

TUGAS AKHIR

ANALISIS TIPE-TIPE BALOK RBS PADA STRUKTUR SRPMK TERHADAP DISIPASI ENERGI PADA GEDUNG DI KOTA MATARAM (STUDI LITERATUR)

*Diajukan Untuk Memenuhi Tugas – Tugas dan
Syarat – Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun oleh :

RAFLI AKBARI

2007210052



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026**

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Rafli Akbari
Npm : 2007210052
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Analisis Tipe – Tipe Balok RBS Pada Struktur SRPMK
Terhadap Disipasi Energi Pada Gedung Di Kota Mataram
Bidang Ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Disetujui Untuk Disampaikan
Kepada Panitia Ujian:

Medan, 18 April 2026
Dosen Pembimbing


Ir. Tondi Amirsyah Putera, S.T., M.T

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Rafli Akbari
Npm : 2007210052
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Analisis Tipe – Tipe Balok RBS Pada Struktur SRPMK Terhadap Disipasi Energi Pada Gedung Di Kota Mataram
Bidang Ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 18 April 2026
Mengetahui dan Menyetujui
Dosen Pembimbing


Ir. Tondi Amirsyah Putera, S.T., M.T

Dosen Pembanding I

Dosen Pembanding II


Ir. Ade Faisal, S.T., MSc, Ph.D


Fahrizal Zulkarnain, S.T., M.Sc., Ph.D

Ketua Program Studi Teknik Sipil


Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rafli Akbari
Tempat/Tanggal Lahir : Tanjung Morawa, 08 April 2001
Npm : 2007210052
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil
Bidang Ilmu : Struktur

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa Laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Analisis Tipe – Tipe Balok RBS Pada Struktur SRPMK Terhadap Disipasi Energi Pada Gedung Di Kota Mataram.”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan nonmaterial serta segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan Verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan atau keserjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 18 April 2026

Saya yang menyatakan,



Rafli Akbari

ABSTRAK

ANALISIS TIPE-TIPE BALOK RBS PADA STRUKTUR SRPMK TERHADAP DISIPASI ENERGI PADA GEDUNG DI KOTA MATARAM (STUDI LITERATUR)

Rafli Akbari
2007210052

Ir. Tondi Amirsyah Putera. S.T., M.T

Gempa Northridge tahun 1994 dan Kobe tahun 1995 menyebabkan kerusakan pada sambungan balok–kolom struktur baja, khususnya pada sistem rangka pemikul momen. Indonesia merupakan negara yang berada pada wilayah rawan gempa, termasuk Kota Mataram yang memiliki potensi risiko gempa bumi sehingga perencanaan struktur tahan gempa menjadi sangat penting. Oleh karena itu, dikembangkan metode Reduced Beam Section (RBS) untuk meningkatkan daktilitas dan disipasi energi dengan mengurangi penampang balok agar plastisitas terjadi pada balok dan bukan pada sambungan balok–kolom. Reduced Beam Section (RBS) memiliki beberapa jenis varian potongan, diantaranya radius cut dan straight cut. Hasil perhitungan perilaku perpindahan, tegangan von Mises, regangan plastis, dan disipasi energi untuk varian RBS tersebut akan dibandingkan antara satu dan yang lain. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku tipe RBS radius cut dan straight cut pada struktur Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) akibat pembebanan siklik. Profil yang digunakan adalah balok WF 400 × 200 × 8 × 13 dan kolom H-BEAM 458 × 417 × 30 × 50 dengan dimensi RBS yang sama, yaitu $a = 150$ mm, $b = 340$ mm, dan $c = 45$ mm, sehingga perbedaan hanya pada tipe potongan. Analisis dilakukan menggunakan metode Finite Element Method (FEM) dengan bantuan perangkat lunak berbasis elemen hingga mikro dengan mempertimbangkan material nonlinier. Pembebanan siklik diberikan dalam bentuk displacement control pada ujung balok untuk memperoleh kurva histeresis dan disipasi energi. Berdasarkan hasil analisis, RBS tipe straight cut menghasilkan perpindahan maksimum sebesar 8,397 mm dan disipasi energi sebesar 71.408.266,60 N·mm, sedangkan RBS radius cut menghasilkan perpindahan sebesar 8,459 mm dan disipasi energi sebesar 62.232.911,69 N·mm. Distribusi regangan maksimum pada straight cut sebesar 15,18 dan radius cut sebesar 13,57, sedangkan tegangan maksimum pada radius cut sebesar 230 MPa dan straight cut sebesar 225 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa straight cut lebih unggul dalam disipasi energi dan kontrol deformasi, sedangkan RBS tipe radius cut lebih baik dalam hal kestabilan perilaku plastis struktur.

