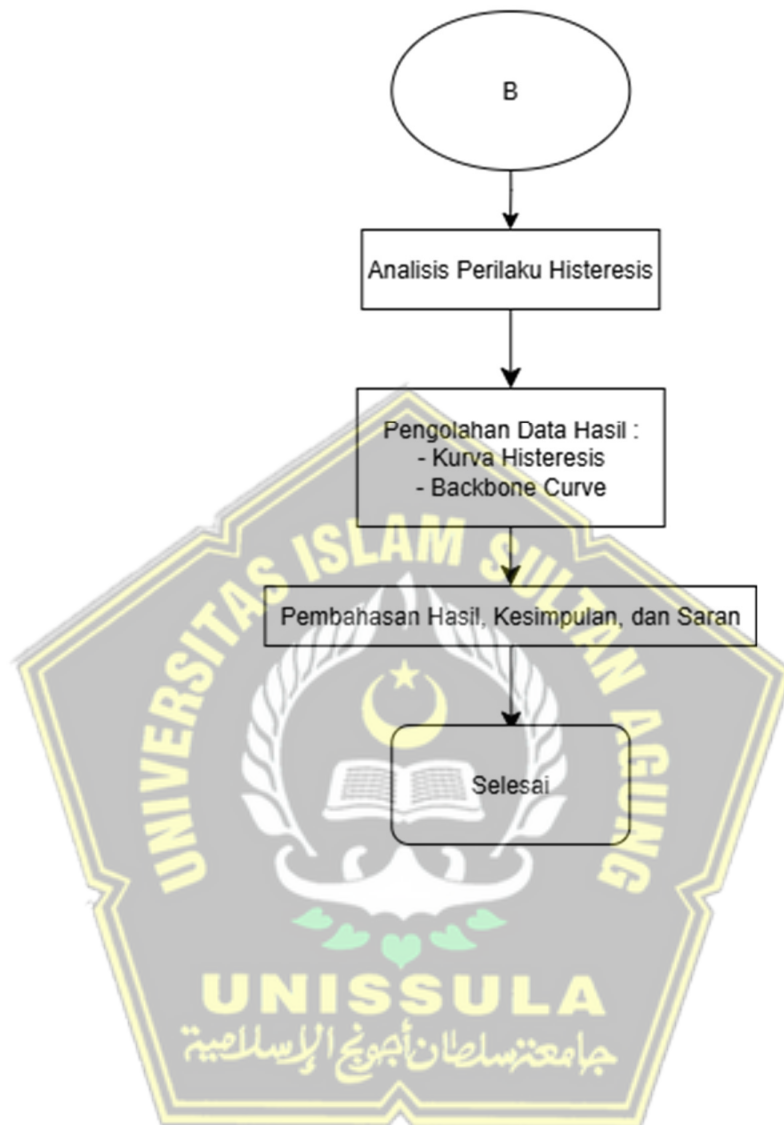
Gambar 3.74 Tampilan Jendela *Edit Job*

(Sumber : Pribadi)

3.4 Bagan Alur Penelitian







BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perilaku Umum Struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus

Respons struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) konfigurasi *chevron* terhadap beban siklik secara umum memperlihatkan pola deformasi yang khas pada sistem ini. Pada tahap awal pembebanan, struktur berperilaku elastis dengan kekakuan yang relatif tinggi, di mana gaya geser dasar meningkat secara linier seiring bertambahnya simpangan antar lantai.

Memasuki siklus berikutnya, elemen bresing tarik mulai mengalami leleh, sedangkan bresing tekan menunjukkan tanda-tanda *local buckling* yang progresif, Fenomena ini diikuti dengan penurunan kekakuan secara bertahap (*stiffness degradation*) pada hampir semua variasi pelat simpul.

Pengaruh variasi pelat simpul tampak jelas ketika struktur memasuki fase plastis. Pelat simpul dengan konfigurasi lebih fleksibel memberikan ruang deformasi tambahan pada bresing, sehingga bresing mampu bekerja lebih lama sebelum kehilangan kekuatan. Sebaliknya, pelat simpul yang terlalu kaku mempercepat terjadinya konsentrasi tegangan di ujung sambungan dan tengah bentang bresing, memicu terbentuknya sendi plastis yang lebih cepat dan menurunkan kapasitas setelah beban puncak.

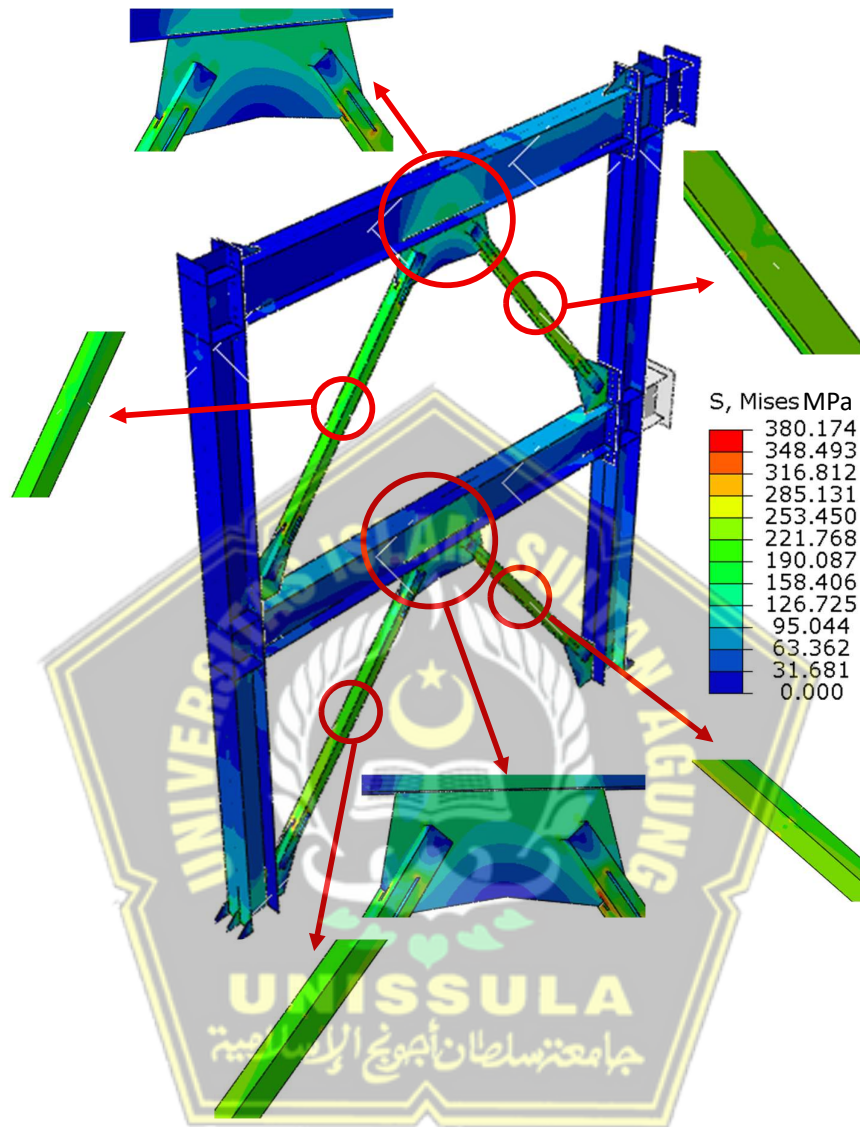
Kerusakan akhir didominasi oleh *buckling out-of-plane* pada bresing, kemudian mengalami fraktur di tengah bentang bresing, dan terjadi plastifikasi lokal di sekitar sambungan pelat simpul.

4.2 Perbandingan Perilaku Histeresis Antar Variasi Pelat Simpul

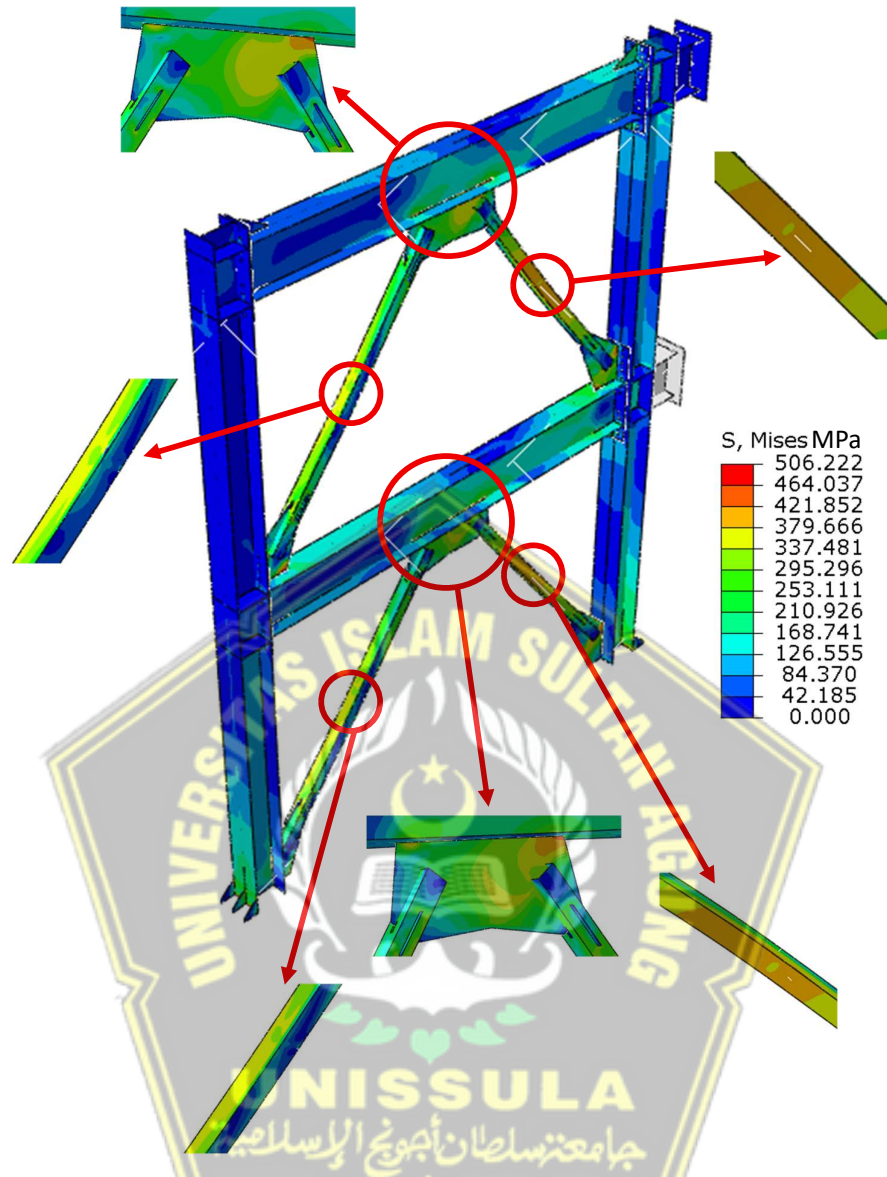
4.2.1 Fenomena Tiap Spesimen

Dalam subbab ini dibahas fenomena-fenomena yang terjadi pada masing-masing spesimen RBKK akibat pembebanan siklik. Fokus observasi berada pada perkembangan kerusakan, *buckling*, degradasi kekakuan, serta munculnya sendi plastis pada elemen-elemen penting seperti bresing, pelat simpul, dan balok.

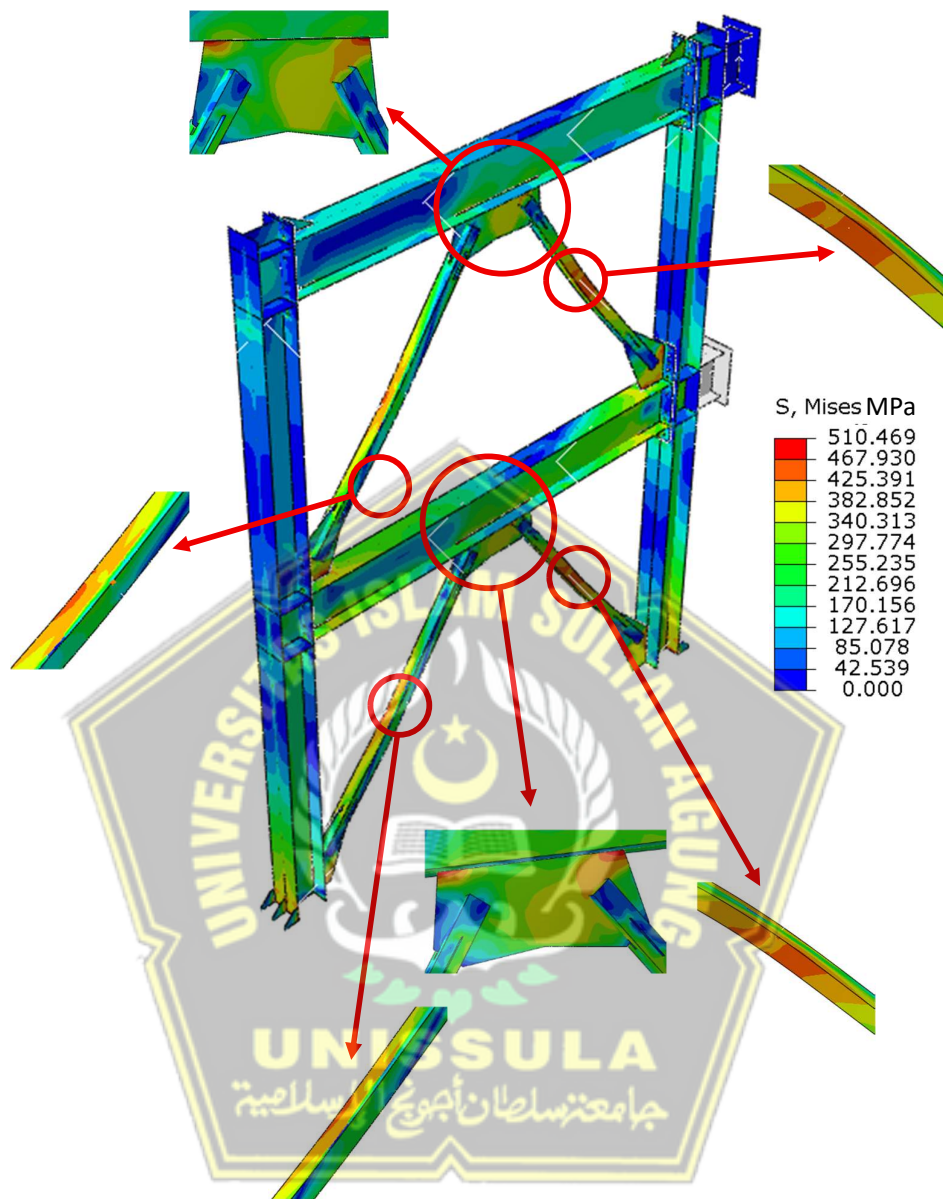
a. Spesimen 1 (SP-01)



Gambar 4.1 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (*Loading*
0,20625% *Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)

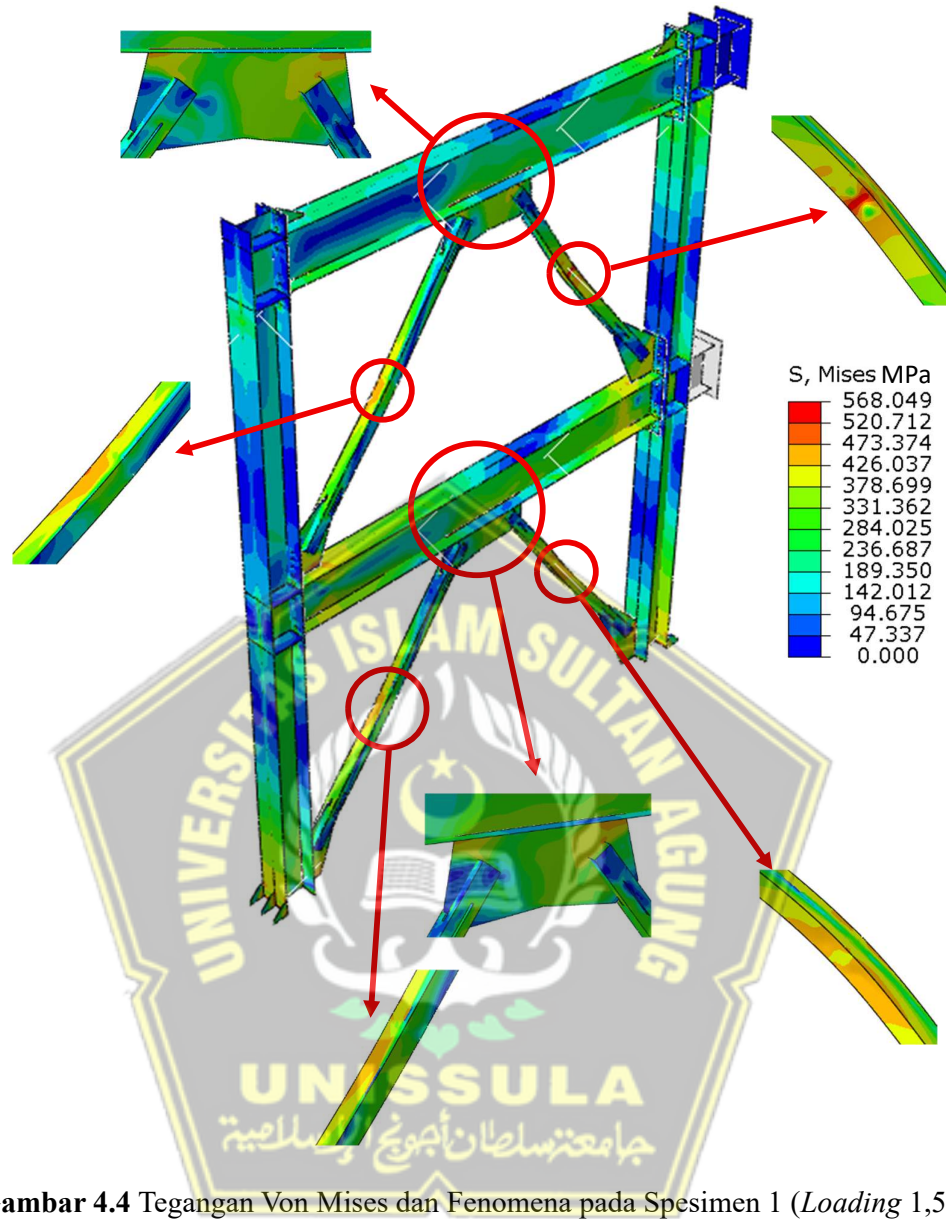


Gambar 4.2 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (*Loading 0,5% Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)

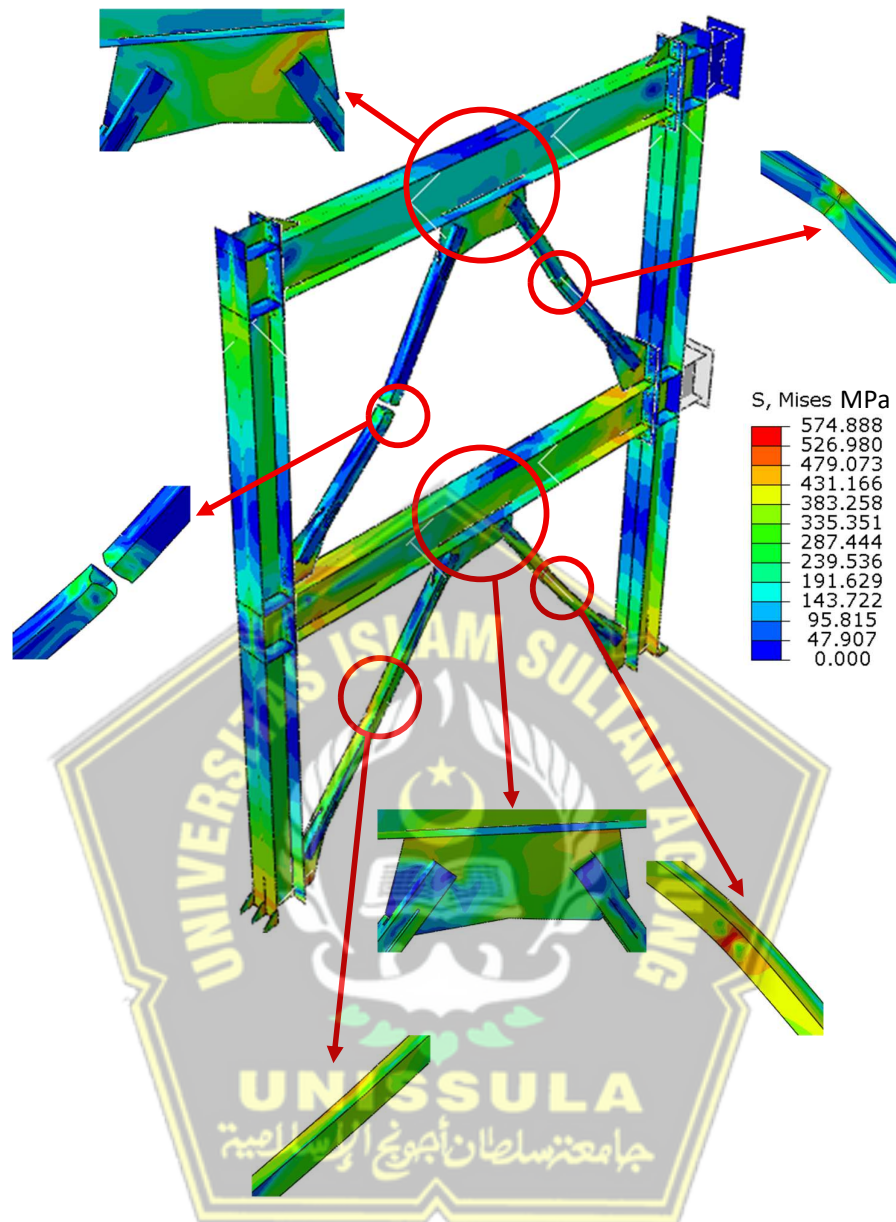


Gambar 4.3 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (*Loading 1% Story Drift*)

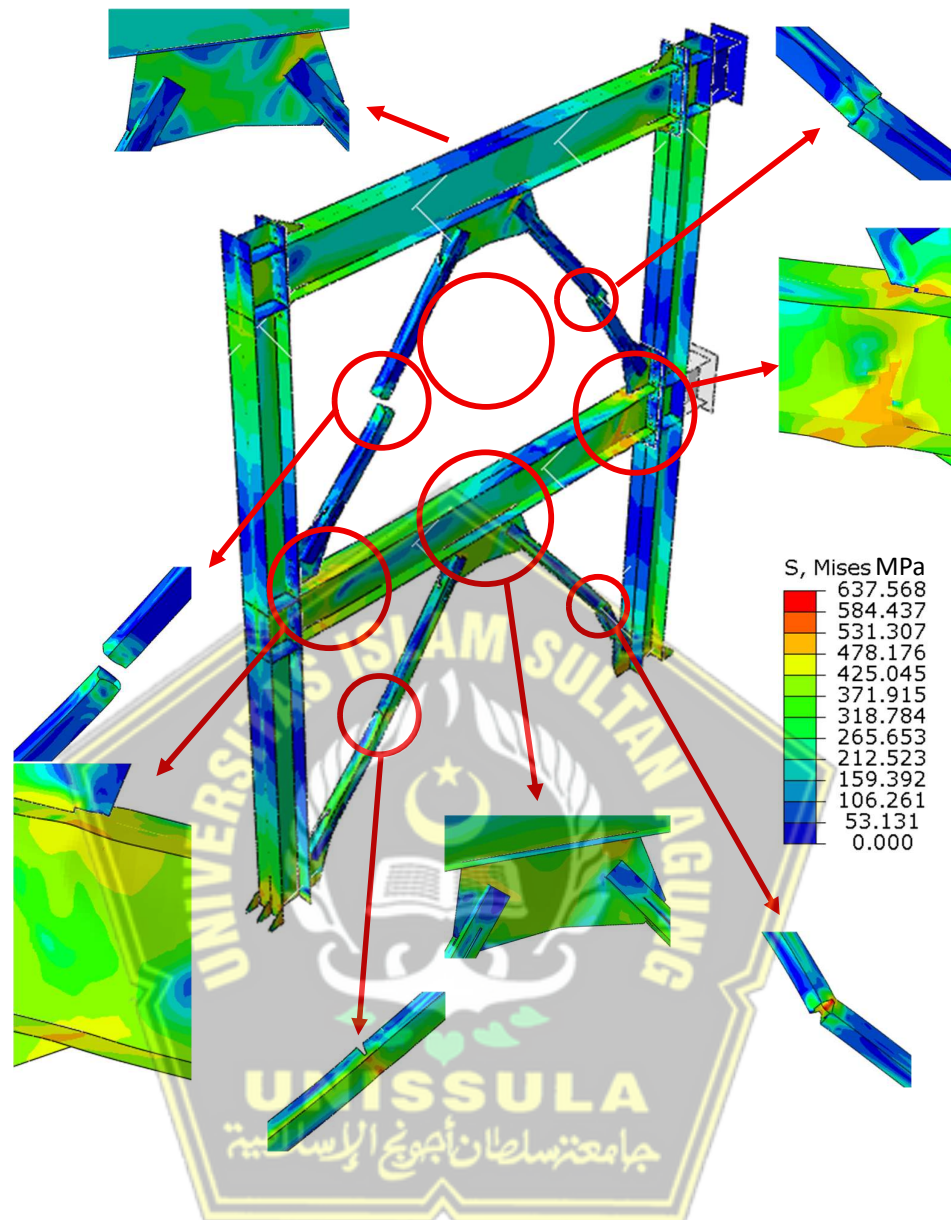
(Sumber : Hasil Analisis)



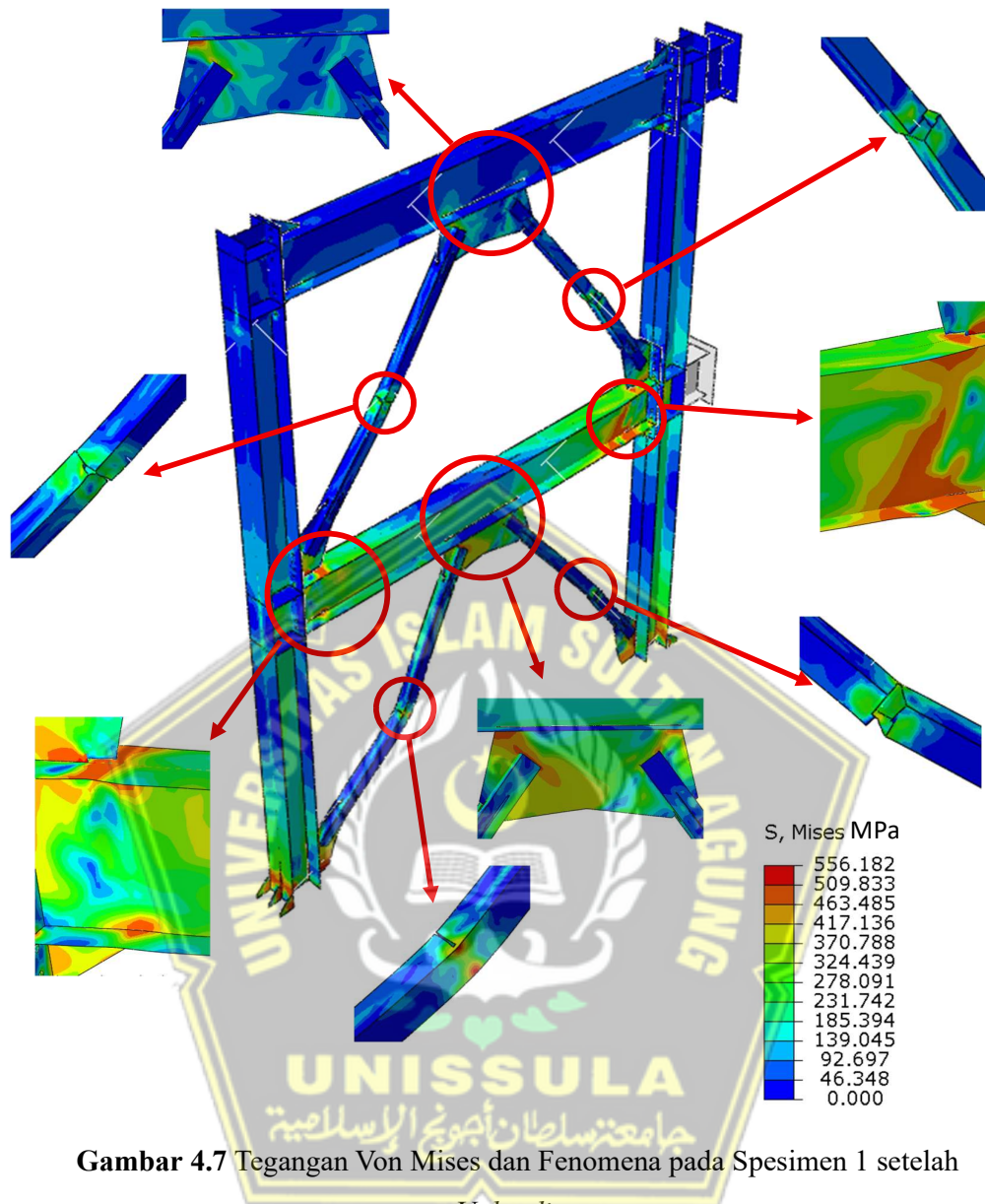
Gambar 4.4 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (*Loading 1,5% Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.5 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (*Loading 2 %
Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.6 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 (*Loading 2,5% Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)



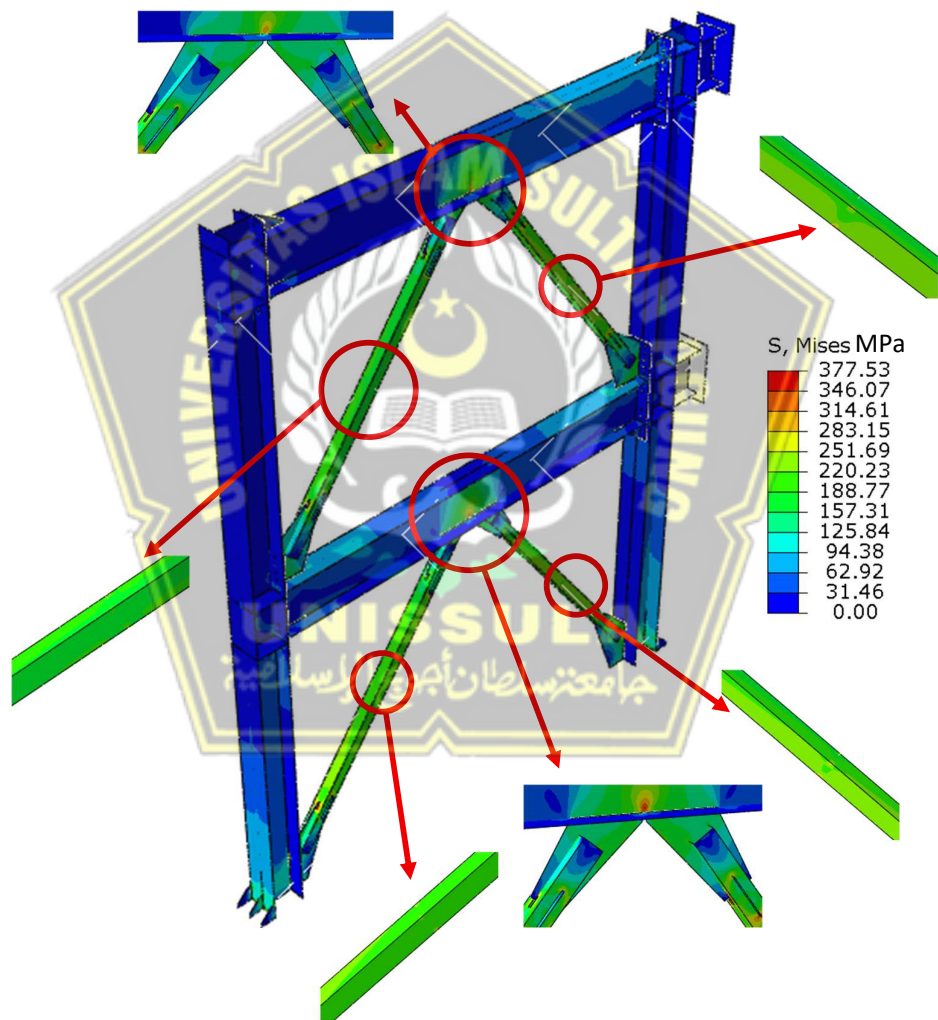
Gambar 4.7 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 1 setelah
Unloading

(Sumber : Hasil Analisis)

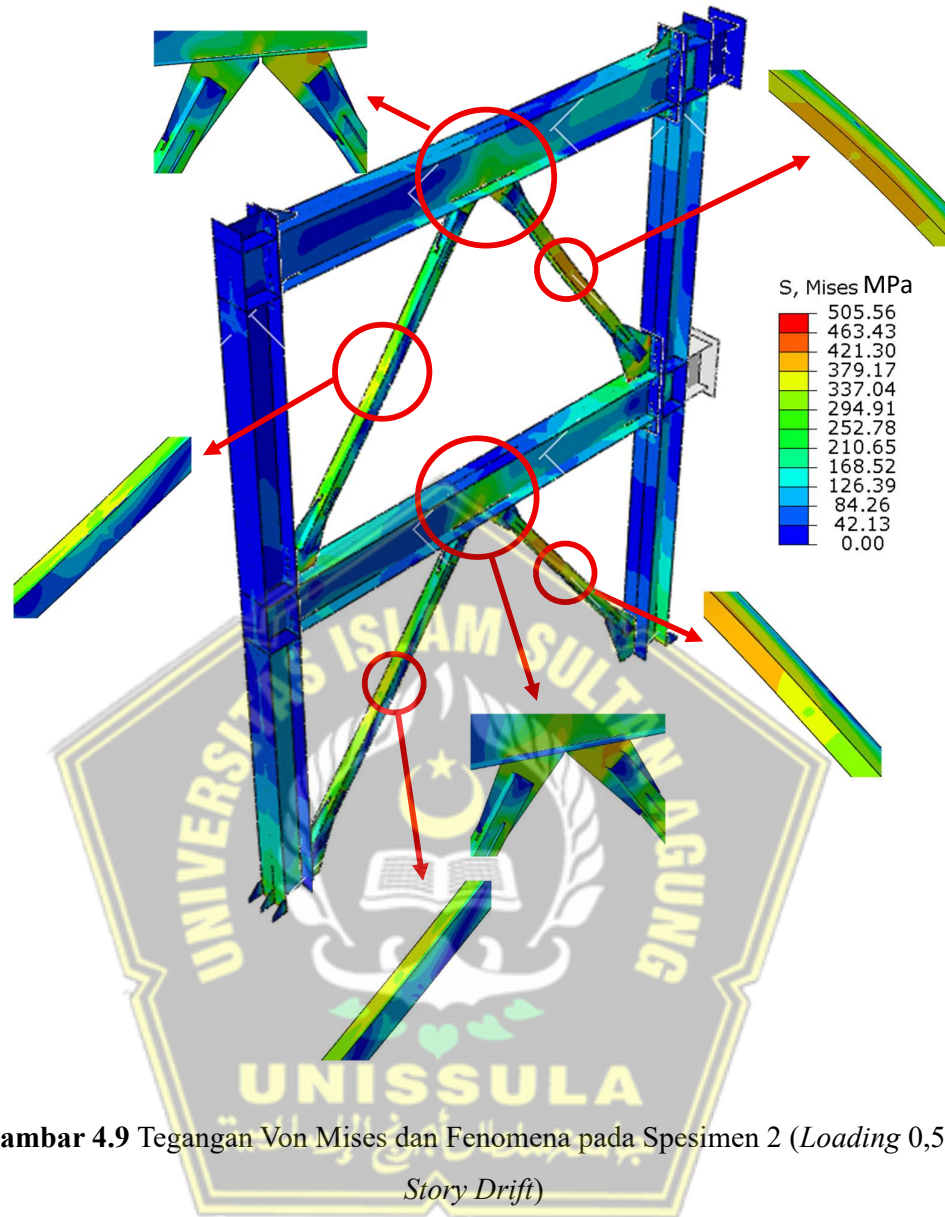
Pada spesimen 1, perilaku struktur diawali dalam fase elastis saat *drift* mencapai 0,20625 % tanpa adanya indikasi kerusakan berarti. Memasuki drift 0,5%, bresing dan pelat simpul mulai mengalami regangan plastis, namun belum menunjukkan degradasi kekakuan. Ketika *drift* mencapai 1%, fenomena *out-of-plane buckling* mulai terlihat pada bresing lantai dua, disertai gejala *local buckling* yang mulai muncul. Ketidakstabilan ringan juga mulai terjadi pada balok lantai dua. Seiring

meningkatnya *drift* ke 1,5%, *local buckling* semakin berkembang di bresing dan pelat simpul, disertai degradasi kekakuan lokal. Pada *drift* 2%, bresing lantai dua mengalami fraktur penuh dan kehilangan kekakuan secara signifikan. *Local buckling* juga teramati di bresing lantai satu, serta muncul ketidakstabilan pada balok lantai satu. Puncaknya, pada drift 2,5%, bresing lantai satu mengalami fraktur lokal dan *local buckling* terjadi di balok lantai dua.

b. Spesimen 2 (SP-02)

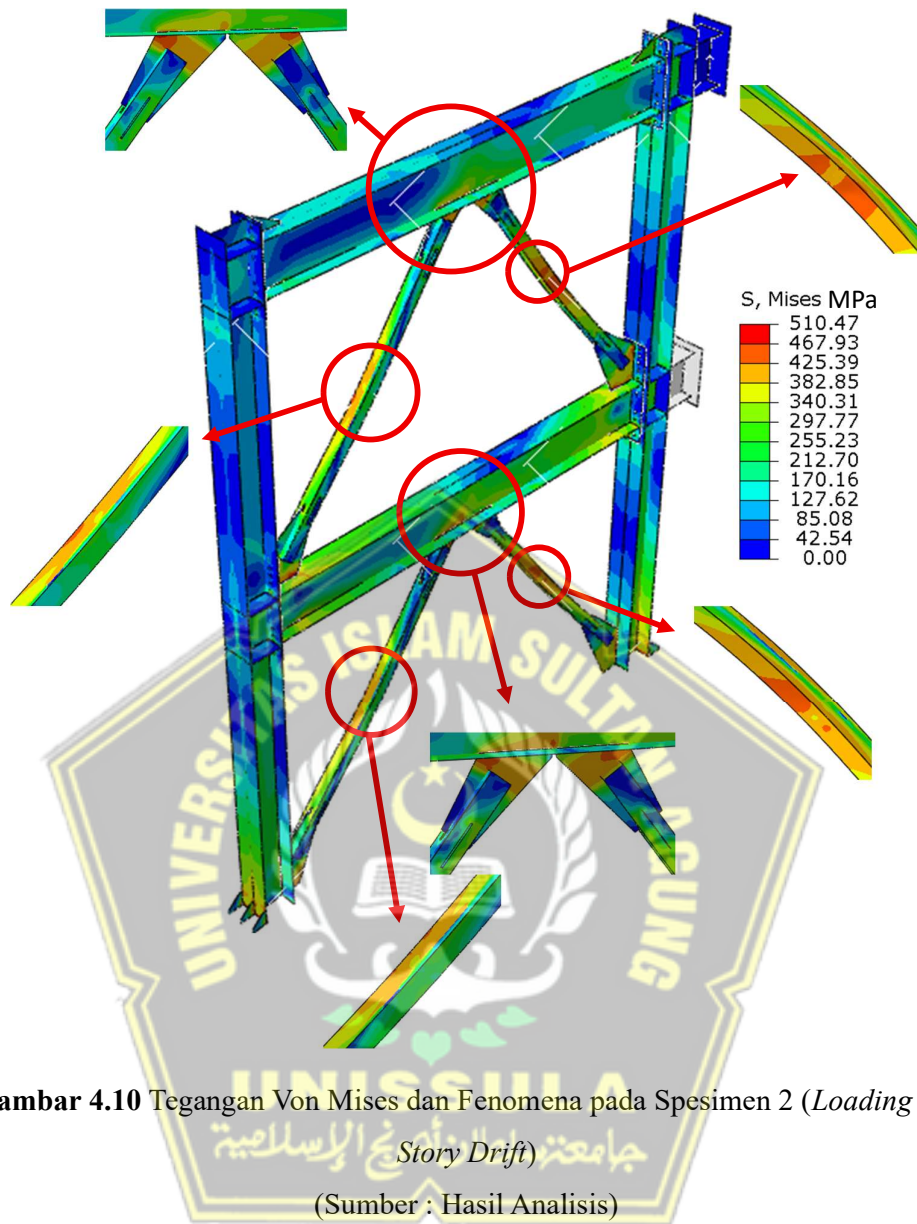


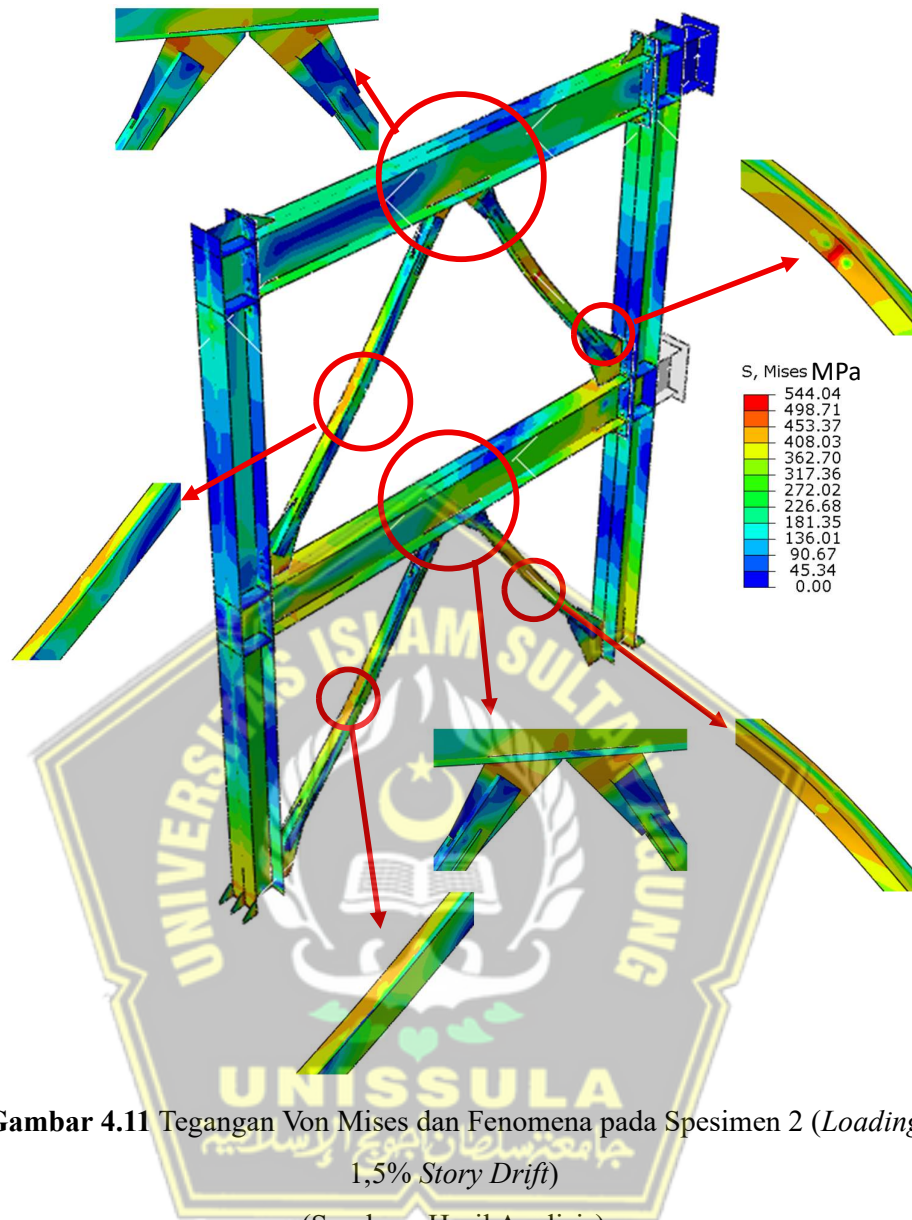
Gambar 4.8 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (*Loading* 0,20625% *Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.9 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (*Loading 0,5% Story Drift*)

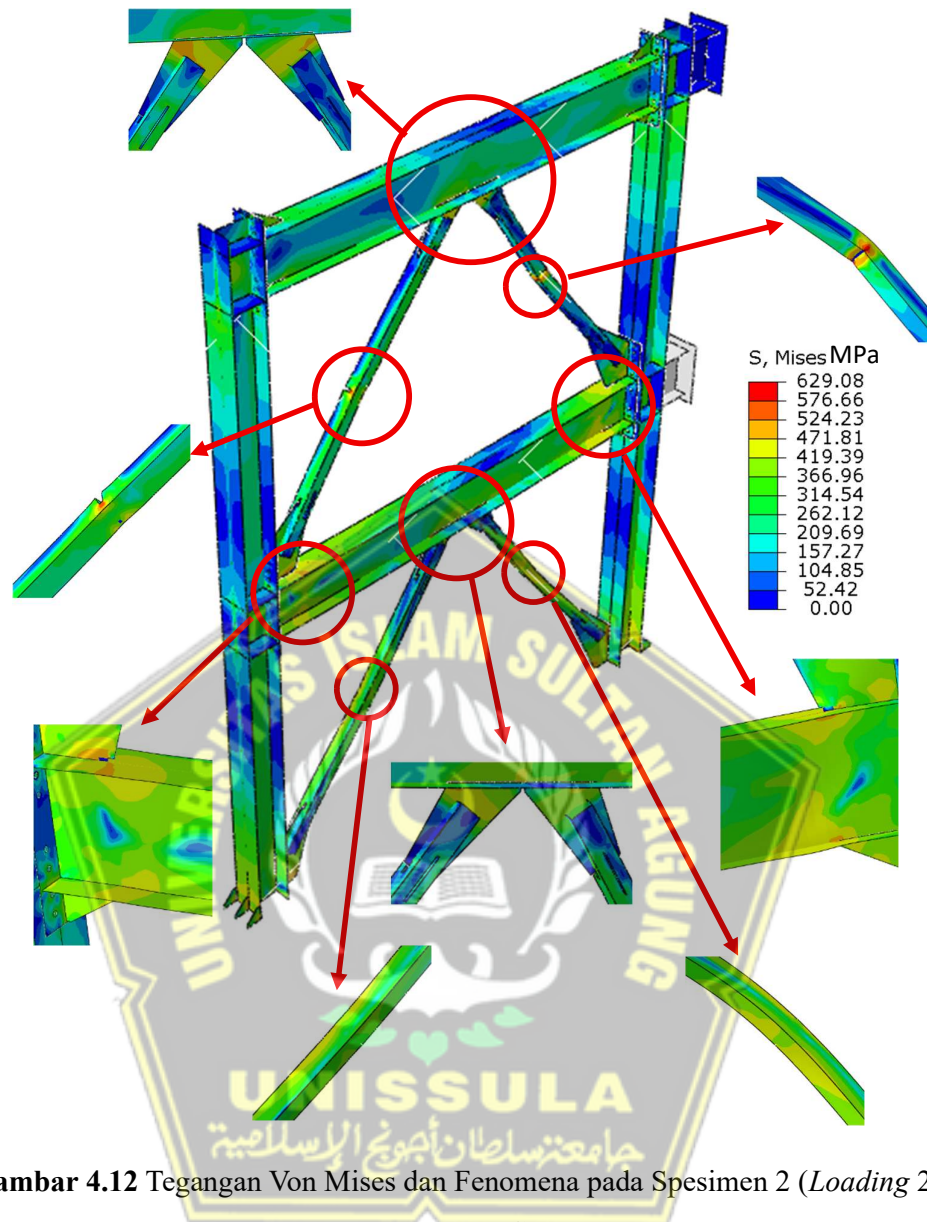
(Sumber : Hasil Analisis)