Kata kunci: balok–kolom, Reduced Beam Section, SRPMK, disipasi energi, FEM.

ABSTRACT

ANALYSIS OF RBS BEAM TYPES IN SRPMK STRUCTURES ON ENERGY DISSIPATION IN BUILDINGS IN MATARAM CITY

(LITERATURE STUDY)

Rafli Akbari

2007210052

Ir. Tondi Amirsyah Putera. S.T., M.T

The 1994 Northridge earthquake and the 1995 Kobe earthquake caused significant damage to beam–column connections in steel structures, particularly in moment-resisting frame systems. Indonesia is located in a seismically active region, including the city of Mataram, which has a high potential risk of earthquakes; therefore, earthquake-resistant structural design is essential. To address this, the Reduced Beam Section (RBS) method was developed to improve ductility and energy dissipation by reducing the beam cross-section, ensuring that plasticity occurs in the beam rather than at the beam–column connection. The Reduced Beam Section (RBS) has several cut variations, including radius cut and straight cut. The results of displacement behavior, von Mises stress, plastic strain, and energy dissipation for these RBS variations are compared with one another. This study aims to analyze the behavior of radius cut and straight cut RBS types in Special Moment Resisting Frame (SMRF) structures under cyclic loading. The profiles used are WF 400 × 200 × 8 × 13 beams and H-BEAM 458 × 417 × 30 × 50 columns, with identical RBS dimensions of $a = 150$ mm, $b = 340$ mm, and $c = 45$ mm, so that the only difference lies in the cut type. The analysis was carried out using the Finite Element Method (FEM) with the aid of finite element-based software, considering material nonlinearity. Cyclic loading was applied in the form of displacement control at the beam end to obtain hysteresis curves and energy dissipation. Based on the analysis results, the straight cut RBS model produced a maximum displacement of 8.397 mm and an energy dissipation of 71,408,266.60 N·mm, while the radius cut RBS model produced a displacement of 8.459 mm and an energy dissipation of 62,232,911.69 N·mm. The maximum strain distribution for the straight cut was 15.18%, while for the radius cut it was 13.57%, whereas the maximum stress reached 230 MPa for the radius cut and 225 MPa for the straight cut. These results indicate that the straight cut performs better in terms of energy dissipation and deformation control, while the radius cut exhibits better stability in plastic behavior of the structure.

Keywords: beam–column, Reduced Beam Section, SMRF, energy dissipation, FEM.

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisis Tipe – Tipe Balok RBS Pada Struktur SRPMK Terhadap Disipasi Energi Pada Gedung Di Kota Mataram” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terima kasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Ir. Tondi Amirsyah Putera, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Ade Faisal, S.T., MSc, Ph.D selaku Dosen Pembanding I Sekaligus Sebagai Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Fahrizal Zulkarnain, S.T., M.Sc., Ph.D Selaku Dosen Pembanding II yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil.
5. Ibu Rizky Efrida, S.T., M.T selaku sekretaris Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu ketekniksipilan kepada penulis.

7. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Dengan penuh rasa hormat dan kasih, penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua tercinta, Ayahanda Sugino dan Ibunda Siti Aisah yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan tanpa henti, serta menjadi sumber kekuatan terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Penulis mengucapkan terima kasih kepada kakak dan abang tercinta atas doa, dukungan, serta motivasi yang diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Penulis mengucapkan terima kasih kepada teman-teman seperjuangan yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta semangat dalam proses penyusunan tugas akhir ini.

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi teknik sipil.

Medan, 08 April 2026

Rafli Akbari

NPM: 2007210052

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR NOTASI	xvi
DAFTAR SINGKATAN	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Dasar Teori	4
2.2 Sambungan	4
2.2.1 Seismic Design of Steel Special Moment Frames	5
2.2.2 Cyclic Testing of Bolted Flange Plate Steel Moment Connections for Special Moment Frames	6
2.2.3 Steel non-orthogonal reduced beam section moment Connections — a case study	7
2.3 Studi hasil penelitian sebelumnya	9
2.3.1 Development of seismic guidelines for deep-column steel moment connections	9
	viii

2.3.2	Performance based analysis of RBS steel frames	10
2.4	Konsep perencanaan struktur tahan gempa	12
2.4.1	Gempa rencana	12
2.4.2	Arah pembebanan gempa	12
2.4.3	Wilayah gempa	12
2.5	Kriteria desain perencanaan struktur gedung tahan gempa	12
2.5.1	Kategori desain seismik	12
2.5.2	Kriteria struktur gedung	13
2.5.3	Faktor keamanan (I_e) dan kategori resiko struktur bangunan	14
2.5.4	Faktor reduksi gempa (R)	17
2.5.5	Klasifikasi situs	17
2.5.6	Koefisien situs	17
2.5.7	Penentuan respons spektrum	18
2.5.8	Analisis gaya lateral ekuivalen	20
2.5.9	Periode alami fundamental	21
2.5.10	Analisis respons dinamik	23
2.5.11	Simpangan antar lantai	23
2.5.12	Beban dan kombinasi pembebanan	24
2.5.13	Soft storey	24
2.5.14	Kekakuan struktur	24
2.5.15	Kriteria desain struktur	25
2.6	Perencanaan sambungan	25
2.6.1	Sambungan momen	25
2.7	Sambungan balok-kolom baja	26
2.7.1	Sambungan las	26
2.7.2	Sambungan baut	26
2.7.3	Analisa plastisitas baja	26
2.7.4	Tegangan	26
2.7.5	Regangan	27
2.7.6	Kurva tegangan regangan	28
2.7.7	Beban siklik	30

2.7.8	Analisis kurva histeris	30
2.7.9	Struktur Baja Tahan Gempa	31
2.7.10	Konsep Reduced Beam Section	31
2.8	Pedoman Pemodelan dari FEMA	31
2.8.1	FEMA 350	31
2.8.2	FEMA 356 dan FEMA 440	32
2.9	Pemodelan Sambungan RBS Balok-Kolom	32
2.9.1	Elemen Struktur	32
2.9.2	Plastis Hinge	32
2.9.3	Penempatan Hinge	33
2.10	Disipasi Energi	33
2.10.1	Pengertian Disipasi Energi	33
2.10.2	Teori Menghitung Disipasi Energi dan Hubungan dengan Kurva Histeresis	33
2.10.3	Rumus Perhitungan	33
2.11	Kerangka Pemikiran	34
2.12	Hipotesis Penelitian	35
BAB III	METODOLOGI	36
3.1	Umum	36
3.2	Respons Spektrum Desain Gempa	39
3.2.1	Desain Respons Spektrum Mataram (Tanah Sedang)	39
3.3	Pemodelan Struktur	40
3.3.1	Data Perencanaan Struktur	40
3.3.2	Konfigurasi Bangunan	40
3.3.3	Dimensi Kolom-Balok	41
3.4	Analisis Struktur	42
3.4.1	Analisis Dinamik Struktur Linier	42
3.4.2	Pembebanan	42
3.4.3	Analisis respons spektrum	43
3.4.4	Simpangan antar tingkat	43
3.4.5	Pengaruh $p-\delta$	44
3.5	Variabel Penelitian	44

3.6	Tahapan Pemodelan Menggunakan Elemen Hingga (FEM)	46
3.6.1	Dimensi Penampang Balok dan Kolom	47
3.6.2	Variabel Penelitian Sambungan RBS	50
3.6.3	Tujuan Perbandingan Radius Cut dan Straight Cut	51
3.6.4	Pemodelan dan Analisis Sambungan RBS Menggunakan Perangkat Lunak Berbasis Elemen Hingga Mikro	52
3.6.5	Jenis Analisis pada Elemen Hingga Mikro	52
3.6.6	Pemodelan Geometri Sambungan	52
3.6.7	Definisi Parameter Material pada Pemodelan Elemen Hingga Mikro	53
3.6.8	Perilaku Tegangan–Regangan Baja	59
3.6.9	Tahap Assembly Model Sambungan RBS	60
3.6.10	Tahap Meshing Model Sambungan RBS	61
3.6.11	Boundary Condition dan Kontak	63
3.6.12	Pembebanan Siklik	63
BAB IV	PEMBAHASAN	65
4.1	Umum	65
4.2	Distribusi Perpindahan	66
4.2.1	Perpindahan Sambungan RBS Tipe Radius Cut	67
4.2.2	Perpindahan Sambungan RBS Tipe Straight Cut	68
4.2.3	Perbandingan Perpindahan RBS Radius Cut dan RBS Straight Cut	68
4.3	Distribusi Tegangan von Mises	70
4.3.1	Distribusi Tegangan Von Mises Model RBS Radius Cut	70
4.3.2	Distribusi Tegangan Von Mises Model RBS Straight Cut	72
4.3.3	Perbandingan Distribusi Tegangan Von Mises Kedua Model	73
4.4	Distribusi Regangan Plastis	74
4.4.1	Distribusi Regangan Plastis pada RBS Radius Cut	76
4.4.2	Distribusi Regangan Plastis pada RBS Straight Cut	76
4.4.3	Perbandingan PEEQ antara Radius Cut dan Straight Cut	78