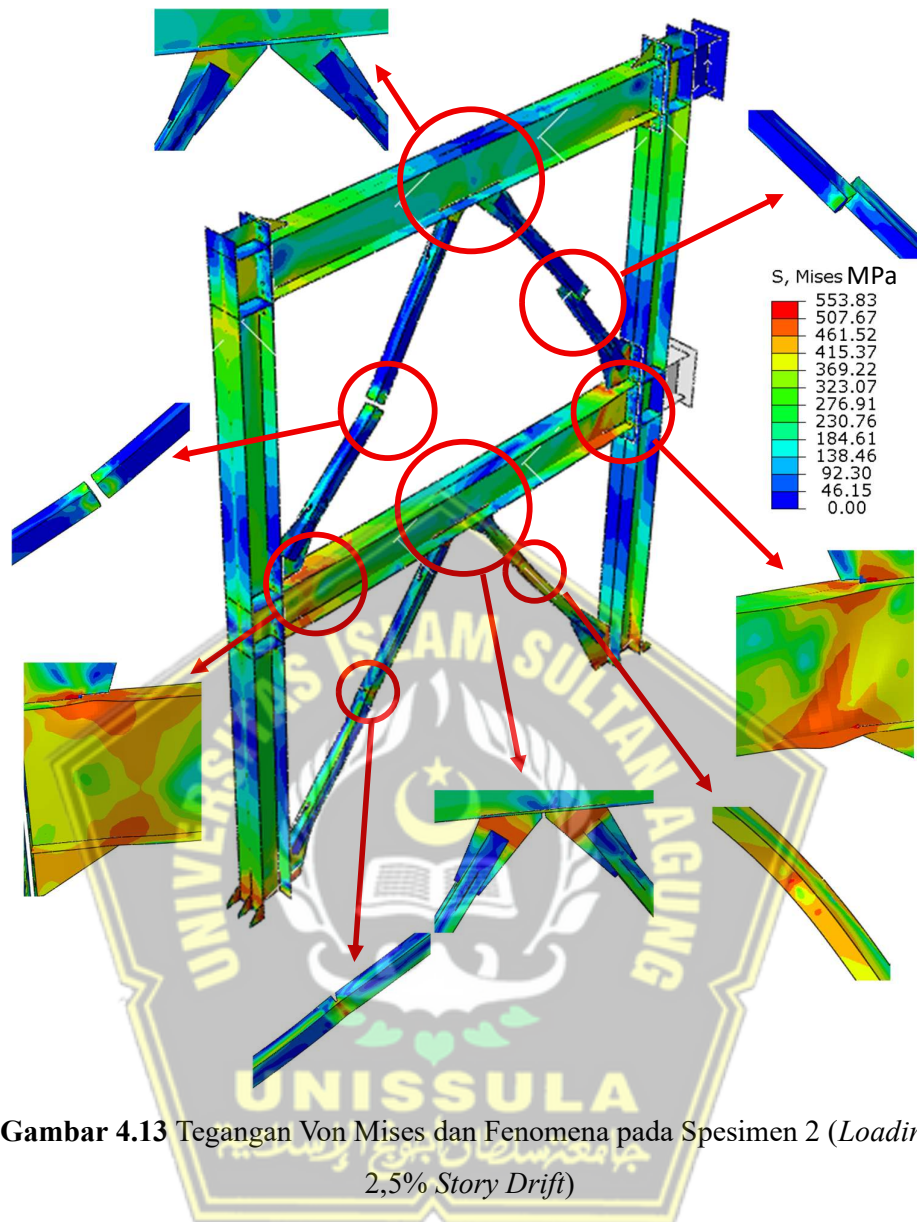
Gambar 4.11 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (*Loading 1,5% Story Drift*)

(Sumber : Hasil Analisis)



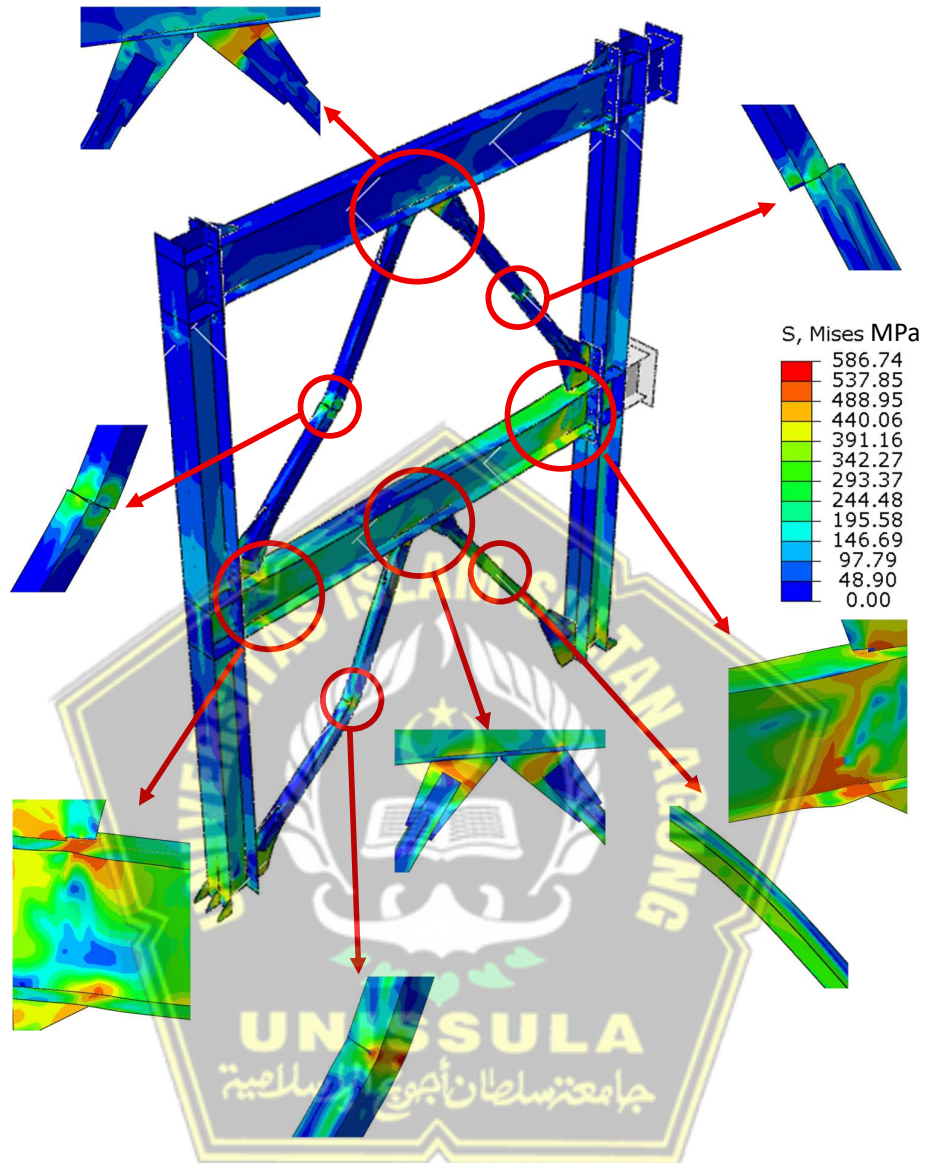
Gambar 4.12 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (*Loading 2% Story Drift*)

(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.13 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 (*Loading 2,5% Story Drift*)

(Sumber : Hasil Analisis)



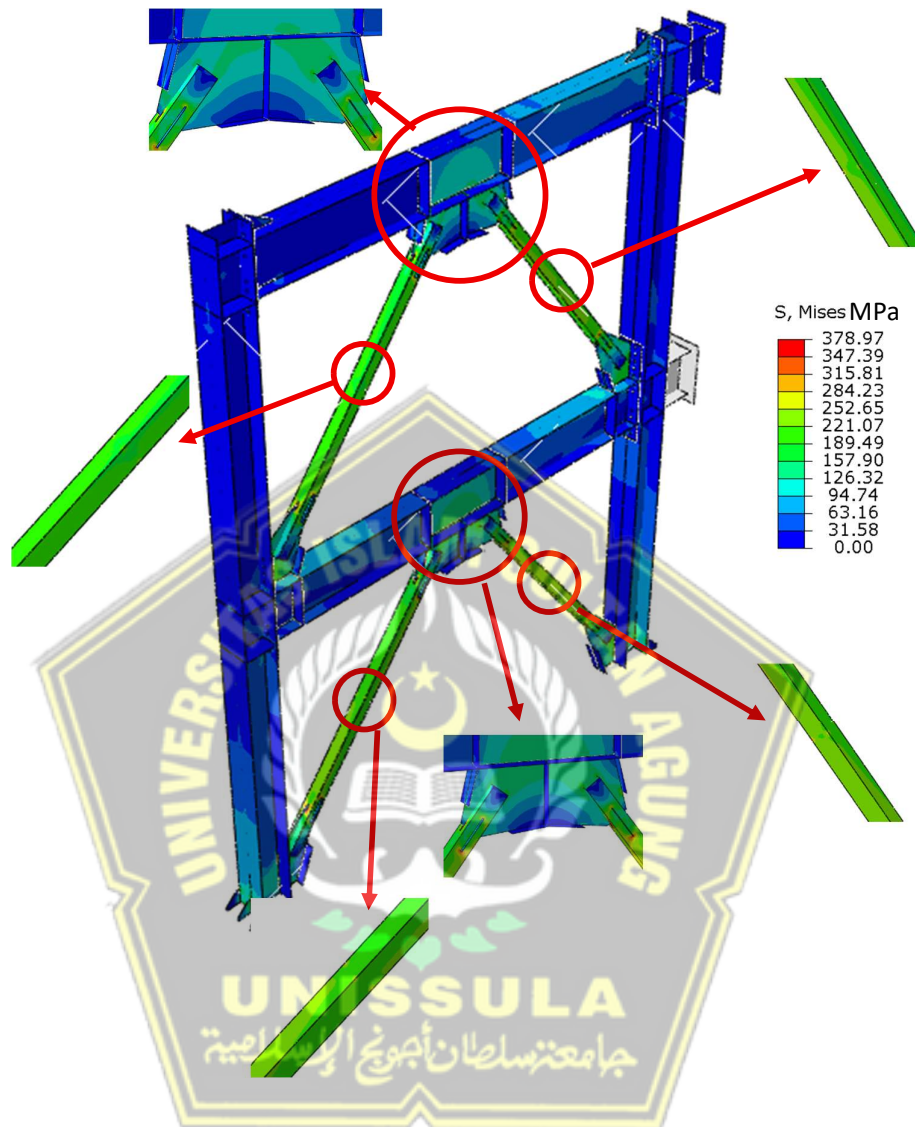
Gambar 4.14 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 2 setelah
Unloading
 (Sumber : Hasil Analisis)

Spesimen 2 menunjukkan perilaku deformasi yang lebih toleran terhadap drift tinggi. Pada tahap awal, yaitu drift 0,20625% dan 0,5%, struktur masih berada dalam kondisi elastis hingga mulai memasuki fase regangan plastis tanpa degradasi kekakuan. Ketika drift mencapai 1%, bresing mengalami *out-of-plane buckling* yang lebih intens, serta terjadi degradasi kekakuan lokal pada pelat simpul. Selain

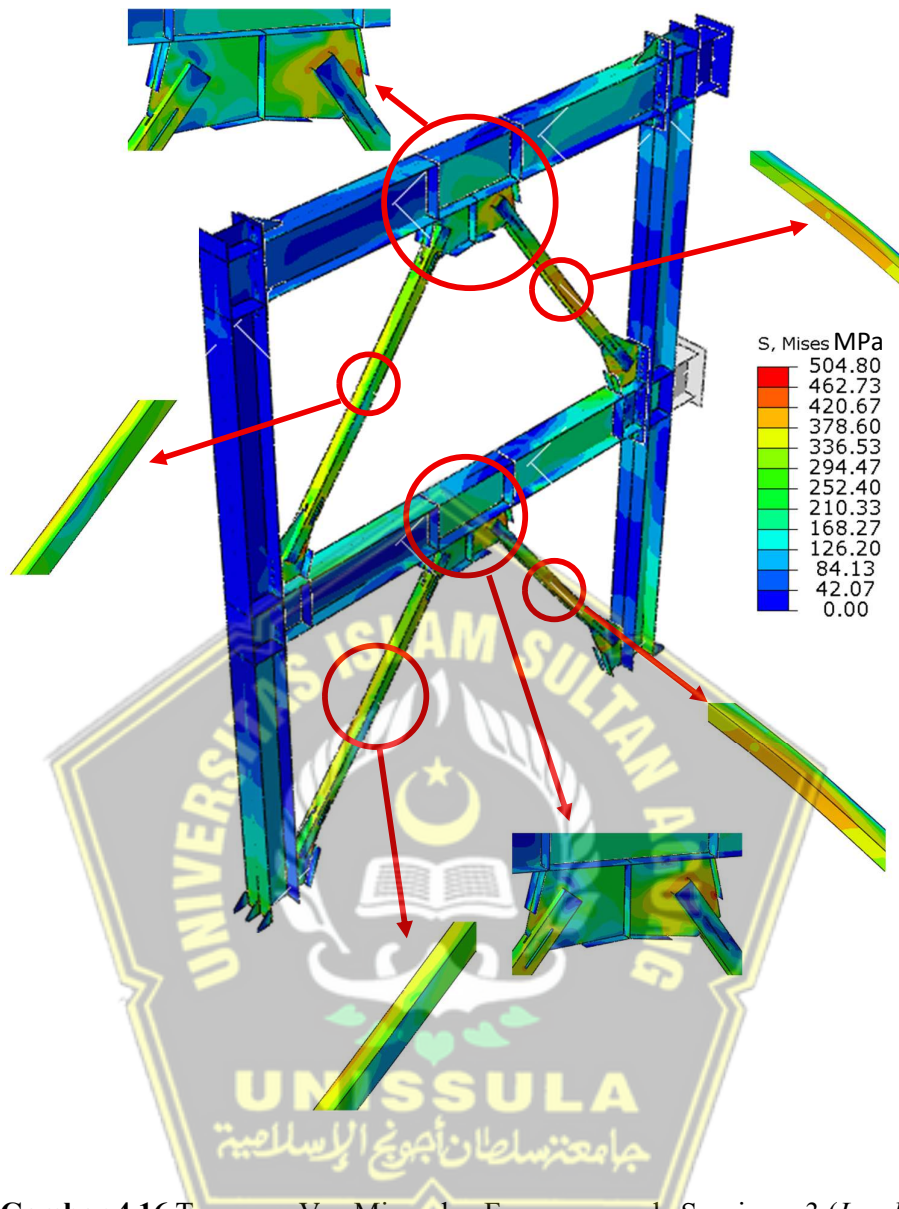
itu, mulai terlihat ketidakstabilan ringan pada balok lantai dua. Pada drift 1,5%, kerusakan mulai menyebar; degradasi kekakuan lokal terjadi pada bresing, disertai gejala *local buckling* pada bresing lantai dua. Balok lantai satu dan dua mengalami instabilitas ringan. *Drift* 2% menandai terjadinya fraktur lokal pada bresing lantai dua, sementara bresing lantai satu mulai mengalami local buckling. Yang menarik, balok lantai dua mulai menunjukkan pembentukan sendi plastis, dengan indikasi deformasi yang lebih menyebar. Pada *drift* 2,5%, bresing lantai dua mengalami fraktur penuh, dan salah satu bresing lain mengalami fraktur lokal meskipun masih berada dalam kondisi regangan plastis.



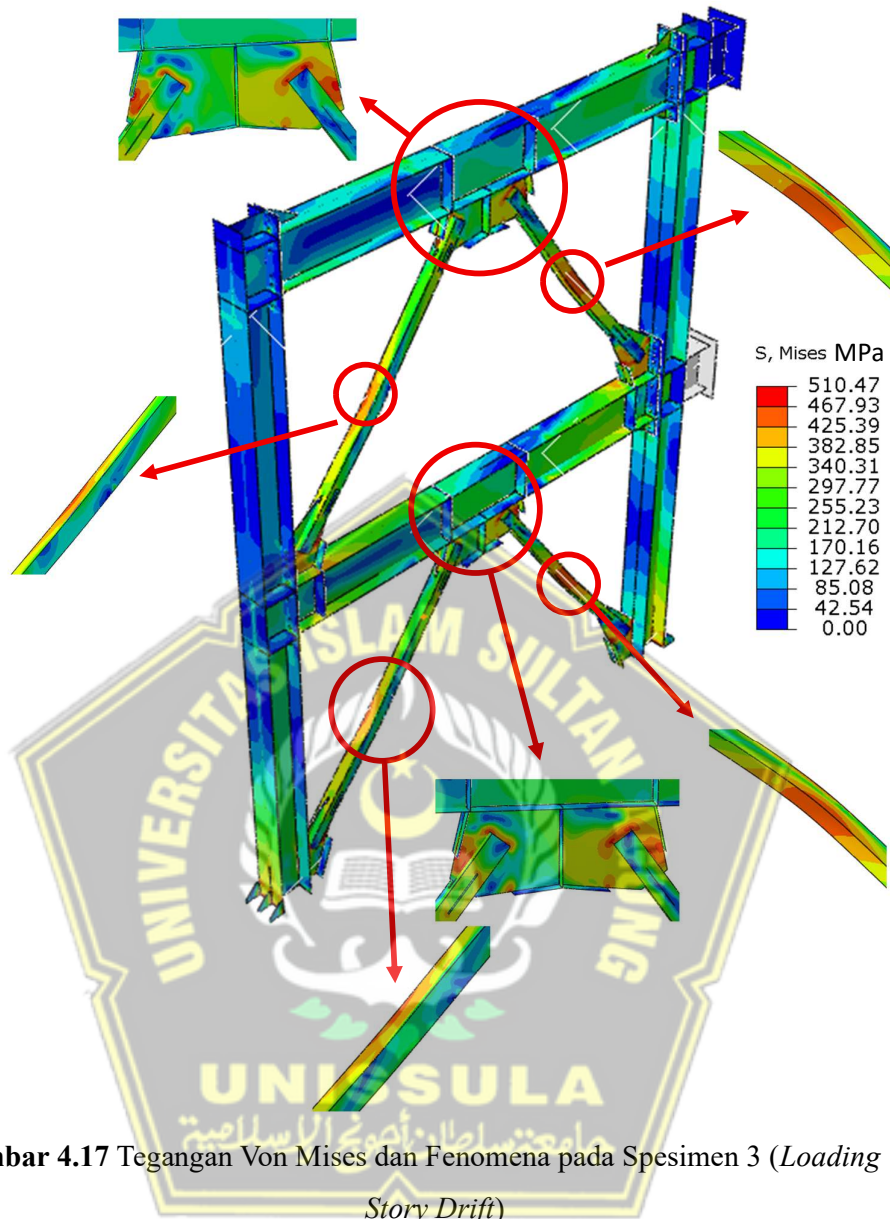
c. Spesimen 3 (SP-03)



Gambar 4.15 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (*Loading*
0,20625% *Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)

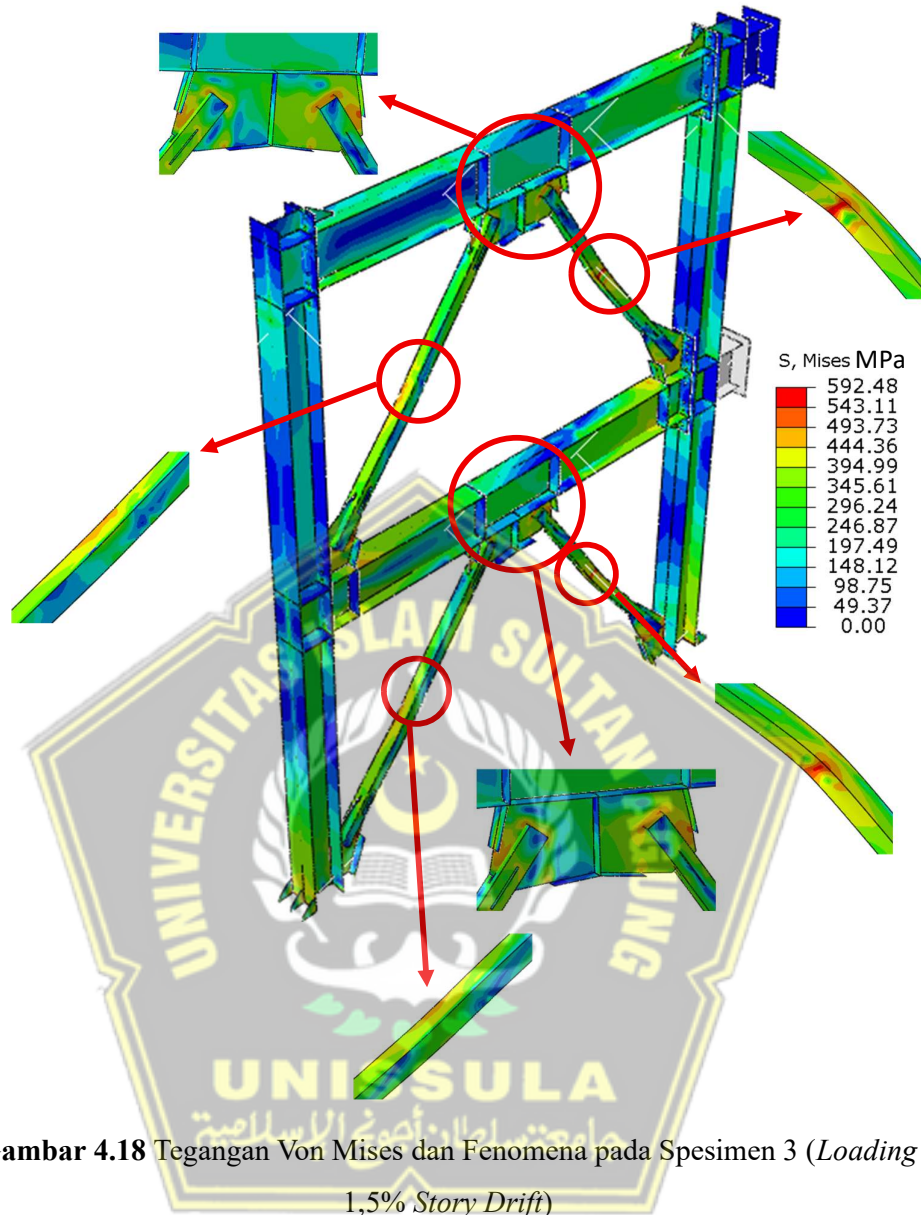


Gambar 4.16 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (*Loading 0,5% Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)



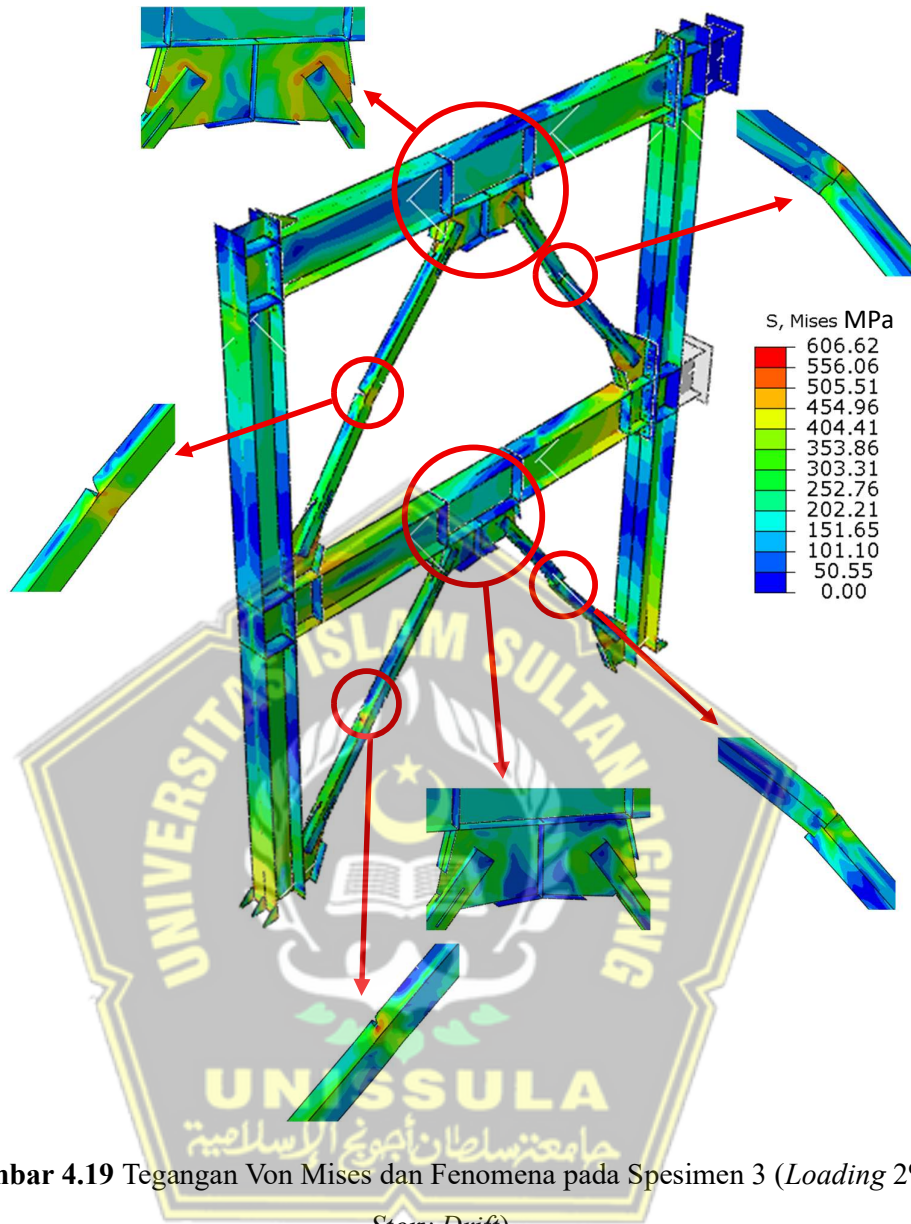
Gambar 4.17 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (*Loading 1% Story Drift*)

(Sumber : Hasil Analisis)



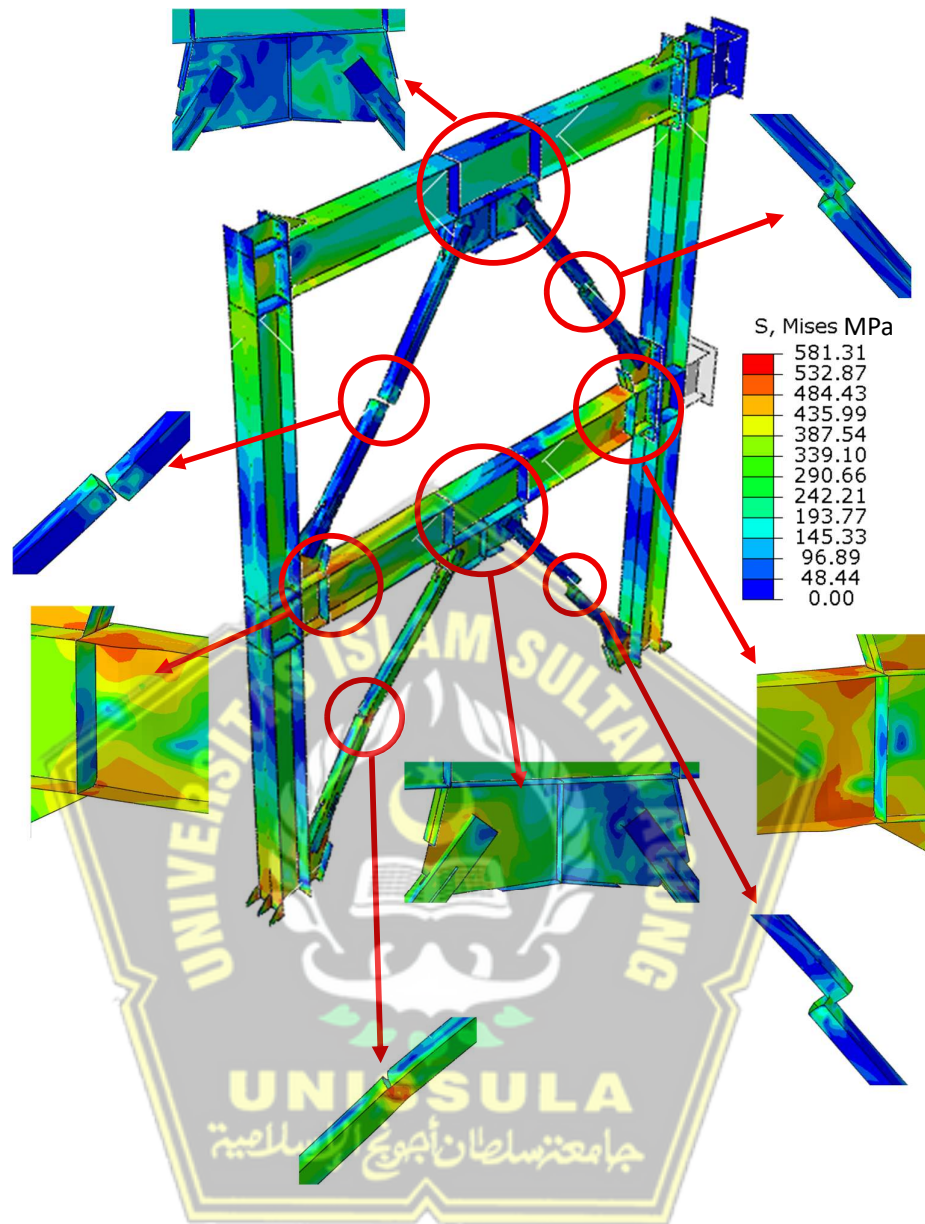
Gambar 4.18 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (*Loading 1,5% Story Drift*)

(Sumber : Hasil Analisis)

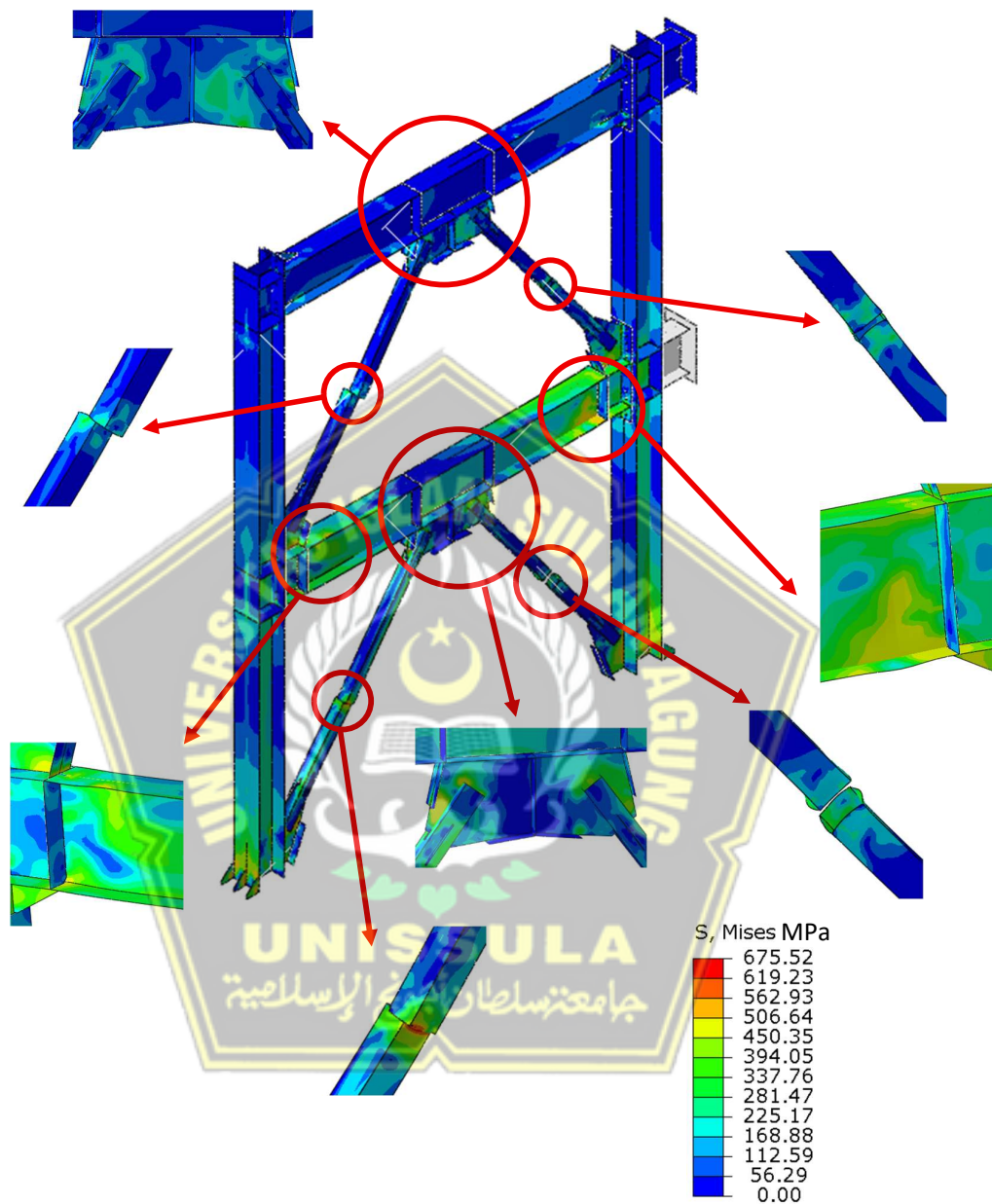


Gambar 4.19 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (*Loading 2% Story Drift*)

(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.20 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada Spesimen 3 (*Loading 2,5% Story Drift*)
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.21 Tegangan Von Mises dan Fenomena pada spesimen 3 setelah *unloading*
(Sumber : Hasil Analisis)

Spesimen 3 yang memiliki kekakuan tertinggi menunjukkan akumulasi kerusakan yang lebih cepat akibat konsentrasi tegangan tinggi. Pada *drift* awal (0,20625%),

struktur masih dalam kondisi elastis. Ketika *drift* mencapai 0,5%, regangan plastis mulai muncul di bresing dan pelat simpul, tanpa penurunan kekakuan yang berarti. Memasuki *drift* 1%, *out-of-plane buckling* mulai terjadi pada bresing, namun degradasi kekakuan belum signifikan. Pada *drift* 1,5%, pelat simpul dan bresing mulai mengalami degradasi kekakuan lokal, dan *local buckling* mulai muncul pada titik-titik dengan konsentrasi tegangan tinggi. Ketika *drift* mencapai 2%, terjadi fraktur lokal pada beberapa bresing, disertai penurunan kekakuan struktural. Akhirnya, pada *drift* 2,5%, tiga bresing mengalami fraktur penuh, termasuk satu bresing di lantai satu yang sedang menuju fraktur total. Indikasi sendi plastis terlihat jelas pada badan dan sayap balok, yang juga mengalami *local buckling*.

Secara umum, ketiga spesimen menunjukkan pola perkembangan kerusakan yang relatif serupa, dimulai dari fase elastis, plastis, munculnya *buckling*, hingga fraktur. Perbandingan lengkap fenomena yang terjadi pada tiap spesimen dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Fenomena tiap spesimen

Variasi Pelat simpul	<i>Drift</i> (%)	Fenomena yang terjadi
Spesimen 1 (SP-01)	0,20625 (Δy)	Fase elastis
	0,5	Bresing dan pelat simpul mengalami fase regangan plastis dan belum terjadi degradasi kekakuan
	1	<i>Out-of-plane buckling</i> pada bresing semakin besar dan belum terjadi degradasi kekakuan, bresing pada lantai 2 mengalami <i>local buckling</i> , terjadi sedikit ketidakstabilan pada balok lantai 2
	1,5	Terjadinya peningkatan <i>local buckling</i> pada bresing lantai 2, terjadi sedikit ketidakstabilan pada balok lantai 2, terjadinya degradasi kekakuan lokal pada pelat simpul
	2	Terjadinya fraktur sepenuhnya dan degradasi kekakuan pada kedua bresing lantai 2, terjadi <i>local buckling</i> dan degradasi kekakuan pada bresing lantai 1, terjadi sedikit ketidakstabilan pada balok lantai 2
	2,5	Terjadi fraktur lokal pada bresing lantai 1, pada balok lantai 2 terlihat jelas mengalami sendi plastis (badan dan sayap balok mengalami <i>local buckling</i>)

Spesimen 2 (SP-02)	0,20625 (Δy)	Fase elastis
	0,5	Bresing dan pelat simpul mengalami fase regangan plastis dan belum terjadi degradasi kekakuan
	1	<i>Out-of-plane buckling</i> pada bresing semakin besar dan terjadi degradasi kekakuan lokal pada pelat simpul, terjadi sedikit ketidakstabilan pada balok lantai 2
	1,5	Degradasi kekakuan lokal pada bresing semakin besar, terjadi sedikit ketidakstabilan pada balok lantai 2, terjadi <i>local buckling</i> pada bresing lantai 2
	2	Terjadi fraktur lokal dan degradasi kekakuan pada bresing lantai 2, terjadi <i>local buckling</i> pada bresing lantai 1, pada balok lantai 2 terlihat jelas mengalami sendi plastis (badan dan sayap balok mengalami <i>local buckling</i>)
	2,5	Terjadi fraktur sepenuhnya pada bresing lantai 2, terjadi fraktur lokal pada salah satu bresing, bresing yang satu masih mengalami regangan plastis dan <i>local buckling</i>
Spesimen 3 (SP-03)	0,20625 (Δy)	Fase elastis
	0,5	Bresing dan pelat simpul mengalami fase regangan plastis dan belum terjadi degradasi kekakuan
	1	<i>Out-of-plane buckling</i> pada bresing semakin besar dan belum terjadi degradasi kekakuan
	1,5	Terjadi degradasi kekakuan lokal pada pelat simpul, bresing mulai mengalami <i>local buckling</i> dengan konsentrasi tegangan yang tinggi
	2	Terjadi fraktur lokal dan degradasi kekakuan pada bresing,
	2,5	Terjadi fraktur sepenuhnya pada 3 bresing, 1 bresing pada lantai 1 menuju <i>fraktur</i> seutuhnya, balok lantai 2 terlihat jelas mengalami sendi plastis (badan dan sayap balok mengalami <i>local buckling</i>)

(Sumber : Hasil Analisis)

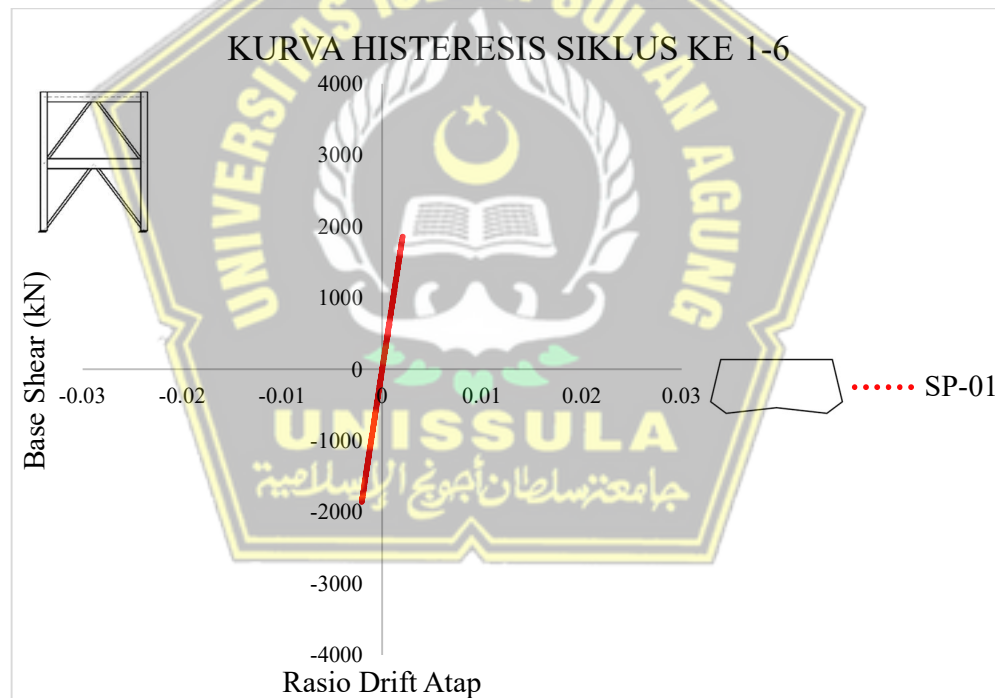
4.2.2 Analisis Kurva Histeresis Global antar Variasi Pelat Simpul

Kurva histeresis global ketiga spesimen Rangka Bresing Konsentris Khusus dengan variasi pelat simpul menunjukkan perbedaan karakteristik respons inelastis yang

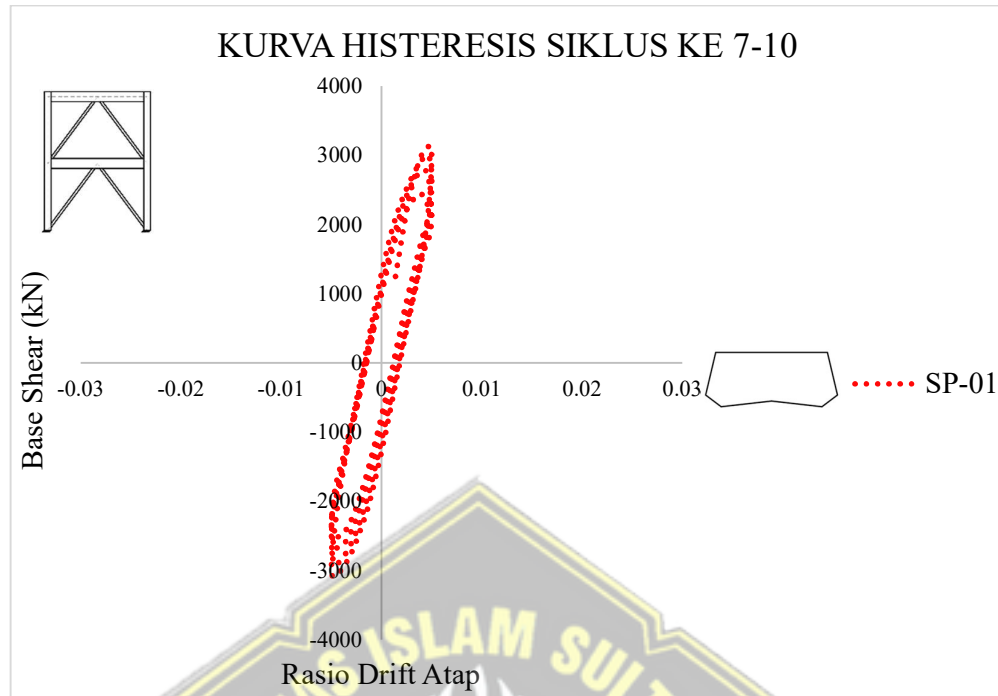
berbeda. Perbedaan tersebut terutama terlihat pada stabilitas *loop*, besar area histeresis, fenomena *pinching*, dan laju degradasi kekakuan.

a. Spesimen 1 (SP-01)

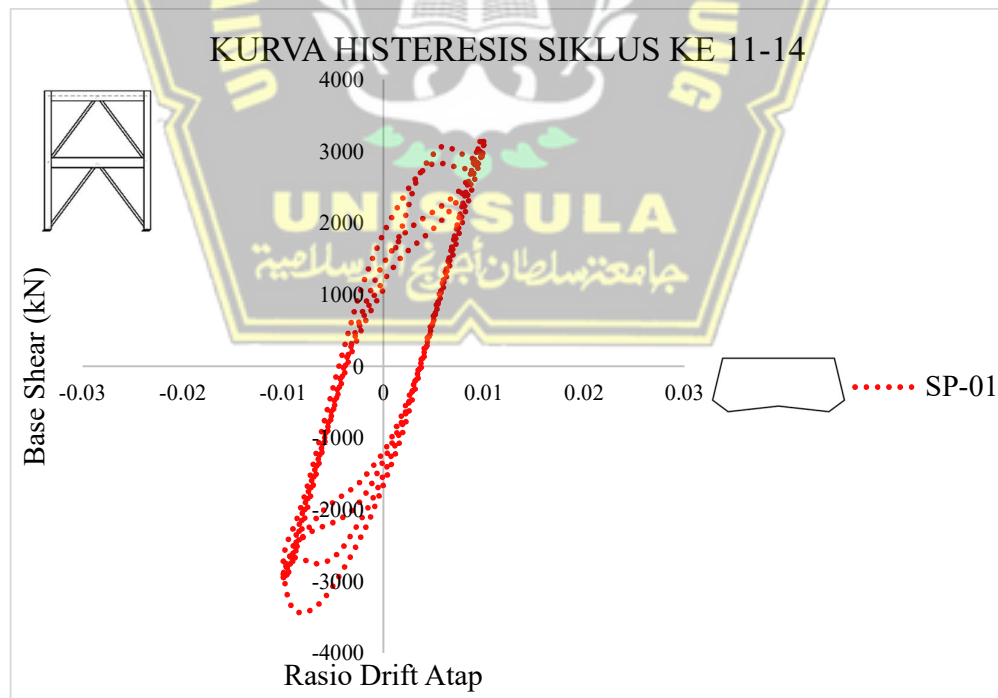
Spesimen 1 menunjukkan pola kurva yang relatif lebar dan stabil pada hampir seluruh siklus pembebanan. Tercatat nilai *base shear* pada spesimen 1 mencapai hingga 3467,11 kN. Tidak terdapat gejala *pinching* yang signifikan, yang menunjukkan bahwa sambungan pelat simpul pada spesimen ini mampu menyalurkan deformasi plastis secara efektif tanpa kehilangan kekakuan secara drastis. Namun terlihat penurunan tajam dalam kapasitas *base shear* maksimum dan penyempitan kurva histeresis pada siklus ke-20. Ini menunjukkan bahwa spesimen mulai mengalami penurunan kekakuan ditandai dengan fraktur sepenuhnya pada bresing lantai 2.