4.4.4	Evaluasi Potensi Kerusakan dan Mekanisme Keruntuhan Berdasarkan Regangan Plastis Ekuivalen (PEEQ)	78
4.5	Disipasi Energi Sambungan	79
4.5.1	Hasil Disipasi Energi	81
4.6	Kurva Histeresis Sambungan RBS	81
4.6.1	Kurva Histeresis Model RBS Radius Cut	82
4.6.2	Kurva Histeresis Model RBS Straight Cut	83
4.6.3	Perbandingan Kurva Histeresis RBS Radius Cut dan RBS Straight Cut	84
4.6.4	Pembahasan Umum Perilaku Siklik	85
4.7	Pengaruh Bentuk RBS terhadap Kinerja Sambungan	85
4.8	Evaluasi Umur Struktur Berdasarkan Pembebanan Siklik	85
4.9	Evaluasi terhadap Ketentuan FEMA dan AISC	86
4.10	Penentuan Model Terbaik Terhadap Pembebanan Siklik	87
4.11	Kesimpulan	88
BAB V	KESIMPULAN	91
5.1	Kesimpulan	91
5.2	Saran	92
	DAFTAR PUSTAKA	94
	LAMPIRAN	96
	DAFTAR RIWAYAT HIDUP	

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Kategori desain sesismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek	13
Tabel 2. 2	Kategori desain sesimik berdasarkan parameter respons percepatan periode 1 detik	13
Tabel 2. 3	Kategori resiko bangunan gedung dan struktur lainnya untuk beban gempa	14
Tabel 2. 4	Faktor keutamaan (I_e)	16
Tabel 2. 5	Faktor koefisien modifikasi respons, faktor kuat lebih sistem, faktor pembesaran defleksi, dan batasan tinggi sistem struktur	17
Tabel 2. 6	Koefisien situs F_a	18
Tabel 2. 7	Koefisien situs F_v	18
Tabel 2. 8	Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x	22
Tabel 2. 9	koefisien untuk batas atas pada periode	23
Tabel 2. 10	Kurva backbone momen-rotasi	32
Tabel 3. 1	Dimensi Kolom-Balok	42
Tabel 3. 2	Berat material konstruksi	42
Tabel 3. 3	Beban hidup pada lantai dan atap struktur	43
Tabel 3. 4	Simpangan antar tingkat	43
Tabel 3. 5	Tabel pengaruh $p\delta$	44
Tabel 3. 6	Material elastis	54
Tabel 3. 7	Material Plastis Bilinear	55
Tabel 3. 8	Material Kinematic hardening	56
Tabel 3. 9	Material Massa Jenis (Density)	57
Tabel 3. 10	Parameter Material Baja	59
Tabel 4. 1	Tegangan Von Mises Model RBS Radius Cut	71
Tabel 4. 2	Tegangan Von Mises Model RBS Straight Cut	73
Tabel 4. 3	Perbandingan Perilaku Plastis	77
Tabel 4. 4	Nilai Energi Total Disipasi Energi	81
Tabel 4. 5	Hasil perbandingan gaya-gaya dalam tiap varian RBS	88
Tabel L. 1	Dimensi Balok	96
Tabel L. 2	Dimensi Kolom	96
Tabel L. 3	Properti Material	97
Tabel L. 4	Properti Material Damage Initiation	97
Tabel L. 5	Properti Material Damage Evolution	98
Tabel L. 6	Data Mesh	98
Tabel L. 7	Riwayat pembebanan siklik dan Drift Ratio	98
Tabel L. 8	Energi Total Disipasi Energi	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Sambungan RBS	4
Gambar 2. 2	Mekanisme portal satu tingkat, juga disebut mekanisme tingkat lemah “ <i>weak story mechanism</i> ”	5
Gambar 2. 3	Mekanisme perpindahan yang ideal “ <i>strong column weak beam</i> ”	5
Gambar 2. 4	Tiga macam spesimen yang digunakan sato	7
Gambar 2. 5.	Kurva hubungan momen dan story drift	8
Gambar 2. 6	kurva hubungan momen dan <i>story drift</i>	9
Gambar 2. 7	pemodelan untuk kolom interior	10
Gambar 2. 8	Mekanisme runtuh untuk 6 tingkat 2 bentang	10
Gambar 2. 9	Mekanisme runtuh untuk 6 tingkat 3 bentang	11
Gambar 2. 10	<i>Story drift in percentage</i> untuk frame dua bentang	11
Gambar 2. 11	<i>Story drift in percentage</i> untuk frame tiga bentang	11
Gambar 2. 12	Bentuk tipikal spektrum respons desain dipermukaan tanah	19
Gambar 2. 13	Penentuan simpangan antar lantai	23