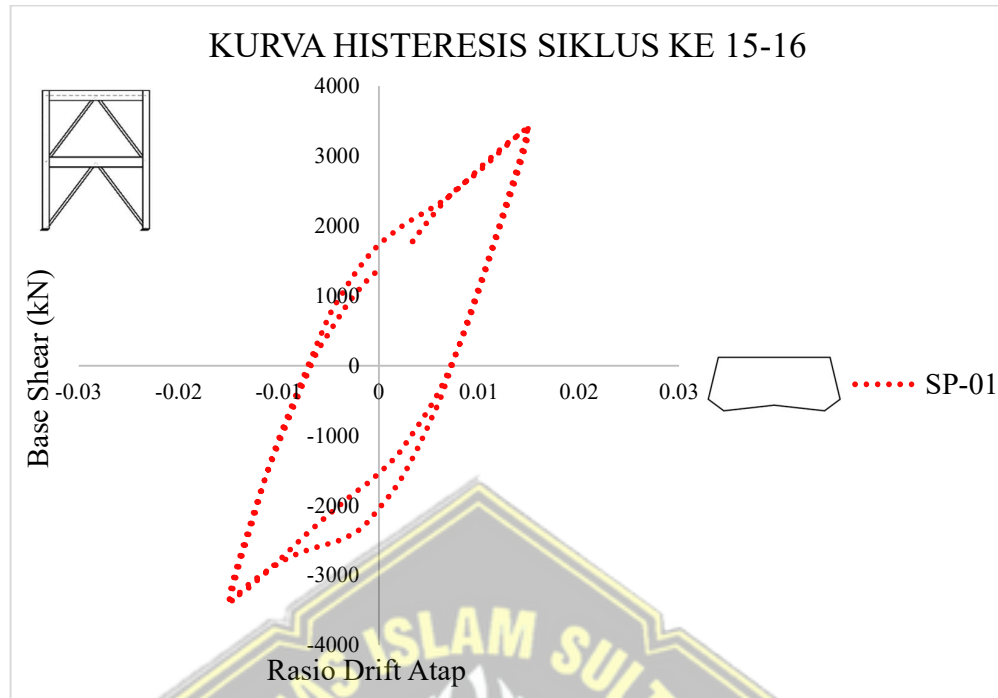
Gambar 4.22 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 1-6
(Sumber : Hasil Analisis)



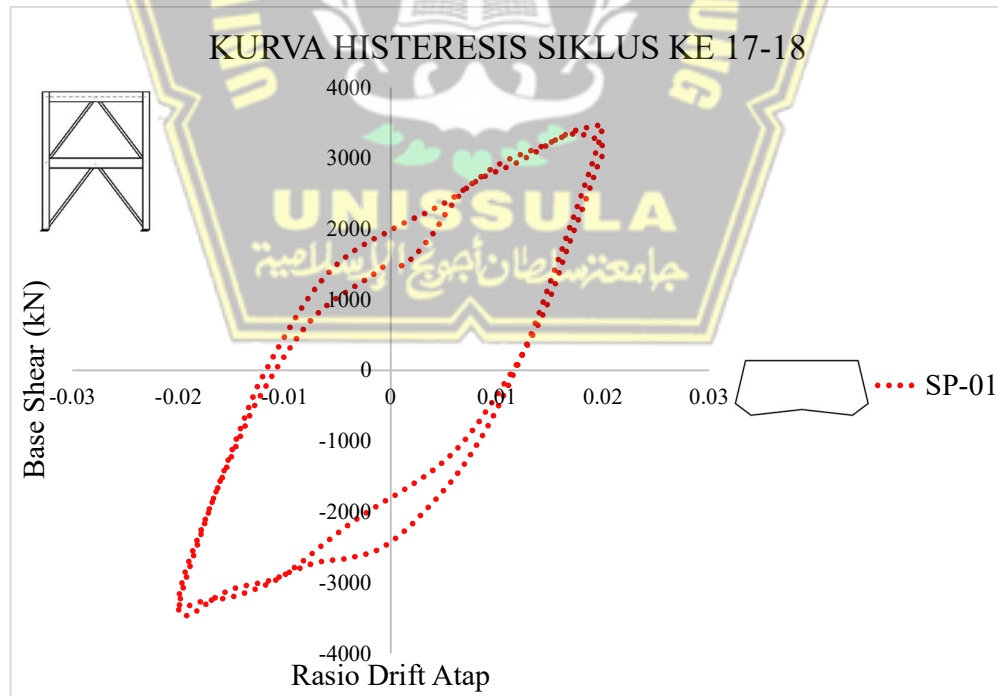
Gambar 4.23 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 7-10
(Sumber : Hasil Analisis)



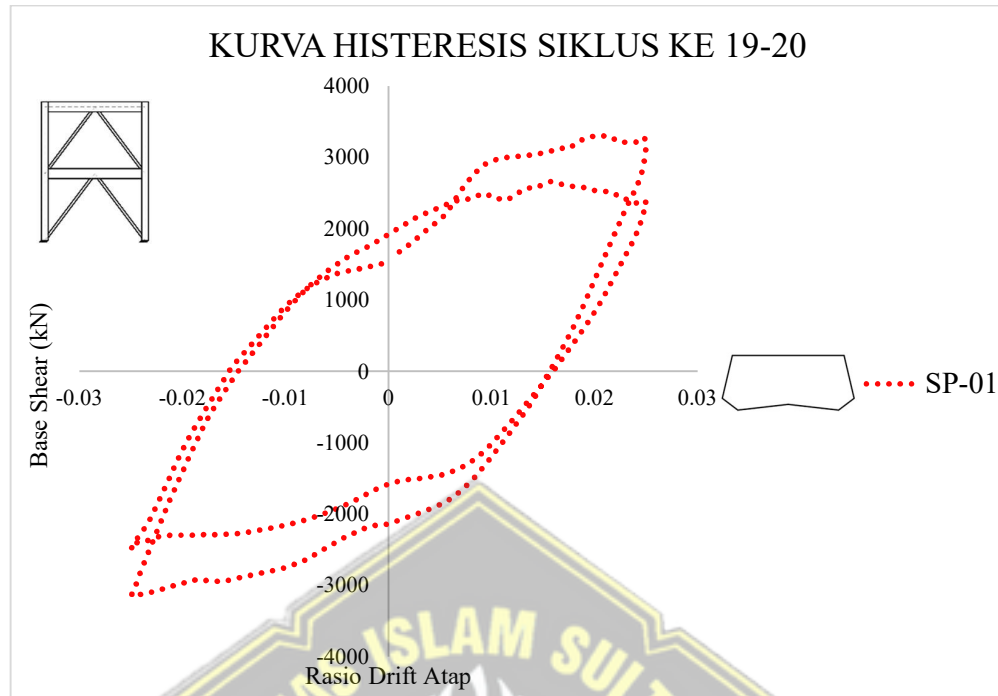
Gambar 4.24 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 11-14
(Sumber : Hasil Analisis)



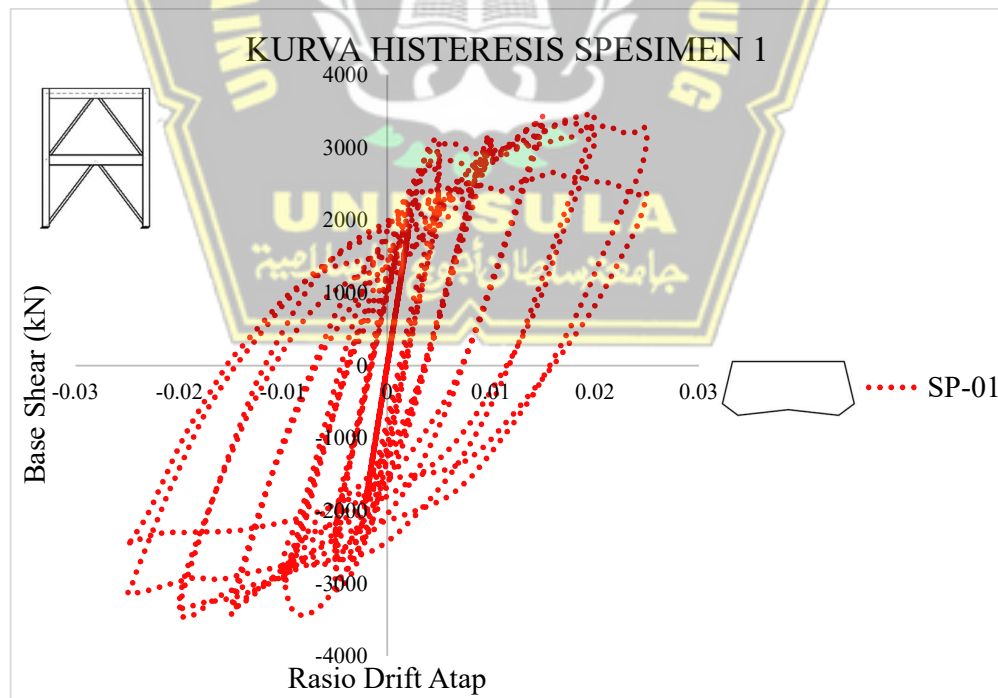
Gambar 4.25 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 15-16
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.26 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 17-18
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.27 Kurva Histeresis Spesimen 1 Siklus ke 19-20
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.28 Kurva Histeresis Spesimen 1
(Sumber : Hasil Analisis)

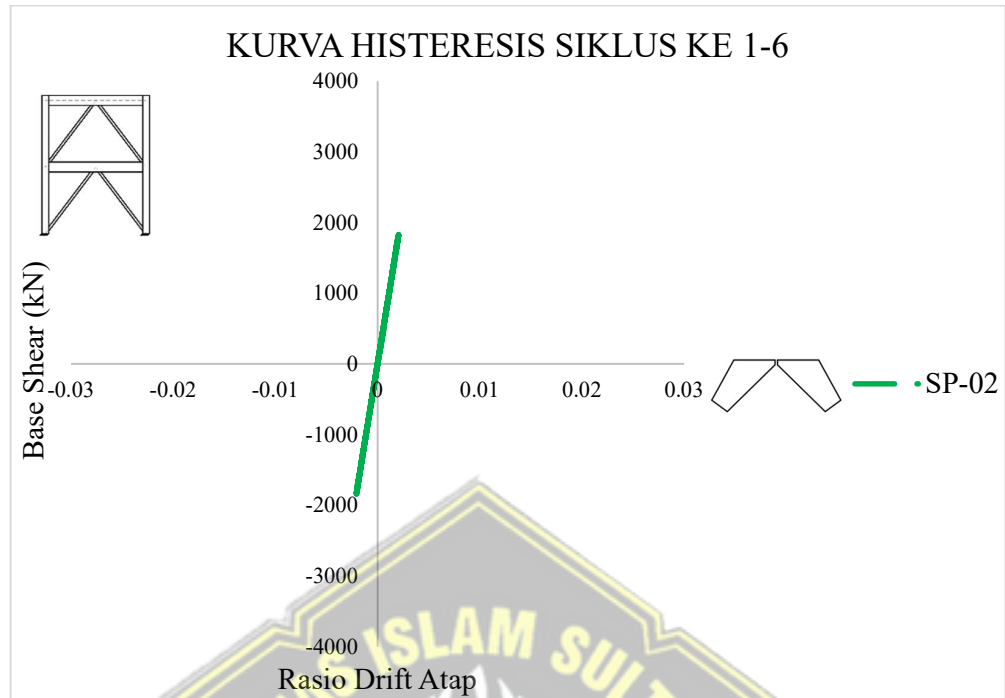
Tabel 4.2 Tahapan Perilaku Kurva Histeresis Spesimen 1 Berdasarkan Rentang Siklus

Rentang siklus	Level Drift (%)	Perilaku Histeresis
1 - 6	0,20625	Kurva terbuka penuh, simetris, struktur dalam fase elastis, tidak terlihat <i>pinching</i> .
7 – 10	0,5	<i>Loop</i> tetap stabil, mulai menunjukkan sedikit lentur, gaya lateral mulai meningkat.tajam.
11 – 14	1	Kurva tetap lebar namun mulai terjadi sedikit penyempitan (awal degradasi kekakuan).
15 - 16	1,5	Kurva tetap lebar namun terjadi sedikit penyempitan.
17 -18	2	Kapasitas maksimum tercapai di siklus awal level drift (3467,11 kN).
19 - 20	2,5	Terjadi fraktur bresing lantai atas dan bawah, kurva histeresis menyempit drastis pada akhir siklus level drift, menandakan kehilangan kekakuan dan disipasi energi.

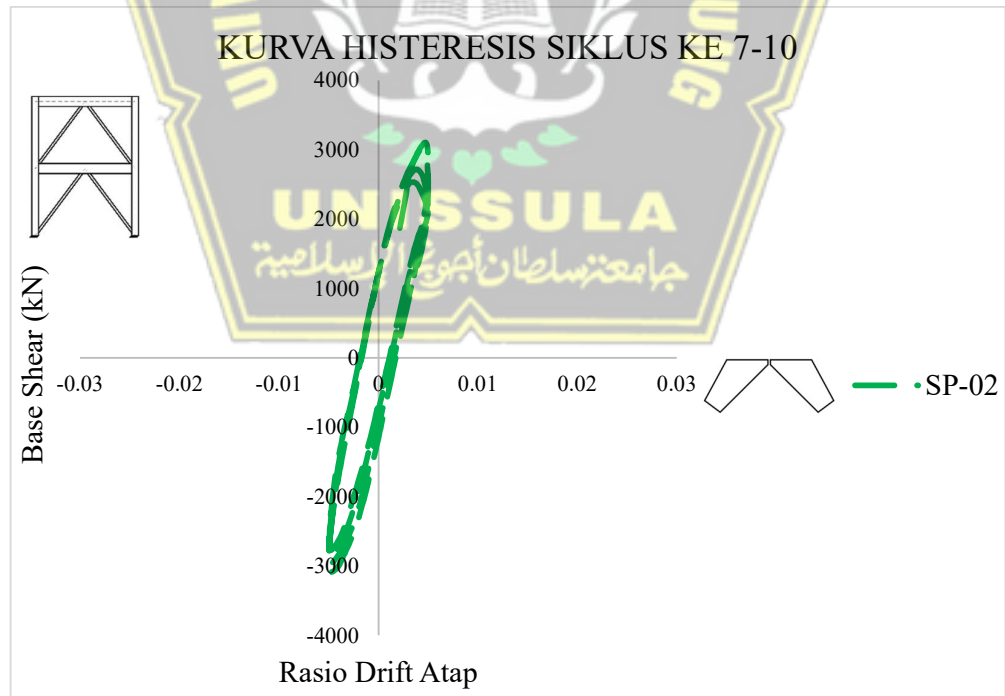
(Sumber : Hasil Analisis)

b. Spesimen 2 (SP-02)

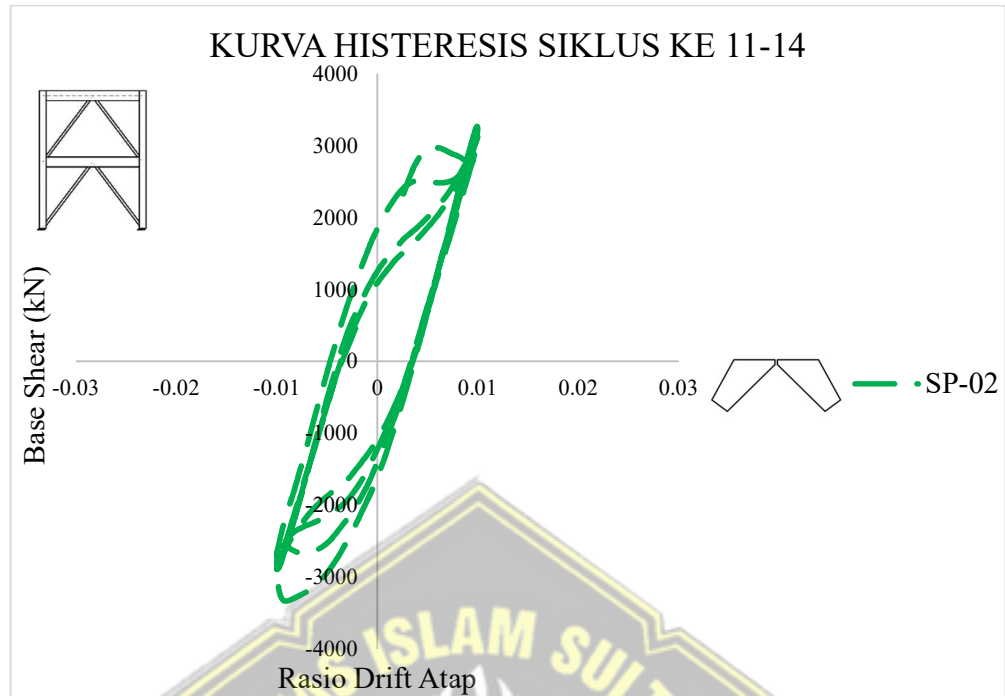
Spesimen 2 juga memiliki kurva histeresis yang cukup stabil. Tercatat nilai *base shear* pada spesimen 2 mencapai hingga 3477,96 kN dengan bukaan kurva yang sedikit lebih kecil dibandingkan spesimen 1. Hal ini mengindikasikan kapasitas disipasi energi yang masih cukup baik, namun sedikit lebih rendah. Akan tetapi pada siklus ke-20 terlihat penurunan tajam dalam kapasitas *base shear* maksimum dan penyempitan kurva histeresis. Ini menunjukkan bahwa spesimen mulai mengalami penurunan kekakuan ditandai dengan kerusakan fisik seperti fraktur pada ketiga bresing.



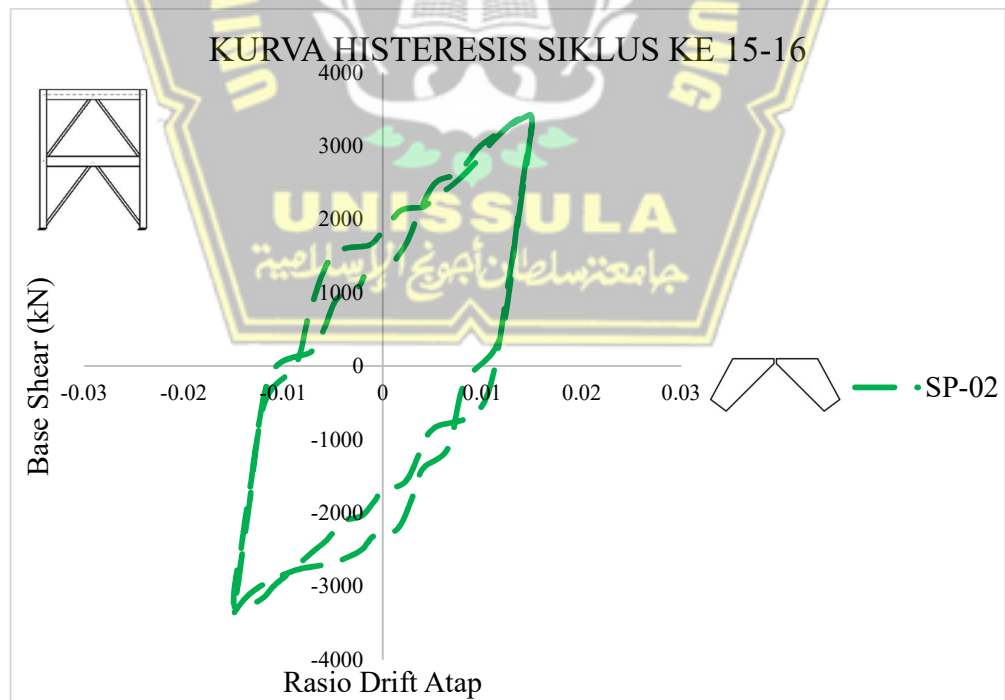
Gambar 4.29 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 1-6
(Sumber : Hasil Analisis)



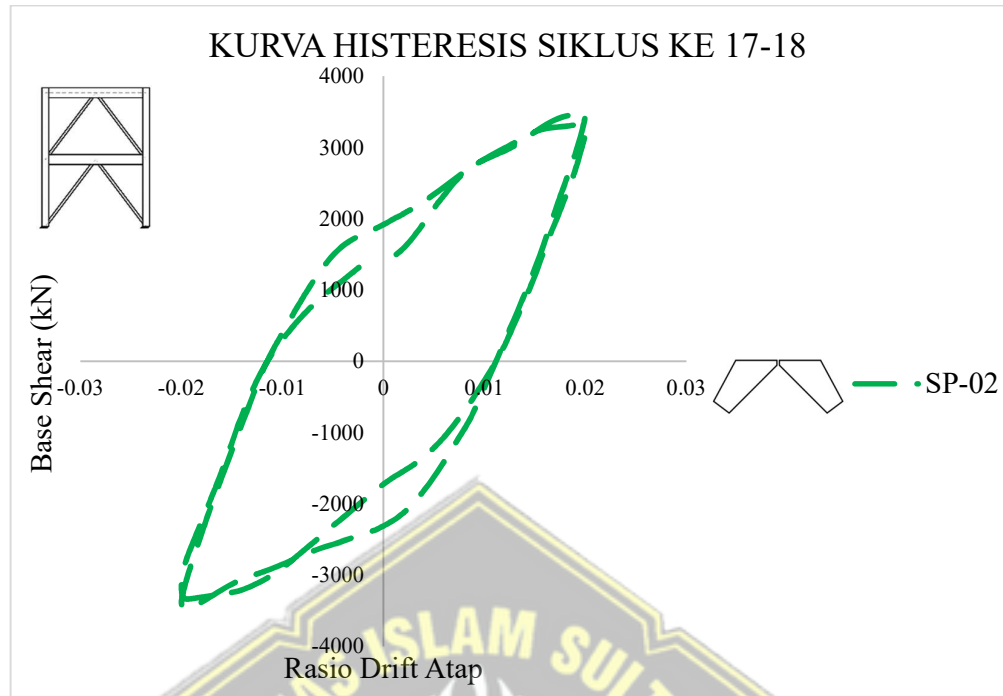
Gambar 4.30 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 7-10
(Sumber : Hasil Analisis)



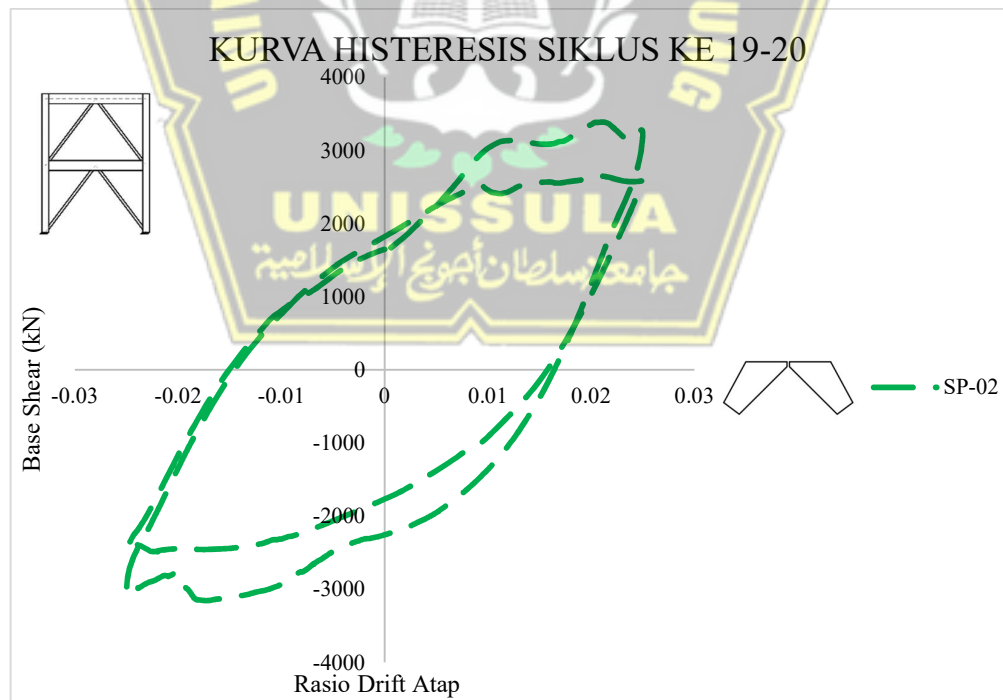
Gambar 4.31 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 11-14
(Sumber : Hasil Analisis)