Gambar 2. 14	Kurva momen – rotasi ($M - \theta$)	25
Gambar 2. 15	Kurva <i>true stress</i> dan <i>true strain</i>	28
Gambar 2. 16	Jenis kurva stress and strain. (a) <i>perfectly elastic</i> ,(b) <i>Rigid perfectly plastic</i> (c) <i>elastic, perfectly plastic</i> (d) <i>Rigid, linearly strain hardening</i> (e) <i>elastic, linearly stain hardening</i>)	29
Gambar 2. 17	Gambar beban siklik	30
Gambar 2. 18	<i>histeresis loop</i>	31
Gambar 3. 1	Diagram alir penelitian	36
Gambar 3. 2	Respons spektrum desain	39
Gambar 3. 3	: a) Denah struktur Model , b) Proyeksi bangunan Model , c) Bentuk tipikal struktur portal tanpa dinding geser (SRPMK).	41
Gambar 3. 4	Diagram Alir Analisis	46
Gambar 3. 5	Sambungan balok-Kolom benda uji	47
Gambar 3. 6	: a) Dimensi Kolom, b) Dimensi Balok , c) Dimensi Stiffner.	50
Gambar 3. 7	RBS Radius Cut	50
Gambar 3. 8	RBS Straight Cut	51
Gambar 3. 9	Grafik Plastic Bilinear	55
Gambar 3. 10	Assembly RBS Radius Cut	60
Gambar 3. 11	Assembly RBS Straight Cut	61
Gambar 3. 12	Mesh Radius Cut	62
Gambar 3. 13	Mesh Straight Cut	63
Gambar 3. 14	Pembebanan Displacement Siklik Radius Cut	64
Gambar 3. 15	Pembebanan Displacement Siklik Straight Cut	64
Gambar 4.1	Distribusi Perpindahan (U, U-2) Sambungan RBS Tipe Radius Cut	67
Gambar 4.2	Distribusi Perpindahan (U, U-3) Sambungan RBS Tipe Straight Cut	68
Gambar 4.3	Distribusi Tegangan Von Mises (S, von mises) Sambungan RBS Tipe Radius Cut	71
Gambar 4.4	Distribusi Tegangan von mises (S, von mises) Sambungan RBS Tipe Straight Cut	72
Gambar 4.5	Distribusi Regangan Plastis (PEEQ) Sambungan RBS Tipe Radius Cut	76
Gambar 4.6	Distribusi Regangan Plastis (PEEQ) Sambungan RBS Tipe Straight Cut	77
Gambar 4.7	kurva histeresis Radius Cut	82
Gambar 4.8	kurva histeresis Straight Cut	83

Gambar L. 1	Geometri balok dan kolom	96
Gambar L. 2	Detail RBS radius cut	97
Gambar L. 3	Detail RBS straight cut	97
Gambar L. 4	Pembebanan Displacement Siklik Radius Cut	98
Gambar L. 5	Pembebanan Displacement Siklik Straight Cut	99
Gambar L. 6	kurva histeresis Radius Cut	99
Gambar L. 7	kurva histeresis Straight Cut	99

DAFTAR NOTASI

SDS	=	Respons spektrum percepatan respons desain untuk periode pendek
SDI	=	Respons spektrum percepatan desain untuk periode 1,0 detik
T_a minimum	=	Nilai batas bawah periode bangunan
T_a maksimum	=	Nilai batas atas periode bangunan
V_t	=	Gaya geser dasar nominal yang didapat dari hasil analisis ragam spektrum respons yang telah dilakukan
V_1	=	Gaya geser dasar prosedur gaya lateral statik ekuivalen
θ_y	=	Rotasi pada saat leleh
ϵ	=	Total tegangan yang terjadi
ϵ_y	=	Tegangan pada saat leleh
μ_p	=	Lendutan pada titik plastis
μ_y	=	Lendutan pada titik leleh
ϕ_m	=	Lengkungan maksimum yang akan timbul
ϕ_y	=	Lengkungan pada saat leleh
θ_u	=	Rotasi pada batas ultimit
θ_y	=	Rotasi pada batas leleh
γ_y	=	Koefisien rotasi <i>post-capping</i>
θ_p	=	Koefisien rotasi plastis
θ_p	=	Koefisien rotasi plastis
Ω_0	=	Faktor pembesaran defleksi
P	=	Faktor redudansi
R	=	Faktor koefisien modifikasi respon
S_S	=	Nilai parameter respons spektrum percepatan gempa periode pendek 0,2 detik di batuan dasar (SB) m
S_I	=	Nilai parameter respons spektrum percepatan gempa periode 1,0 detik di batuan dasar (SB)
C_d	=	Faktor kuat lebih system
DL	=	Beban mati, termasuk SIDL
E	=	Modulus elastisitas
E_x	=	Beban gempa arah x
E_y	=	Beban gempa arah y

F	=	Frekuensi Struktur
F _a	=	Koefisien periode pendek
F _v	=	Koefisien periode 1,0 detik
FPGA	=	Nilai koefisien situs untuk PGA
H _n	=	Ketinggian struktur dalam m di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur (meter)
I	=	Momen Inersia kolom/balok
I _e	=	Faktor keutamaan gempa
Ω	=	Kecepatan sudut
K	=	Kekakuan struktur
L	=	Panjang kolom/balok
LL	=	Beban hidup
PGA	=	Nilai PGA dibatuan dasar
T	=	Periode getar fundamental struktur
C _s	=	Koefisien respons seismik yang ditentukan
W _t	=	Berat total gedung
R	=	Faktor modifikasi respons
I	=	Faktor keutamaan hunian yang ditentukan
T	=	Periode struktur dasar (detik)
H	=	Tinggi tingkat (cm)
J	=	Inersia kolom (m ⁴)
K	=	Kekakuan tingkat (kg/cm)
σ _{eng}	=	Engineering stress (Mpa)
A ₀	=	Luas permukaan awal (mm ²)
σ	=	<i>True stress</i> (Mpa)
F	=	Gaya (N)
A	=	Luas permukaan sebenarnya (mm ²)
E _{eng}	=	<i>Engineering strain</i>
Δl	=	Perubahan panjang

L_0	=	Panjang mula – mula
L	=	Panjang setelah diberi gaya
E	=	<i>True strain</i>
K	=	<i>strenght coefficient</i>
N	=	<i>Hardening exponent</i>
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	=	<i>principle stresses</i>
σ_f	=	<i>Flow stress</i>
E	=	energi yang diserap per satuan volume (J/m^3)
B	=	kerapatan fluks magnetik(T)
H	=	kekuatan medan magnet (A/m)
\int	=	Simbol integral, yang berarti penjumlahan dari area kecil – kecil di bawah kurva
F	=	gaya lateral (N atau kN)
Δ	=	perpindahan lateral (mm atau m)
\oint	=	integral tertutup, menggambarkan luas area dalam kurva histeresis
M	=	momen lentur (Nm atau kNm)
θ	=	rotasi (rad)
$E_{d,i}$	=	energi disipasi pada siklus ke-ii
N	=	jumlah siklus
E	=	total energi disipasi kumulatif
F_{max}	=	gaya maksimum tercapai
Δ_{max}	=	perpindahan maksimum
E	=	regangan total
ϵ_p	=	regangan plastis
Δ	=	rasio drift
Δ	=	perpindahan maksimum (mm)
L	=	panjang balok (mm)
σ_{vm}	=	tegangan von Mises

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	=	tegangan utama
ε_{peq}	=	regangan plastis ekuivalen
ε_{ij}^p	=	komponen regangan plastis
ε_y	=	regangan leleh baja
Σ	=	Tegangan
E	=	energi disipasi dalam satu siklus pembebanan (kN·mm)
Δ	=	perpindahan lateral (mm)
E_{total}	=	energi disipasi total
E_{siklus}	=	energi pada masing-masing siklus

DAFTAR SINGKATAN

CQC	=	Complete Quadratic Combination
PEER	=	Pacific Earthquake Engineering Research
SRPMK	=	Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus
SMRF	=	sistem rangka pemikul momen/steel moment resisting frame
FEM	=	Finite Element Method
RBS	=	Reduced Beam Section
PGA	=	Peak ground acceleration

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Elemen struktural adalah bagian bangunan yang menjadikan struktur tetap kokoh dan stabil dalam mendukung beban. Terganggunya fungsi salah satu elemen dapat mempengaruhi perilaku struktur secara keseluruhan. Termasuk elemen struktural adalah kolom, balok, pondasi, rangka atap, dan dinding geser.(Ariani dkk., 2023.)