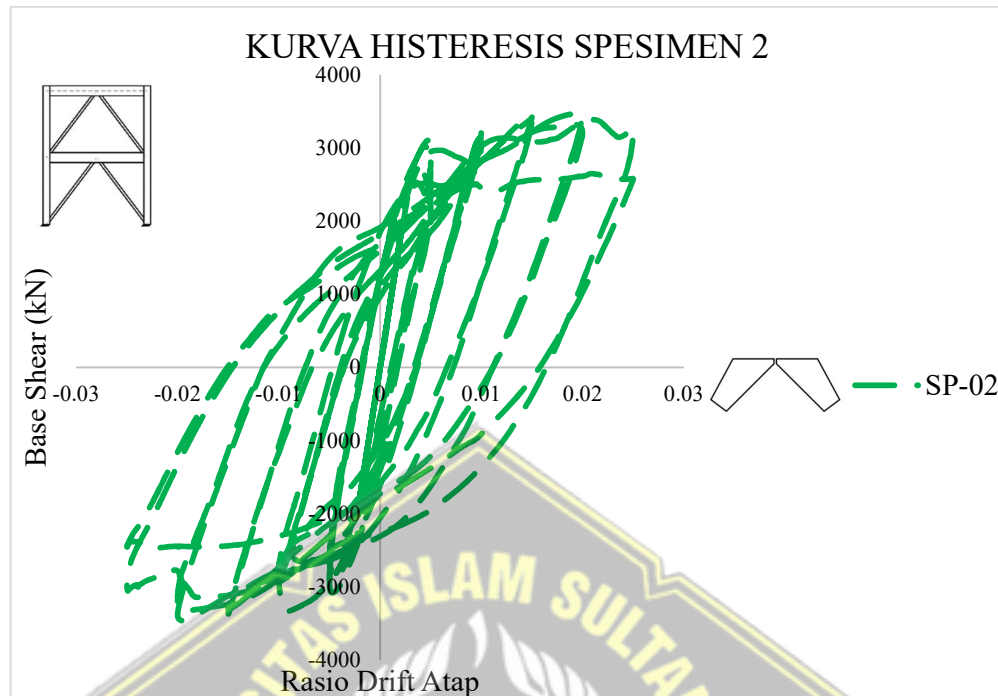
Gambar 4.32 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 15-16
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.33 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 17-18
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.34 Kurva Histeresis Spesimen 2 Siklus ke 19-20
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.35 Kurva Histeresis Spesimen 2

(Sumber : Hasil Analisis)

Tabel 4.3 Tahapan Perilaku Kurva Histeresis Spesimen 2 Berdasarkan Rentang Siklus

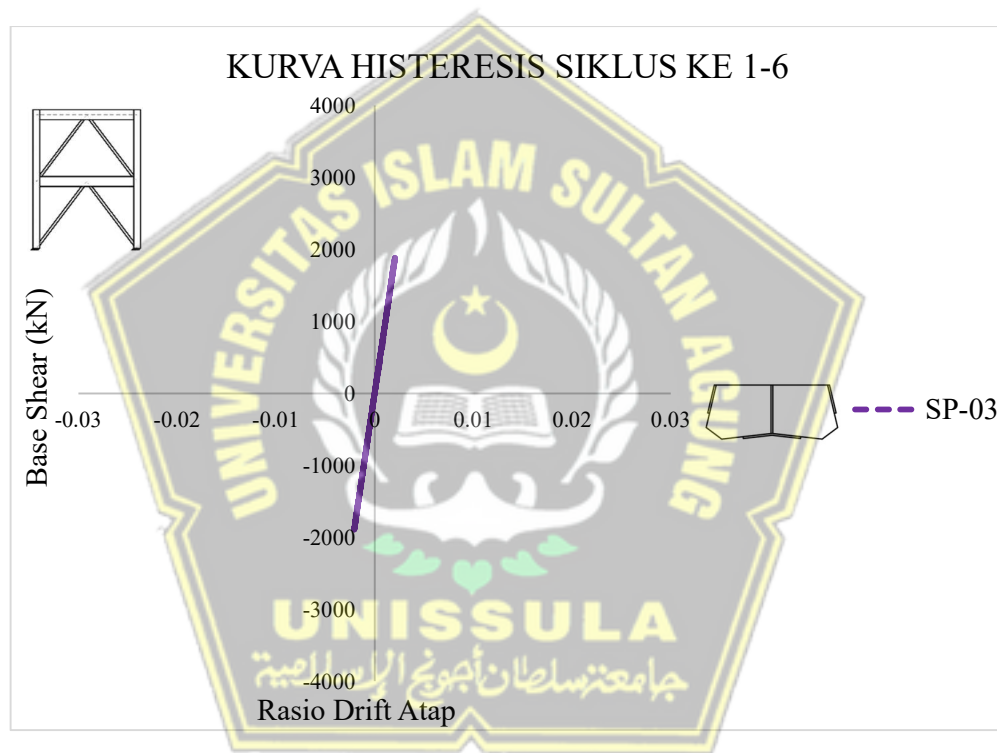
Rentang siklus	Level Drift (%)	Perilaku Histeresis
1 - 6	0,20625	Respons masih berada di daerah elastis, kurva lebar, dan tidak terlihat <i>pinching</i> .
7 - 10	0,5	<i>Loop</i> tetap stabil, mulai menunjukkan sedikit lentur, gaya lateral mulai meningkat.tajam.
11 - 14	1	Disipasi energi mulai terbentuk, muncul sedikit distorsi pada kurva, dan <i>base shear</i> meningkat.
15 - 16	1,5	Muncul sedikit penyempitan kurva, bentuk mulai asimetris, dan awal terjadi degradasi kekakuan.
17 -18	2	Kapasitas maksimum tercapai di siklus awal level drift (3477,96 kN).
19 - 20	2,5	Fraktur pada ketiga bresing terjadi yang ditunjukkan pada siklus akhir yang terlihat pada luas kurva yang mengecil, menandakan terjadinya kehilangan kekakuan.

(Sumber : Hasil Analisis)

c. Spesimen 3 (SP-03)

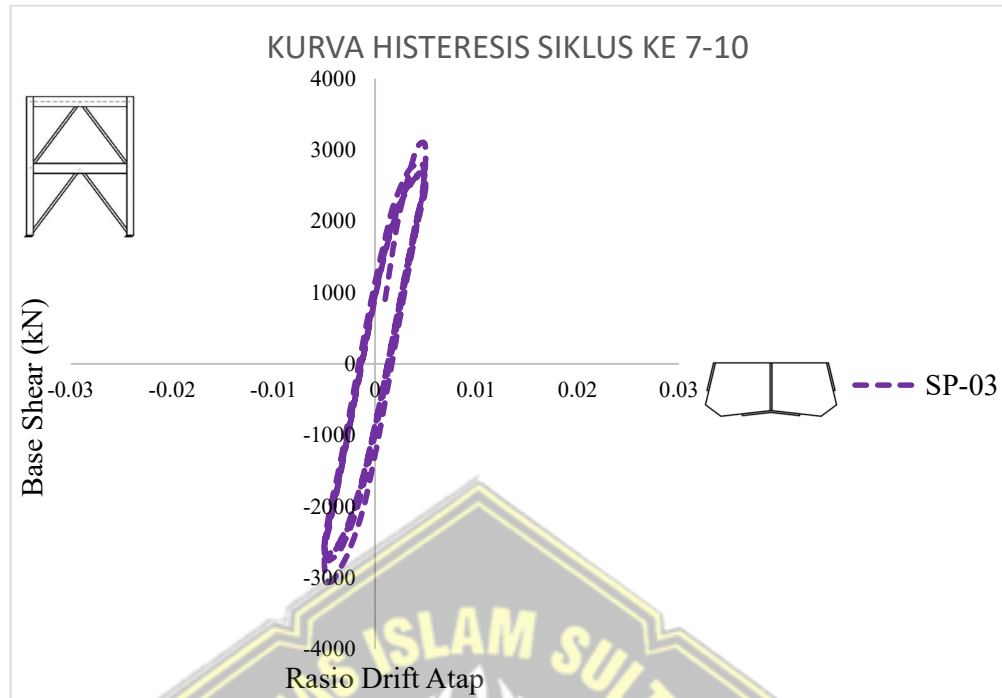
Luasan kurva histeresis spesimen 3 adalah yang paling besar pada siklus awal hingga siklus ke-18. Hal ini menunjukkan bahwa pada fase tersebut, ia memiliki kapasitas disipasi energi yang tinggi. Tercatat nilai *base shear* pada spesimen 3 mencapai hingga 3655,35 kN.

Namun, pada siklus ke-19 terlihat penurunan tajam dalam gaya lateral maksimum dan penyempitan kurva histeresis. Ini menunjukkan bahwa spesimen mulai mengalami kerusakan fisik seperti fraktur pada bresing.

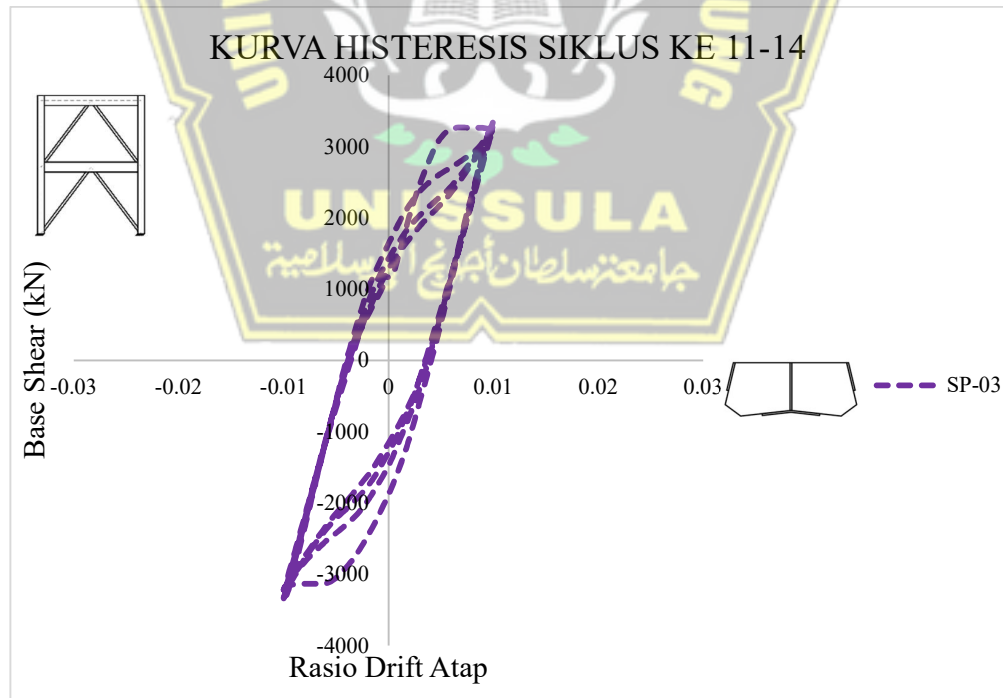


Gambar 4.36 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 1-6

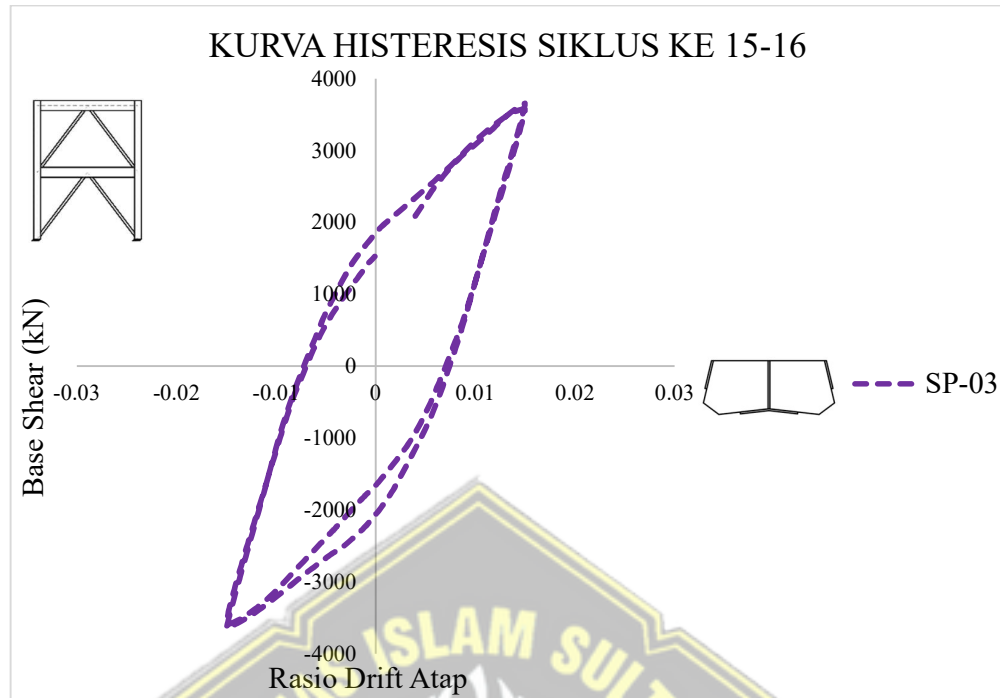
(Sumber : Hasil Analisis)



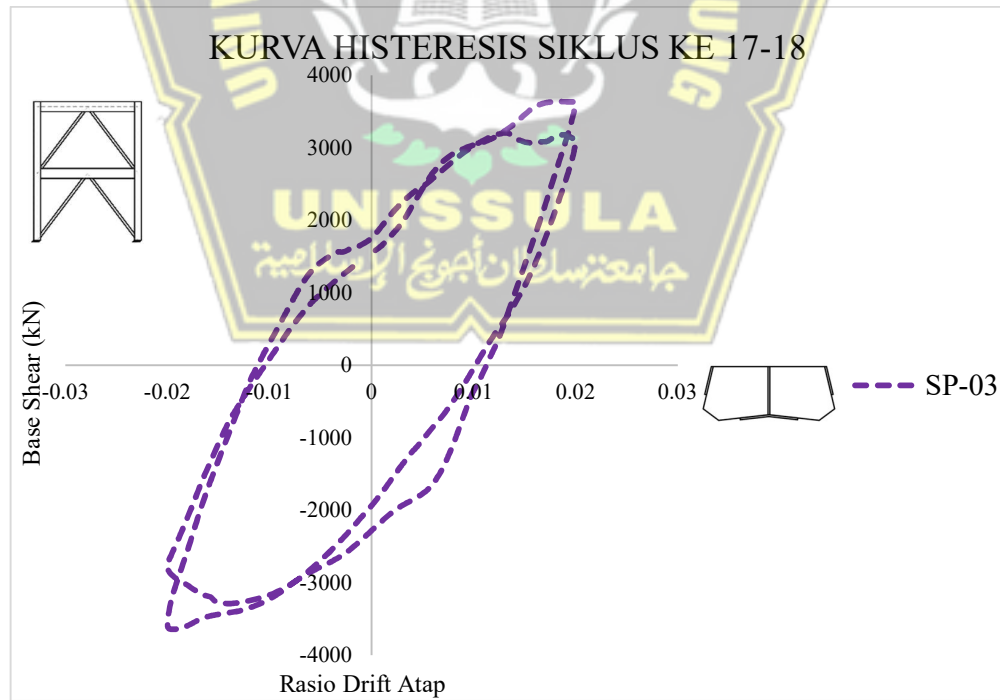
Gambar 4.37 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 7-10
(Sumber : Hasil Analisis)



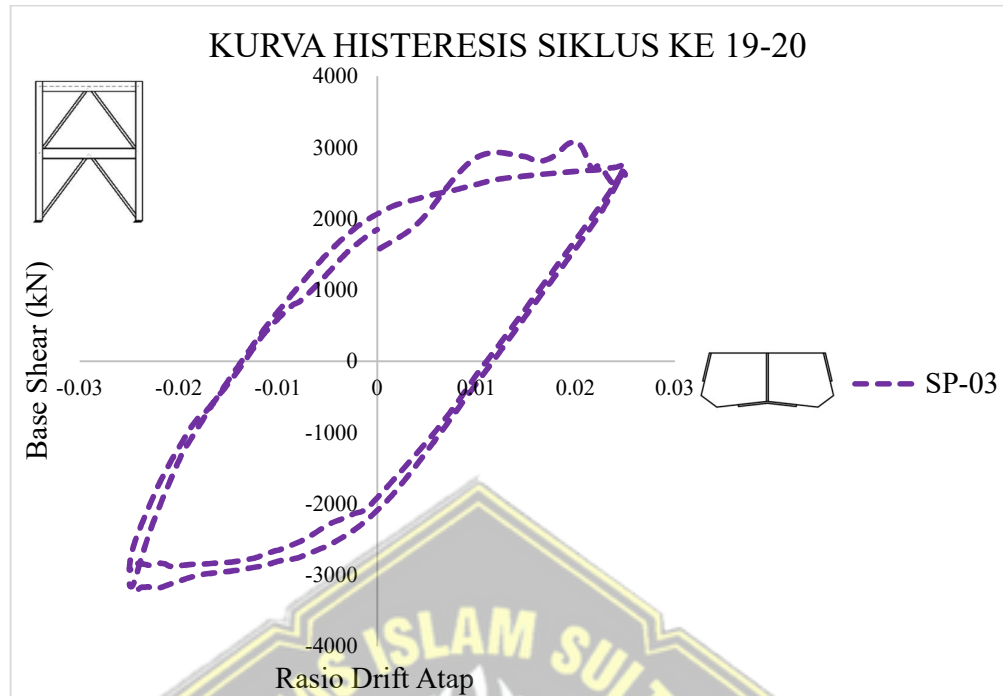
Gambar 4.38 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 11-14
(Sumber : Hasil Analisis)



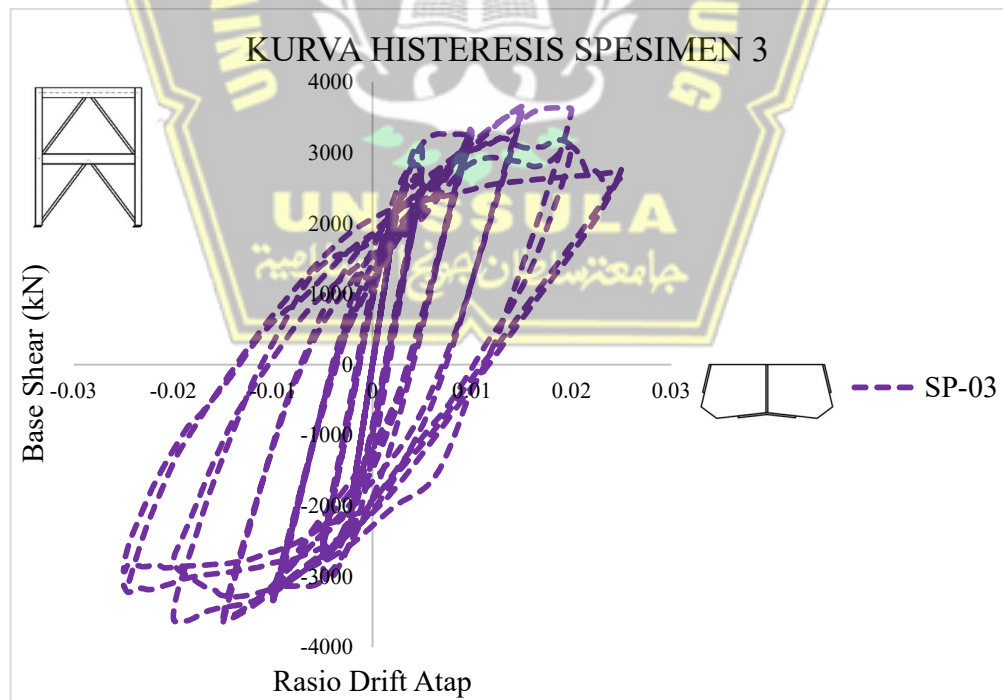
Gambar 4.39 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 15-16
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.40 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 17-18
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.41 Kurva Histeresis Spesimen 3 Siklus ke 19-20
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.42 Kurva Histeresis Spesimen 3
(Sumber : Hasil Analisis)

Tabel 4.4 Tahapan Perilaku Kurva Histeresis Spesimen 3 Berdasarkan Rentang Siklus

Rentang siklus	Level Drift (%)	Perilaku Histeresis
1 - 6	0,20625	Kurva terbuka penuh, paling lebar diantara ketiga spesimen, yang menunjukkan kekakuan awal tertinggi.
7 – 10	0,5	Luas kurva masih stabil dan besar, sedikit terjadi distorsi, disipasi energi tinggi, dan tidak ada penurunan signifikan.
11 – 14	1	Luas kurva masih stabil dan besar, disipasi energi tinggi, dan tidak ada penurunan signifikan.
15 - 16	1,5	Muncul sedikit penyempitan kurva, bentuk masih cukup simetris, dan awal terjadi degradasi kekakuan.
17 -18	2	Kapasitas maksimum tercapai di siklus awal level drift (3655,35 kN).
19 - 20	2,5	Penurunan drastis pada gaya lateral dan penyusutan luas kurva pada siklus akhir, luas kurva menyempit tajam, struktur kehilangan kapasitas disipasi, menandakan terjadinya keruntuhan.

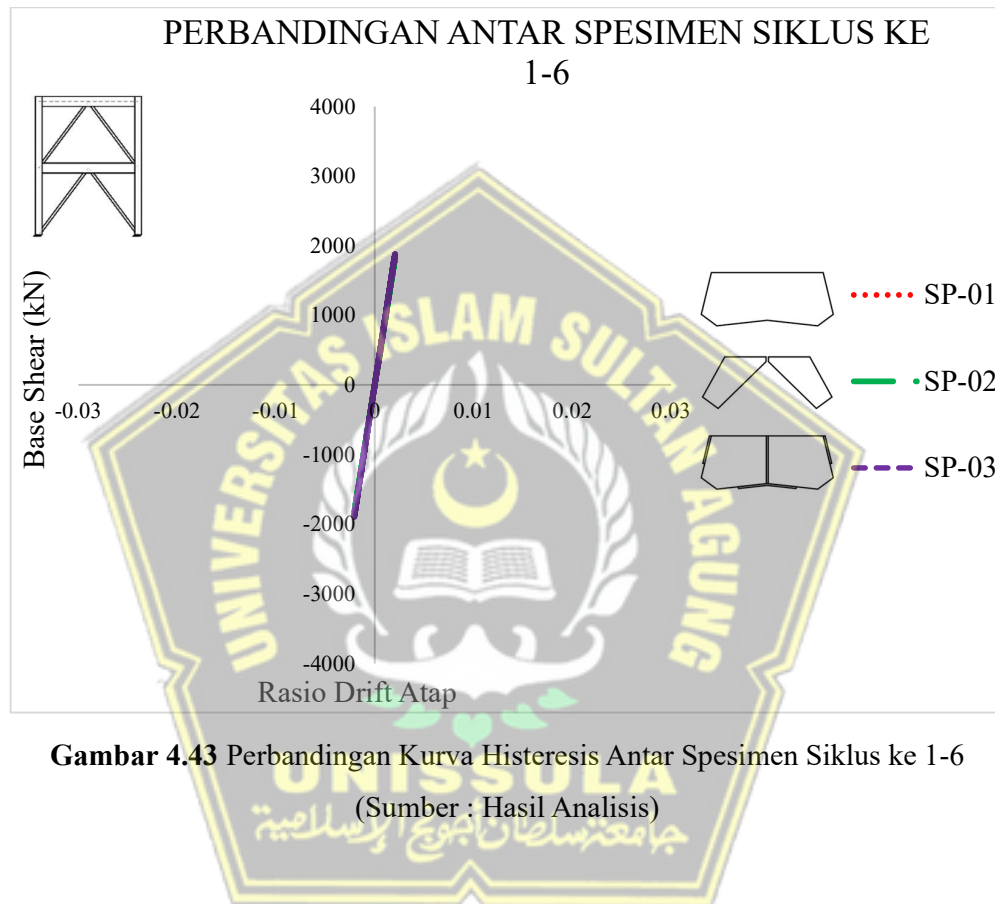
(Sumber : Hasil Analisis)

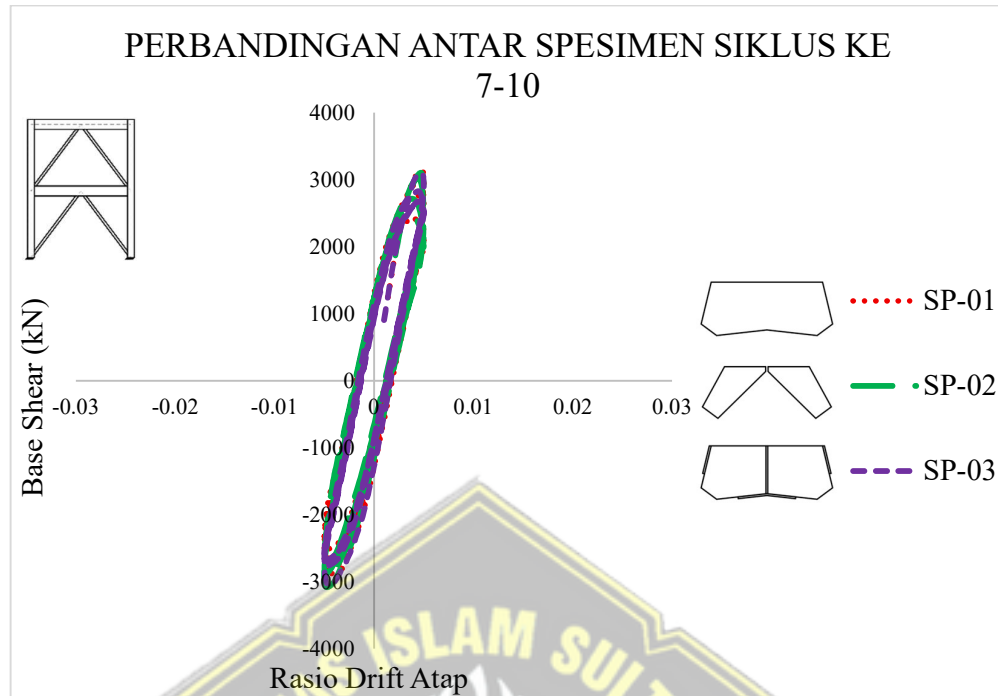
Spesimen 3 memperlihatkan luas kurva histeresis yang paling besar pada tahap awal siklus, menunjukkan bahwa ia memiliki kekakuan awal tertinggi dibandingkan dua spesimen lainnya, hal ini menandakan bahwa spesimen 3 mampu menahan beban secara efisien pada *story drift* rendah hingga sedang.

Saat perpindahan meningkat hingga *story drift* 2,5%, terjadi penurunan respons pada spesimen 3, yang tercermin dari penyusutan luasan kurva histeresis serta penurunan kapasitas gaya. Hal ini menunjukkan indikasi degradasi kekuatan dan kekakuan. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan tinggi pada tahap awal tidak menjamin ketahanan plastis yang baik pada tahap akhir deformasi.

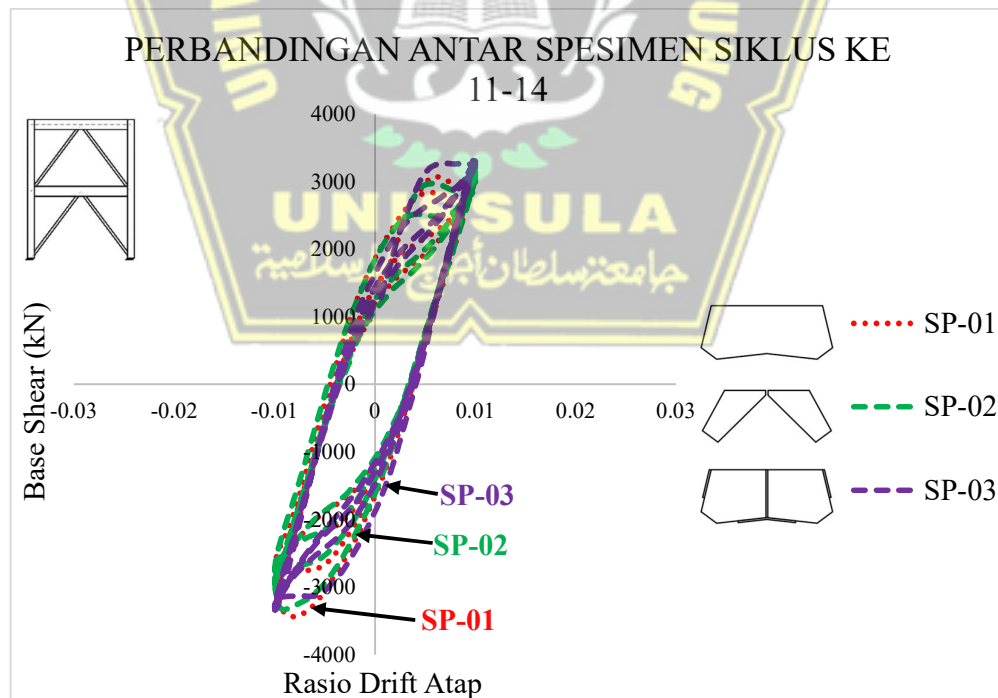
Spesimen 1 dan 2, meskipun kekakuannya lebih rendah, cenderung menunjukkan kurva histeresis yang lebih stabil di siklus menengah. Namun, perlu dicatat bahwa ketiga spesimen mengalami penurunan performa yang cukup signifikan pada siklus ke 19 dan 20, ditandai dengan berkurangnya gaya maksimum dan mengecilnya luas kurva histeresis. Hal ini terjadi karena ada beberapa bresing pada tiap spesimen yang sudah fraktur sepenuhnya dan terjadinya sendi plastis pada pelat simpul dan balok sehingga mengurangi kekakuan pada struktur.

Secara umum dapat disimpulkan terdapat pertukaran antara kekakuan awal dan kapasitas deformasi plastis. Spesimen dengan kekakuan tinggi seperti spesimen 3 rentan mengalami penurunan performa lebih awal, sedangkan spesimen dengan kekakuan sedang bertahan lebih stabil, meskipun tidak mampu mempertahankan performa setelah melewati ambang tertentu, seperti pada siklus ke-20.

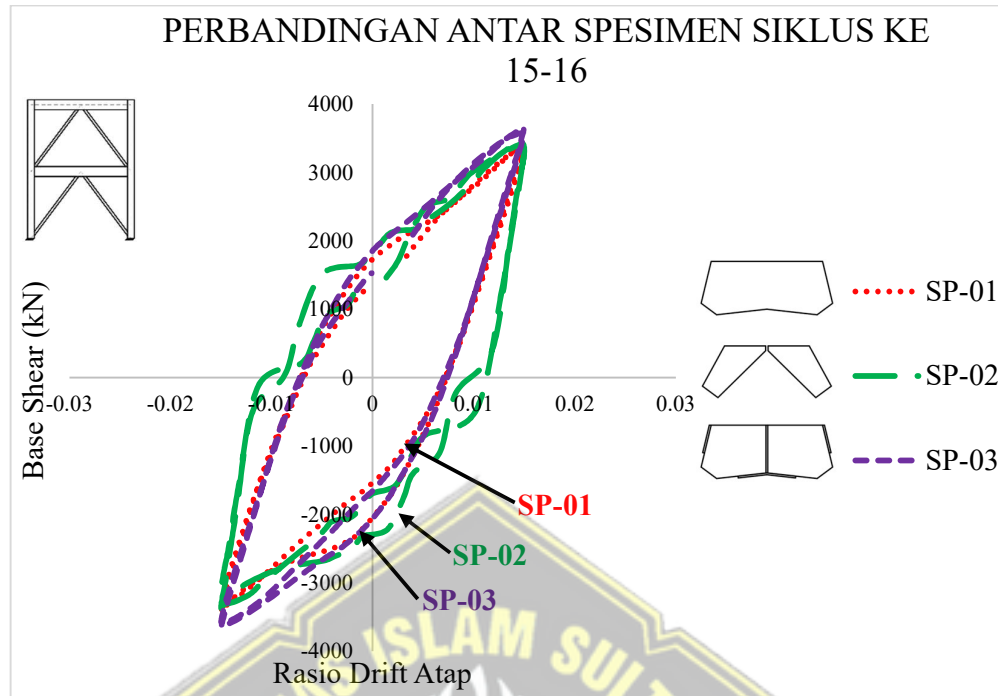




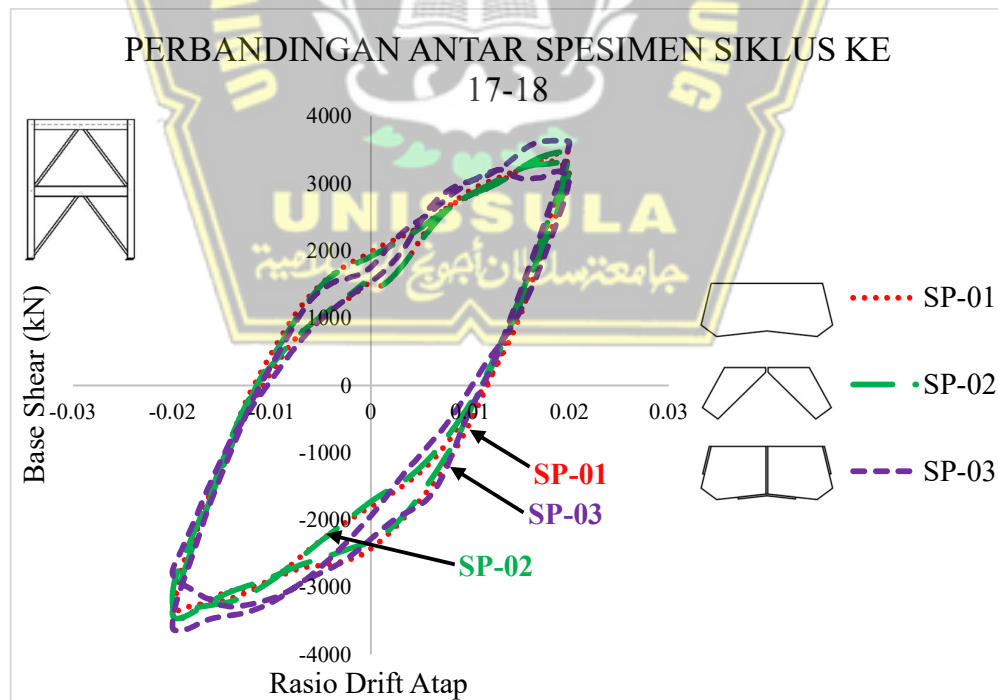
Gambar 4.44 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 7-10
(Sumber : Hasil Analisis)



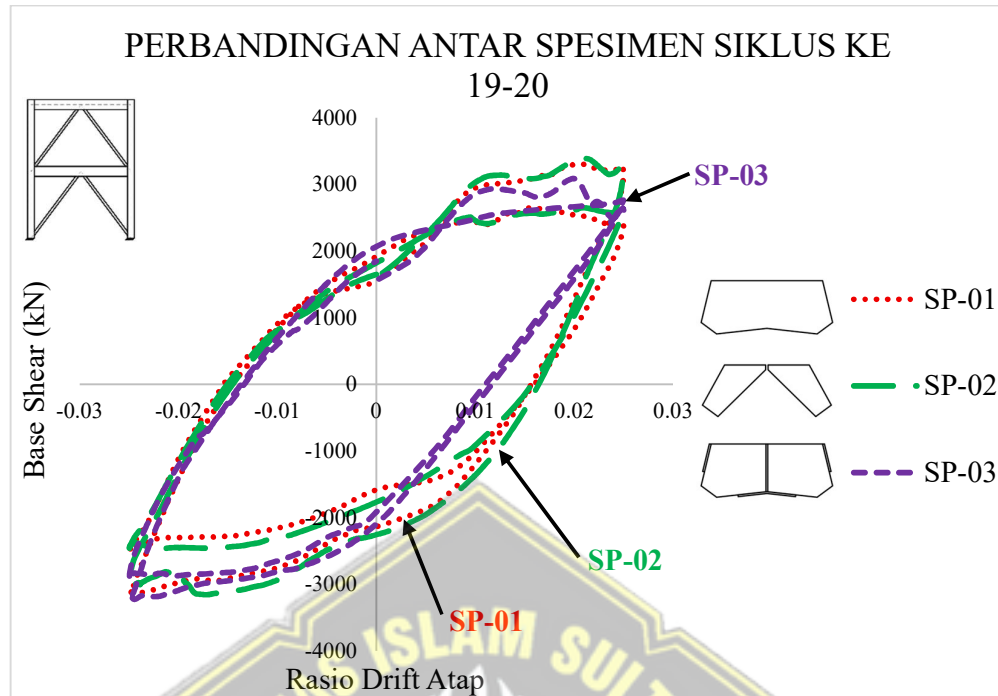
Gambar 4.45 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 11-14
(Sumber : Hasil Analisis)



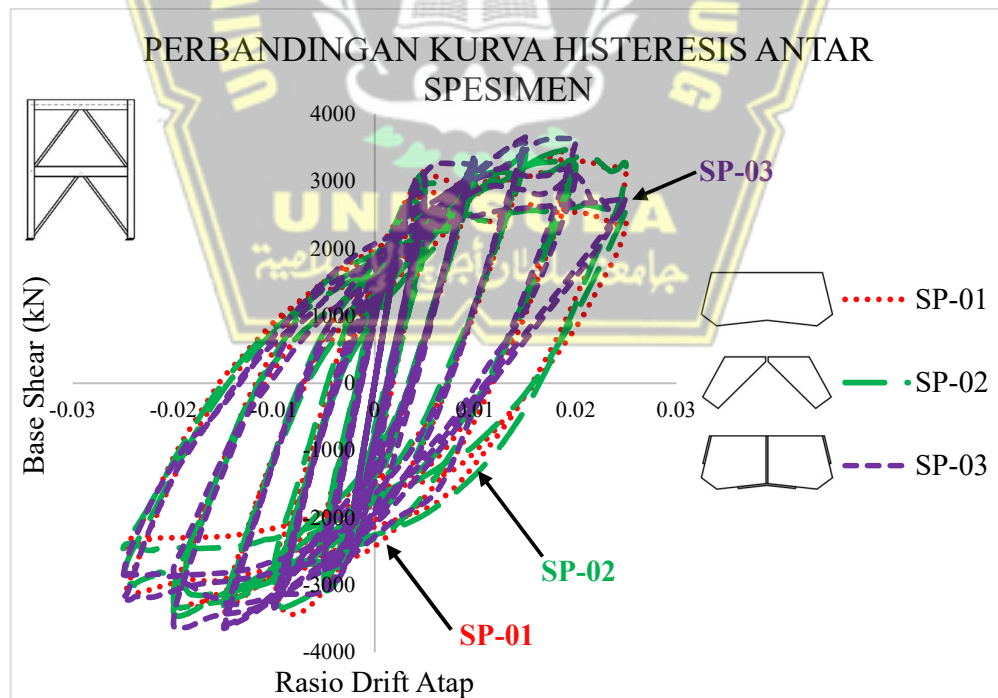
Gambar 4.46 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 15-16
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.47 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 17-18
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.48 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimen Siklus ke 19-20
(Sumber : Hasil Analisis)



Gambar 4.49 Perbandingan Kurva Histeresis Antar Spesimena
(Sumber : Hasil Analisis)

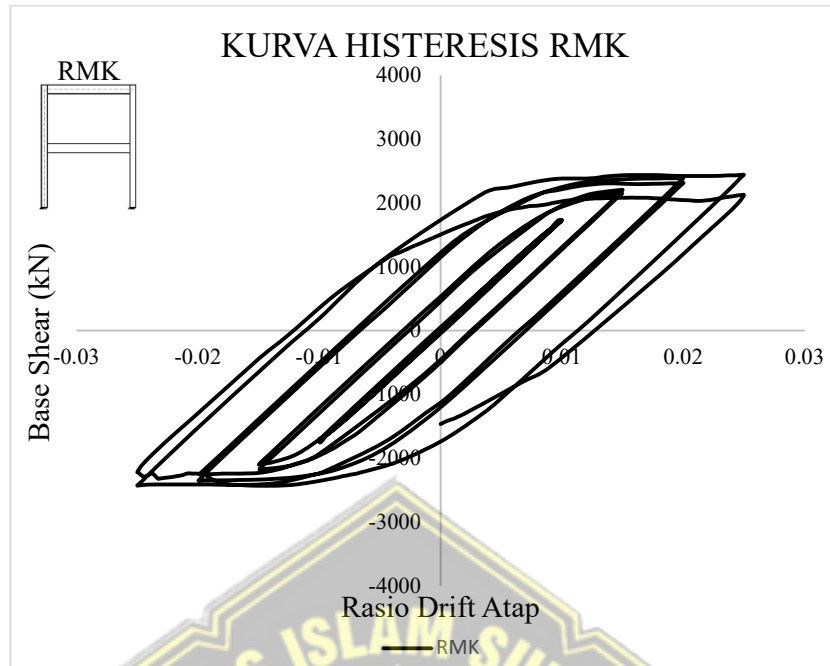
Tabel 4.5 Perbandingan Karakteristik Kurva Histeresis Antar Spesimen

Parameter	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3
<i>Base Shear</i> Maksimum (kN)	3467,11	3477,96	3655,35
Stabilitas Kurva Awal	Stabil dan simetris	Stabil dan mulai lentur	Stabil dan kaku
Gejala Softening	Setelah siklus ke-19	Setelah siklus ke-19	Setelah siklus ke-18
Indikasi <i>pinching</i>	Terlihat mulai di siklus 20	Terlihat mulai di siklus 20	Terlihat mulai di siklus 19
Keterangan umum	Performa seimbang	Daktilitas tinggi, stabilitas kurang.	Kekakuan tinggi, cepat menurun.

(Sumber : Hasil Analisis)

4.2.3 Perbandingan Kinerja Ketiga Spesimen terhadap Struktur Rangka Momen Khusus (RMK)

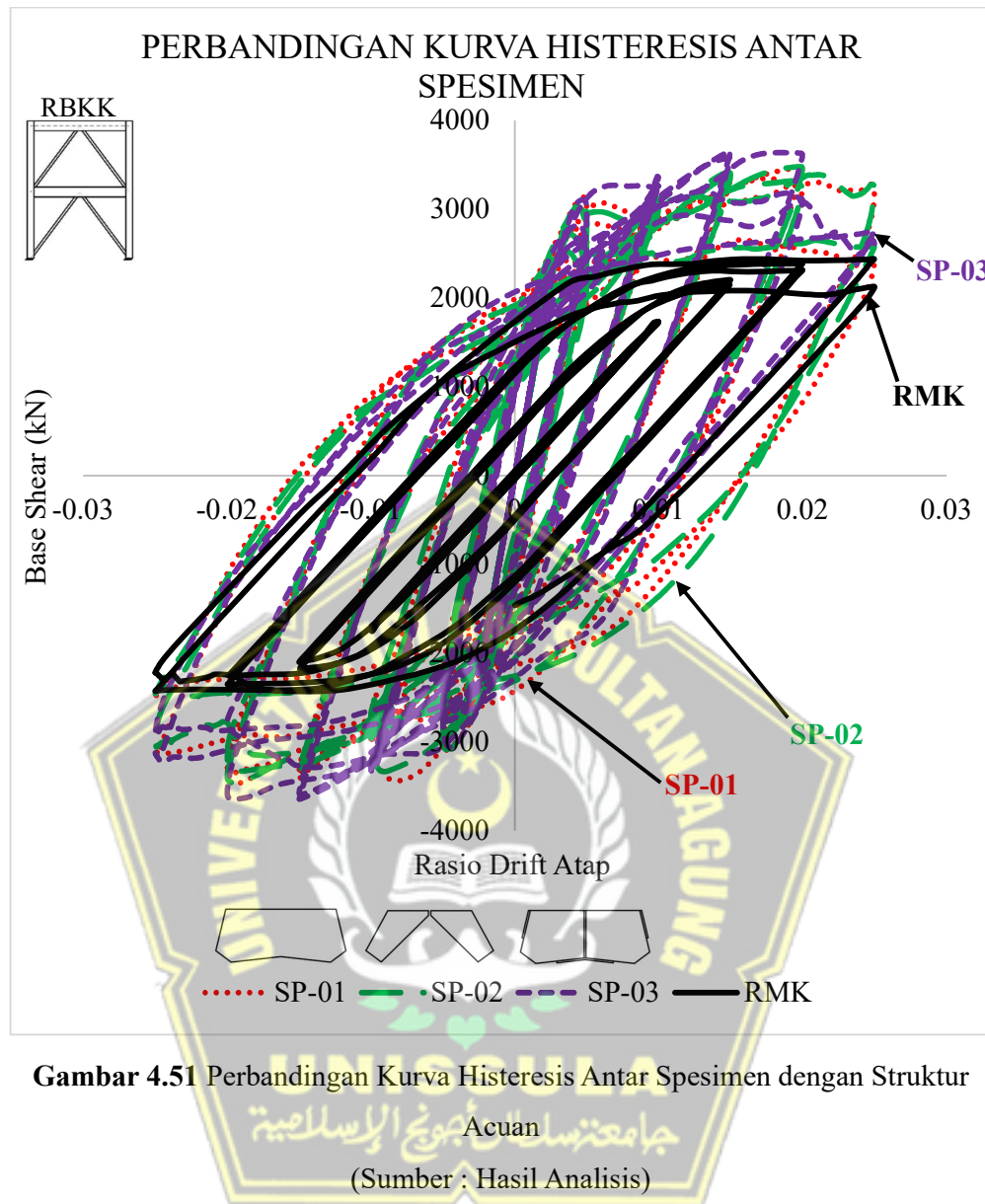
Sebagai upaya untuk memahami efektifitas sistem bresing yang diterapkan pada masing-masing spesimen, dilakukan perbandingan terhadap struktur acuan berupa rangka yang identik namun tanpa elemen bresing. Struktur ini pada dasarnya merupakan versi tanpa bresing dari RBKK, di mana konfigurasi kolom dan balok tetap sama, namun tidak memiliki sistem penahan gaya lateral tambahan seperti bresing. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk mengukur sejauh mana keberadaan dan konfigurasi bresing memberikan pengaruh terhadap performa struktur secara global, terutama dalam hal kurva histeresis.



Gambar 4.50 Kurva Histeresis RMK

(Sumber : Hasil Analisis)

Kurva histeresis struktur RMK menunjukkan respons gaya lateral terhadap simpangan lateral akibat pembebanan siklik. Bentuk lengkung yang terbentuk pada grafik tersebut cenderung ramping dan memanjang, mengindikasikan bahwa struktur RMK memiliki perilaku lentur dominan dengan kapasitas disipasi energi yang tidak sebesar RBKK. Tercatat bahwa nilai *base shear* maksimum dari struktur acuan ini hanya 2439,75 kN, berbeda dengan ketiga spesimen RBKK yang mencapai hingga 3400-3700 kN, lebih besar 40-50 % dibandingkan struktur acuan.



Hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur RBKK secara umum memiliki performa yang jauh lebih unggul dibandingkan struktur acuan dalam hal kekakuan awal, kapasitas gaya lateral maksimum, serta kemampuan disipasi energi. Gambar 4.51 menunjukkan bahwa kurva histeresis memperlihatkan bahwa struktur acuan menghasilkan lengkung yang lebih sempit daripada ketiga spesimen dengan simpangan lateral yang sama, mencerminkan perilaku lentur yang dominan dan kemampuan disipasi energi yang tak sebesar ketiga spesimen.

Namun, peningkatan performa pada ketiga spesimen Rangka Bresing Konsentris Khusus (RBKK) tersebut juga diiringi dengan munculnya fenomena degradasi kekakuan, *local buckling* pada bresing yang berujung fraktur pada bresing, dan ketergantungan terhadap konfigurasi kekakuan bresing masing-masing. Struktur acuan memang tidak mengalami degradasi seperti itu, tetapi hal ini dibayar dengan kapasitas lateral yang rendah dan tidak adanya jalur disipasi energi dari bresing.

Kapasitas *base shear* maksimum yang dicapai ketiga spesimen RBKK yang signifikan dibandingkan struktur acuan tanpa bresing. Spesimen 1 memiliki kapasitas maksimum sebesar 3467,11 kN dengan rasio terhadap struktur acuan sebesar 1,421. Spesimen 2 sedikit lebih tinggi dengan kapasitas 3477,96 kN dengan rasio terhadap struktur acuan sebesar 1,426. Spesimen 3 mencatat kapasitas tertinggi sebesar 3655,35 kN dengan rasio terhadap struktur acuan sebesar 1,498. Sementara itu, struktur acuan hanya mencapai 2439,75 kN sebagai nilai kapasitas maksimumnya. Hasil ini mengindikasikan bahwa penerapan bresing dengan variasi desain pelat simpul mampu meningkatkan kapasitas *base shear* secara signifikan, dengan spesimen 3 memberikan kontribusi peningkatan terbesar, diikuti oleh spesimen 2 dan spesimen 1.