Setelah gempa bumi northridge tahun 1994 dan kobe tahun 1995, sambungan penahan momen dengan penampang balok tereduksi (RBS) adalah salah satu sambungan baja kaku yang paling ekonomis dan efektif. Meskipun kinerja sambungan RBS telah dipelajari secara menyeluruh, kondisi miring belum terjadi pada sambungan ini. Studi ini menyelidiki kinerja sambungan dogbone terhadap seismik dari berbagai sudut. Untuk mensimulasikan sampel, perangkat lunak komersial digunakan. sambungan RBS biasa digunakan untuk mengurangi bagian plastis dari sambungan balok, seperti kolom atau muka kolom. Ini dicapai dengan menghilangkan atau mengurangi lebar flens pada area sendi plastis, sehingga sendi plastis yang seharusnya berada pada sambungan atau muka kolom akan ditransfer ke area flens yang telah dihilangkan atau dikurangi terbuka (Imanpour, 2008). Selain itu, beberapa percobaan menunjukkan tingkat daktilitas yang cukup memuaskan dengan sambungan beam yang dikurangi (RBS) (Chen 1996; plimier 1997; zekioglu et al. 1997; Engehardt et al. 1998 dalam lee dan kim 2007) Beberapa desainsambungan RBS memerlukan penelitian tambahan (Jones et al. 2002; Gilton and lee 2002; chi and lee 2002 dalam lee dan kim 2007), meskipun jenis sambungan RBS ini telah digunakan berulang kali. Hasil dari analisis pushover statis yang tidak elastis.(Imanpour dkk., 2008)

Penelitian ini terbatas pada kolom sambungan balok, bukan struktur secara keseluruhan. Setiap sambungan akan menerima beban dan perletakan yang memiliki perilaku yang mirip dengan struktur utuh tetapi hanya menggunakan dua sambungan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana cara menggunakan pemodelan berbasis perangkat lunak FEM untuk memaksimalkan varian RBS untuk analisis
2. Standar dalam ketentuan sambungan balok-kolom banyak yang telah ditentukan seperti SNI, IBC, AISC, EUROCODE, FEMA
3. Bagaimana metode dan bentuk jenis sambungan RBS yang dipilih untuk menahan beban siklik

1.3 Batasan Masalah

1. Standar sambungan yang digunakan SNI 7972-2020
2. Pemodelan struktur akan dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak berbasis FEM
3. Pemodelan struktur utuh (portal/frame) tidak dilakukan sebaliknya, pemodelan analisis hanya dilakukan pada sambungan balok-kolom dengan menggunakan perangkat lunak untuk perhitungan dan analisis struktur.
4. Jenis sambungan hanya menggunakan sambungan las pada sambungan balok-kolom RBS potongan radius, potongan Straight

1.4 Tujuan

1. Untuk membandingkan antara tipe RBS terhadap kekakuannya dalam menahan beban siklik
2. Untuk mengetahui besarnya disipasi energi akibat beban siklik yang diberikan
3. Mengetahui varian RBS seperti potongan radius, potongan Straight yang optimal dalam menahan beban siklik

1.5 Manfaat Penelitian

1. Dapat memastikan terjadinya sendi plastis pada balok dan menghindari terjadinya pada balok kolom
2. Dengan penelitian ini dapat melakukan suatu eksperimen simulasi seperti di laboratorium dengan berbagai benda uji secara berkali-kali tanpa mengeluarkan biaya yang besar
3. Dapat dijadikan bahan referensi dalam analisa sambungan tipe balok RBS dengan sistem pelat pengaku pada balok dan kolom
4. Bagi peneliti sebagai ilmu pengetahuan, pengalaman dan menambah wawasan mengenai pengaruh penelitian tentang sambungan baja
5. Bagi rekan mahasiswa dapat dijadikan sebagai referensi tambahan dalam menyusun tugas akhir dan bahan kuliah yang berhubungan dengan baja

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran umum, maka penulisan tugas akhir ini dibagi dalam 5 (lima) bab. Pembagian ini dimaksudkan untuk mempermudah pembahasan serta pemahamannya, sehingga uraian yang disajikan dapat dengan mudah dipahami. Adapun pembagian tersebut adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, sistematika penulisan

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini terdiri dari tinjauan pustaka atau landasan teori yang digunakan untuk memberikan penjelasan mengenai studi penelitian ini dan menganalisis sambungan baja yang akan dibahas.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan langkah-langkah pemecahan masalah yang akan dibahas, meliputi persiapan pengumpulan data, dan teknik pengumpulan data