Tabel 4.6 Rekapitulasi Perilaku Histeresis Struktur

No .	Spesimen	Drift Max (%)	Base Shear Maksimum (kN)	Rasio	Karakteristik Kurva Histeresis	Indikasi Degradasi Kekakuan
1	Spesimen 1	2,5	3467,11	1,421	Bukaan kurva lebar dan stabil hingga siklus ke-19	Terjadi pada siklus ke-20 dengan drift 2,5 %
2	Spesimen 2	2,5	3477,96	1,426	Bukaan kurva lebar dan stabil hingga siklus ke-19	Terjadi pada siklus ke-20 dengan drift 2,5 %
3	Spesimen 3	2,5	3655,35	1,498	Bukaan kurva lebar dan stabil hingga siklus ke-18	Terjadi pada siklus ke-19 dengan drift 2,5 %

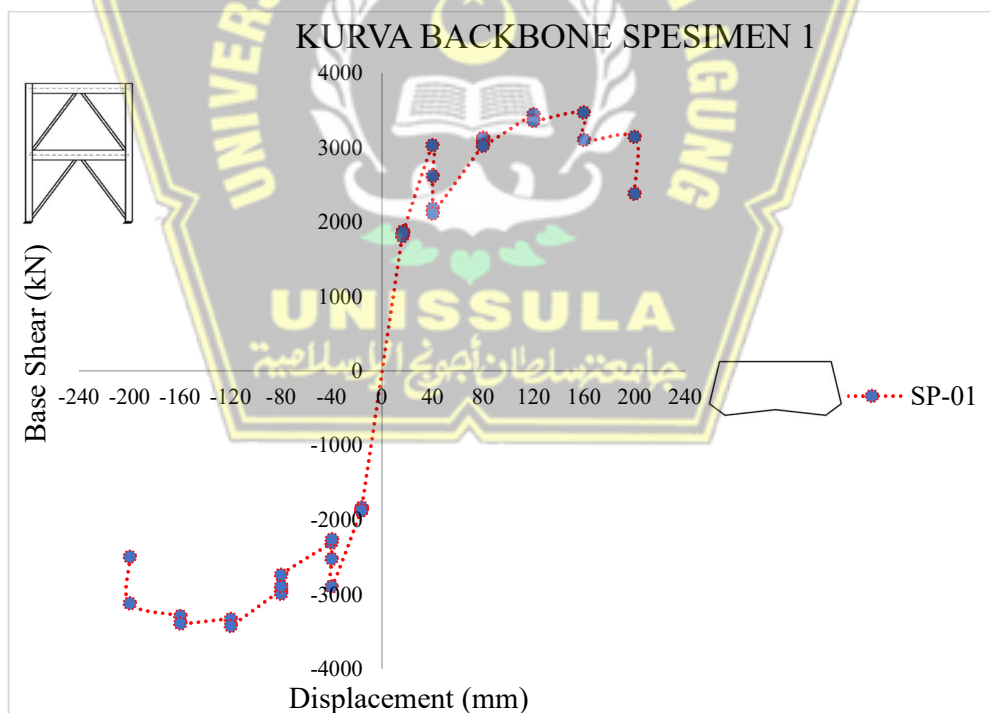
4	Struktur acuan tanpa bresing	2,5	2439,75	1	Bukaan kurva lebar dan stabil sepanjang semua siklus	Tidak signifikan
---	------------------------------	-----	---------	---	--	------------------

(Sumber : Hasil Analisis)

4.3 Kurva *Back Bone*

Kurva *back bone* merupakan representasi idealisasi dari respons histeresis sistem struktur ketika mengalami pembebanan siklik. Kurva ini menggambarkan hubungan antara *base shear* maksimum terhadap *displacement* maksimum yang dicapai pada tiap siklus pembebanan. Dengan mengekstrak titik-titik puncak dari siklus histeresis, kurva *back bone* memberikan gambaran umum tentang kapasitas kekuatan, kekakuan, daktilitas, dan degradasi struktural dalam satu tampilan yang ringkas dan informatif.

4.3.1 Spesimen 1 (SP-01)



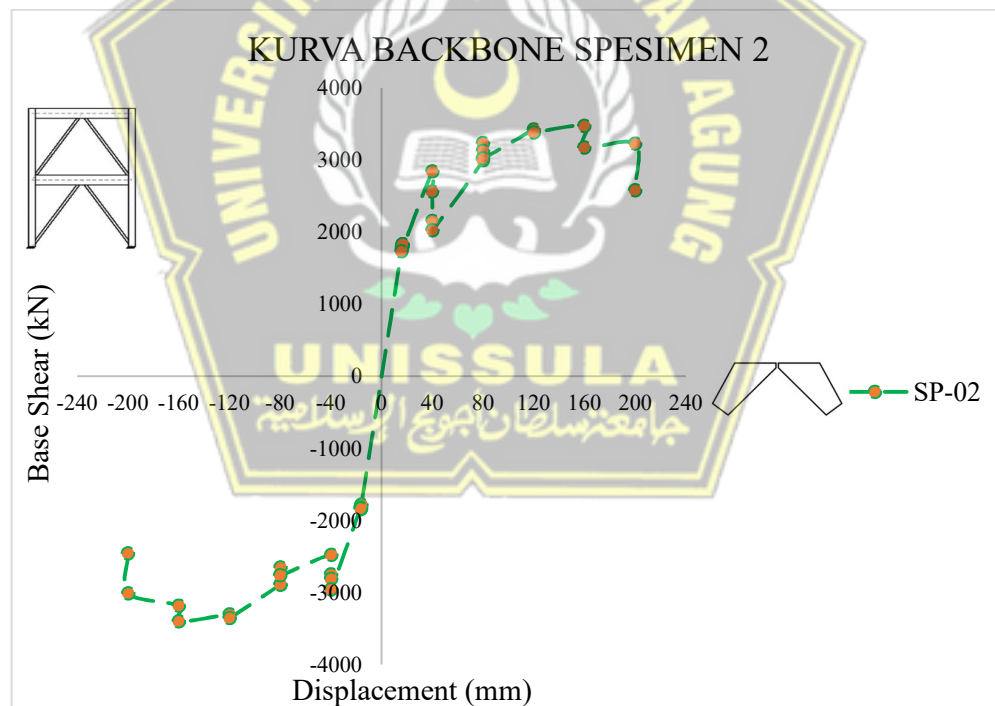
Gambar 4.52 Kurva *Back Bone* Spesimen 1

(Sumber : Hasil Analisis)

Pada spesimen 1, *backbone curve* menunjukkan respons *base shear* maksimum yang cukup stabil hingga *displacement* 40 mm dengan nilai puncak *base shear* 3028,5 kN walaupun ada penurunan nilai *base shear* hingga 2112,2 kN. Penurunan gaya ini mengindikasikan adanya *global buckling* walaupun selanjutnya menunjukkan naiknya nilai *base shear* hingga 3467,11 kN. Setelah mencapai *displacement* sebesar 160 mm, gaya mulai mengalami penurunan. Penurunan ini diakibatkan oleh fraktur pada bresing sehingga mengakibatkan berkurangnya kekakuan struktur.

Respons awal spesimen 1 menunjukkan kekakuan yang baik dalam tahap elastis, namun cenderung mengalami pelandaian setelah mencapai kapasitas maksimum. Ini menunjukkan bahwa spesimen 1 mengalami penurunan kemampuan dalam menahan beban tambahan setelah kapasitas maksimum tercapai.

4.3.2 Spesimen 2 (SP-02)



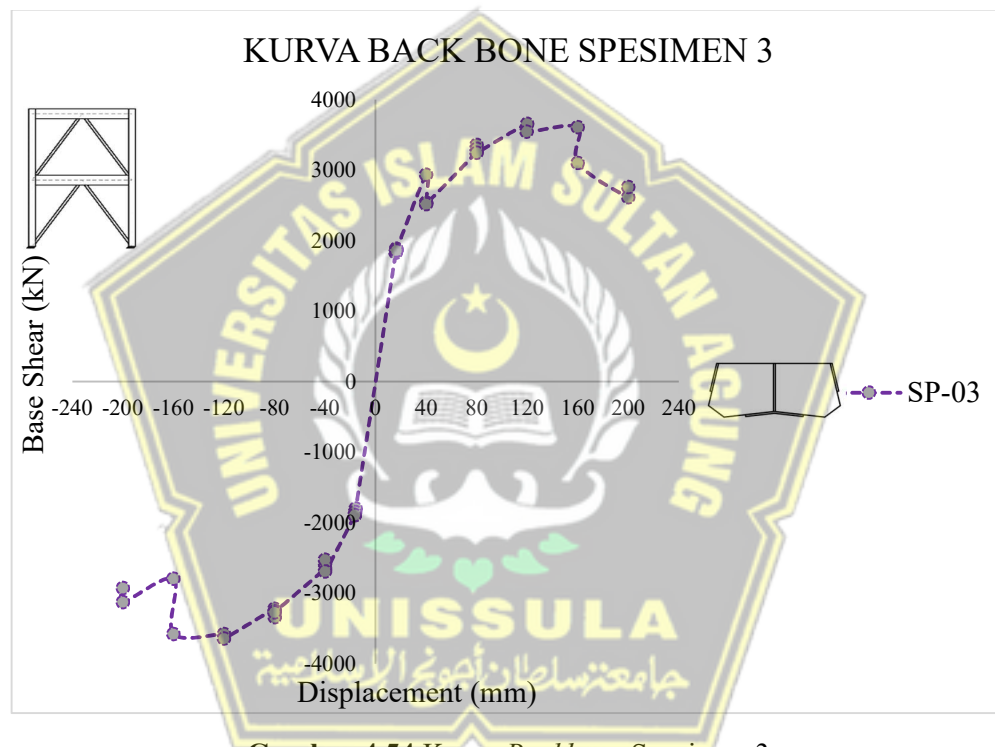
Gambar 4.53 Kurva *Back Bone* Spesimen 2

(Sumber : Hasil Analisis)

Backbone curve spesimen 2 menunjukkan pola yang sangat mirip dengan spesimen 1. *Backbone curve* menunjukkan respons *base shear* maksimum yang cukup stabil

hingga *displacement* 40 mm dengan nilai puncak *base shear* 3028,5 kN walaupun ada penurunan nilai *base shear* hingga 2022,13 kN. Penurunan gaya ini mengindikasikan adanya *global buckling* walaupun selanjutnya menunjukkan naiknya nilai *base shear* hingga 3477,96 kN. Setelah mencapai *displacement* sebesar 160 mm, gaya mulai mengalami penurunan. Penurunan ini diakibatkan oleh fraktur pada bresing sehingga mengakibatkan berkurangnya kekakuan struktur.

4.3.3 Spesimen 3 (SP-03)



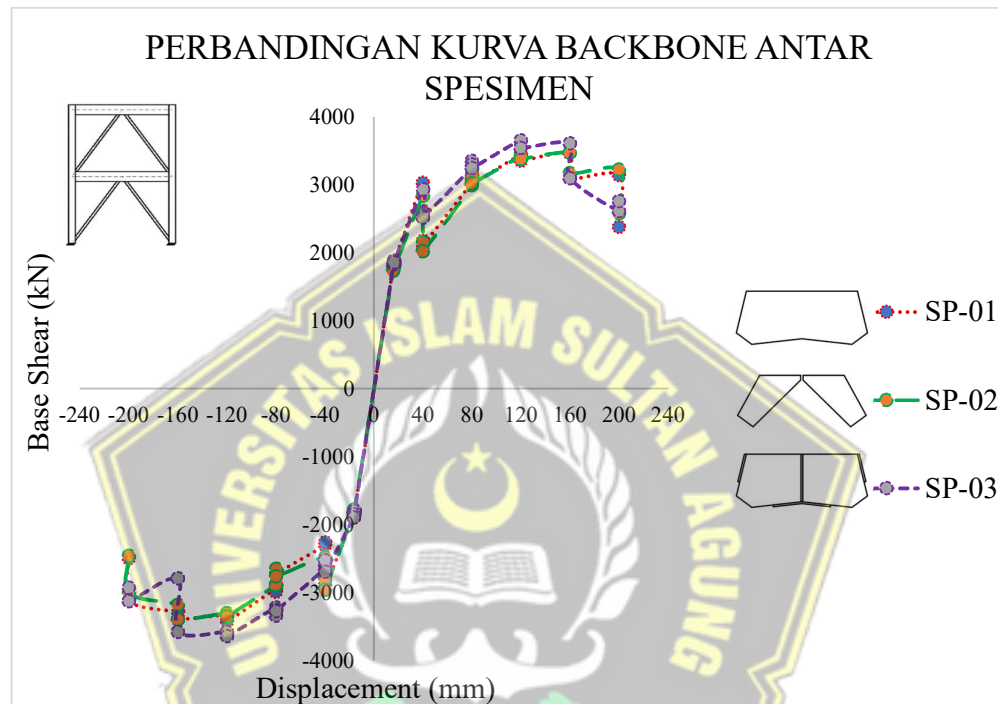
Gambar 4.54 Kurva *Backbone* Spesimen 3

(Sumber : Hasil Analisis)

Spesimen 3 menunjukkan *backbone curve* dengan nilai gaya maksimum tertinggi. *Backbone curve* menunjukkan respons *base shear* maksimum yang cukup stabil hingga *displacement* 40 mm dengan nilai puncak *base shear* 2932,75 kN walaupun ada penurunan nilai *base shear* hingga 2515,84 kN. Penurunan gaya ini mengindikasikan adanya *global buckling* walaupun selanjutnya menunjukkan naiknya nilai *base shear* hingga 3655,35 kN. Setelah mencapai *displacement*

sebesar 160 mm, gaya mulai mengalami penurunan. Penurunan ini diakibatkan oleh fraktur pada bresing sehingga mengakibatkan berkurangnya kekakuan struktur. Pada Spesimen 3 ini ketika *displacement* mencapai 200 mm mengalami penurunan kekuatan hingga 2613,73 kN walaupun naik lagi menjadi 2759,1 kN.

4.3.4 Analisis Perbandingan



Gambar 4.55 Perbandingan Antara Kurva *Backbone* Antar Spesimen
(Sumber : Hasil Analisis)

Dari ketiga spesimen, dapat disimpulkan bahwa :

- Spesimen 3 memiliki kekuatan maksimum paling tinggi hingga 5% dibandingkan spesimen 1 dan 2, namun tidak mampu mempertahankan kapasitas tersebut pada *displacement* besar;
- Spesimen 1 dan 2 memiliki kekuatan yang hampir setara, dengan degradasi yang sedikit lebih terkontrol;
- Semua spesimen menunjukkan degradasi kekuatan pada *displacement* di atas 160 mm.

Tabel 4.7 Hasil Kapasitas *Base Shear* Maksimum dan Rasio Tiap Spesimen

Parameter	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3
<i>Base Shear</i> Maksimum (kN)	3467,11	3477,96	3655,35
Bentuk Kurva Awal	Stabil dan simetris	Stabil dan mulai lentur	Stabil dan kaku
Pola Pasca Puncak	Melunak ringan	Melunak ringan	Penuruna tajam saat <i>drift</i> 2,5 %
Perilaku Plastis	Seimbang, cukup stabil	Seimbang, cukup stabil	Kurang daktil, cepat menurun
Ciri Khas Kurva	Lengkung penuh dan gradual	Lengkung penuh dan gradual	Kaku, fraktur mendadak

(Sumber : Hasil Analisis)

Analisis kurva histeresis dan *backbone curve* dalam bab ini sebagai representasi umum respons struktur terhadap beban siklik. Indikasi parameter-parameter lain seperti degradasi kekakuan dan kapasitas disipasi energi juga dapat diturunkan dari hasil ini, pembahasan secara khusus terhadap parameter-parameter tersebut dapat ditemukan, misalnya pada penelitian oleh Rongqian & Xuejun (2020) yang menunjukkan keterkaitan antara bentuk kurva histeresis dengan kapasitas disipasi energi dan degradasi kekakuan.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian analisis numerik terhadap ketiga spesimen struktur Rangka Bresing Konsentris Khusus pada pembebanan siklik, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil analisis perbandingan performa histeresis struktur RBKK dan struktur acuan tanpa bresing (RMK) diperoleh bahwa kapasitas *base shear* maksimum pada struktur RBKK menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan RMK. Untuk spesimen 1, kapasitas *base shear* maksimum sebesar 3467,11 kN atau 1,421 kali kapasitas RMK. Pada spesimen 2, kapasitas *base shear* maksimum mencapai 3477,96 kN atau 1,426 kali kapasitas RMK. Sedangkan pada spesimen 3, kapasitas *base shear* maksimum adalah 3655,35 kN atau 1,498 kali kapasitas RMK.
2. Dari hasil analisis perbandingan pengaruh variasi desain sambungan pelat simpul pada struktur RBKK terbukti berpengaruh terhadap kapasitas disipasi energi. Spesimen 1 dan 2 memberikan kapasitas *base shear* maksimum yang hampir sama dan mampu mempertahankan disipasi energi yang stabil hingga siklus ke-20, sedangkan spesimen 3 memiliki kapasitas *base shear* maksimum yang lebih tinggi namun mengalami penurunan kekuatan lebih cepat setelah mencapai siklus ke-19.
3. Dari hasil analisis perbandingan bentuk kurva histeresis terhadap variasi desain pelat simpul, setiap spesimen menunjukkan karakteristik yang berbeda. Spesimen 1 dan 2 menghasilkan kurva histeresis dengan bukaan relatif sedang namun cenderung stabil hingga siklus ke-19 yang menunjukkan ketahanan terhadap degradasi kekuatan. Sementara itu, spesimen 3 memiliki kurva histeresis dengan bukaan awal yang lebih besar, namun performanya menurun lebih cepat akibat degradasi kekuatan pada siklus ke-19.
4. Dari hasil identifikasi pola kerusakan dan mekanisme pembentukan sendi plastis bervariasi tergantung desain pelat simpul. Pada spesimen 1 mengalami fraktur sepenuhnya pada kedua bresing lantai 2 pada 2% *story drift*, hanya terjadi fraktur lokal pada bresing lantai 1 pada 2,5% *story drift*, dan terlihat jelas pada balok lantai

2 mengalami sendi plastis 2,5% *story drift*. Spesimen 2 mengalami fraktur sepenuhnya pada kedua bresing lantai 2 pada 2,5% *story drift*, hanya terjadi fraktur lokal pada salah satu bresing lantai 1 pada 2,5% *story drift*, dan terlihat jelas pada balok lantai 2 mengalami sendi plastis 2% *story drift*. Spesimen 3 mengalami fraktur sepenuhnya pada kedua bresing lantai 2 dan 1 bresing lantai 1 pada 2,5% *story drift*, hanya terjadi fraktur lokal menuju fraktur seutuhnya pada salah satu bresing lantai 1 pada 2,5% *story drift*, dan terlihat jelas pada balok lantai 2 mengalami sendi plastis 2,5% *story drift*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis pada ketiga spesimen RBKK dengan variasi pelat simpul, maka disarankan:

1. Pemilihan kekakuan sambungan untuk desain seismik
 - Spesimen 1 dan 2 direkomendasikan untuk diterapkan pada struktur tahan gempa karena memberikan keseimbangan optimal antara disipasi energi yang tinggi, namun harus diiringi dengan pengendalian deformasi balok untuk mencegah kerusakan lokal berlebih.
 - Spesimen 3 hanya disarankan jika prioritas desain pada bangunan dengan sistem arsitektur yang sensitif terhadap deformasi.
2. Rekomendasi penelitian lanjutan
 - Perlu dilakukan variasi geometri pelat simpul lainnya untuk melihat pengaruh terhadap interaksi bresing-balok;
 - Pengujian lebih lanjut pada model 3D dengan elemen *shell* atau *full-scale* uji laboratorium diperlukan untuk memvalidasi fenomena *chevron effect* secara lebih akurat;
 - Perpanjangan siklus pembebanan hingga mencapai 4% dari tinggi struktur untuk melihat perilaku struktur ketika bresing sudah tidak bekerja;
 - Pengujian dengan melakukan simulasi menggunakan *time history analysis* untuk melihat performa RBKK dalam kondisi beban siklik tak teratur;
 - Mengkaji kemungkinan perbaikan setelah gempa pada RBKK dengan variasi pelat simpul, sehingga dapat memberikan rekomendasi desain untuk perencanaan tahan gempa berulang (*low-damage design*).

DAFTAR PUSTAKA

- Bruneau, M., Uang, C.-M., & Sabelli, R. (2011). *Ductile design of steel structures* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Pearson Education.
- Federal Emergency Management Agency. (2007). *Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components* (FEMA 461). U.S. Department of Homeland Security. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_461.pdf
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Seismic provisions for structural steel buildings* (ANSI/AISC 341-16). <https://www.aisc.org>
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for structural buildings* (ANSI/AISC 360-16). <https://www.aisc.org>
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Prequalified connections for special and intermediate moment frames* (ANSI/AISC 358-16). <https://www.aisc.org>
- Munteanu, R. I., Calofir, V., Lemnaru, K.-C., & Ponta, C. (2025). *Advance investigation into active control force requirements for seismic damage mitigation of inelastic structures. Buildings*, 15(9), 1402. <https://doi.org/10.3390/buildings15091402>
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *Hazards*. U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/hazards>
- Roeder, C. W., Sen, A. D., Asada, H., Ibarra, S. M., & Lehman, D. E. (2020). *Inelastic Behavior and Seismic Design of Multistory Chevron-Braced Frames with Yielding Beams*. Marquette University.
- Dehghan, S. M., Najafgholipour, M. A., & Hooshangi, H. (2020). *Seismic Behavior of Chevron Centrally Braced Frames with Weak Beams*. Sharif University of Technology.
- Asada, H., Sen, A. D., Li, T., Berman, J. W., & Lehman, D. E. (2020, December). *Seismic performance of chevron-configured special concentrically braced frames with yielding beams*. Marquette University.
- Wang, K., Chen, Q., Chen, Y., Wu, J., & Qian, J. (2021). *Numerical simulation of seismic performance of concentric braced frame (CBF) with different bracing configurations. Applied Sciences*, 11(13), 6094. <https://doi.org/10.3390/app11136094>

- Erath, A., Lestuzzi, P., & Chatzi, E. (2022). *Experimental investigation and seismic performance assessment of concentrically braced frames with innovative energy-dissipative devices*. *Buildings*, 12(12), 1656. <https://doi.org/10.3390/buildings12121656>
- Palmer, K. D., Roeder, C.W., Lehman, D. E., Okazaki, & T., Shield, (2013) *Experimental Performance of Steel Braced Frames Subjected to Bidirectional Loading*. *Journal of Structural Engineering*, 139(8), 1274-1284. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000624)
- Chen, C.-H., Lai, J.-W., & Mahin, S. A.(2008). *Seismic Performance Assessment of Concentrically Braced Steel Frame Buildings*. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, Beijing, China.
- Huang, Y., & Mahin S. A.(2010). *Simulating the Inelastic Seismic Behavior of Steel Braced Frames Including the Effects of Low-Cycle Fatigue*. *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Report 2010/104*. University of California, Berkeley.
- Uriz, P. & Mahin, S. A. (2004). *Seismic Performance Assessment of Concentrically Braced Steel Frames*. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, August 1-6, Vancouver, Canada.
- Sen, A. D., Roeder, C. W., Berman, J. W., Lehman, D. E., Tsai, K. C., Li, C. H., & Wu, A. C.(2017). *Seismic Performance of Chevron Braced Frames with Yielding Beams*. *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE)*, January 9-13, Santiago, Chile.
- Simpson, B. G., Mahin, S. A., & Lai, J. W. (2017). *Experimental Investigation of the Behavior of Vintage and Retrofit Concentrically Braced Steel Frames Under Cyclic Loading*. *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Report 2017/12*. University of California, Berkeley.
- Rongqian, Y., Xuejun, Z. (2020). *Experimental Study on the Seismic Behavior of Concentrically Braced Steel Frames with Extended End-Plate Bolted Connections*. *Science Progress*, 103(3), 1-21.