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang penyajian data serta proses tata cara menganalisis sambungan RBS dengan perangkat lunak berbasis elemen hingga mikro yang telah dipaparkan

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dan saran yang disusun berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai perilaku sambungan baja tipe balok RBS Potongan Radius Dan Potongan Straight. Kesimpulan yang disajikan merupakan rangkuman dari temuan penelitian, sedangkan saran ditujukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II

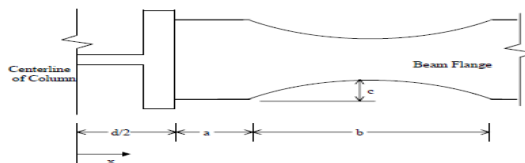
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

Dalam merencanakan suatu struktur bangunan diperlukan pemilihan material yang sesuai. Jenis material yang telah dikenal dalam konstruksi saat ini dan telah digunakan sejak lama adalah material baja. Kelebihan material baja tersebut adalah mempunyai kekuatan yang tinggi, keseragaman dan keawetan yang tinggi, sifat elastis, daktilitas baja cukup tinggi, kemudahan penyambungan antar elemen.

Sambungan RBS sendiri merupakan jenis sambungan yang telah diteliti selama beberapa tahun terakhir untuk mereduksi kegagalan yang terjadi pada sambungan balok – kolom dengan cara menambahkan cover plate maupun dengan memotong/mengurangi luasan flens pada balok di dekat sambungan balok – kolom (Jones dkk., 2000).

RBS menurut Jones, Fry, dan Engelhardt dalam paper WCEE ke 12 tahun 2000 bahwa RBS ditujukan untuk melindungi sambungan las SMRF/SRPM (*Steel Moment Resisting Frame/Sistem Rangka Pemikul Momen*) dengan memindahkan sendi plastis pada balok untuk menjauh dari muka kolom. Pada umumnya, sambungan las SRPM di desain dengan konsep *strong column – weak beam*, yang berarti segala ketidak stabilan pada rangka/portal diakibatkan oleh sendi plastis yang terjadi di balok dengan momen maksimum yang terjadi pada bagian sambungan balok-kolom saat pembebanan lateral/horizontal, sendi plastis akan terbentuk pada muka kolom, dimana pada bagian tersebut membutuhkan kualitas las dengan kualitas regangan yang tinggi. (Jones et al., 2000)



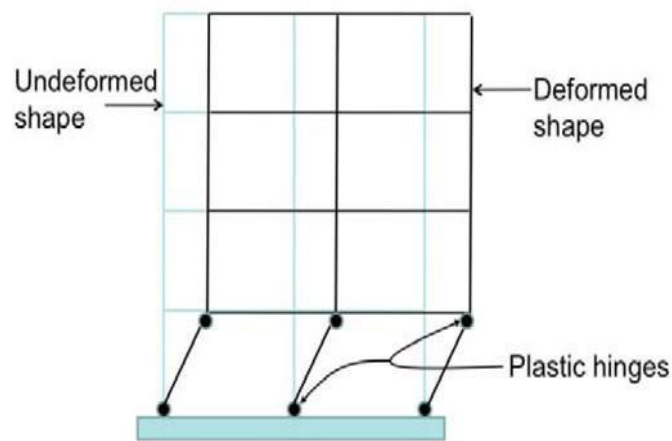
Gambar 2. 1 Sambungan RBS

2.2 Sambungan

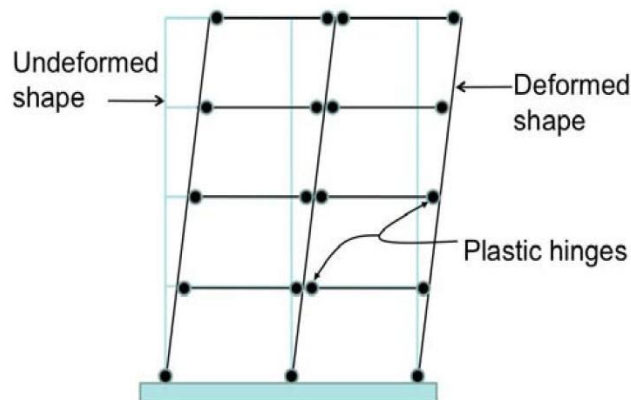
Struktur baja merupakan gabungan dari beberapa jenis profil dan pelat yang disatukan dengan penyambung. Hingga saat ini ada dua jenis sambungan yang kita kenal yaitu sambungan jenis las dan baut.

2.2.1 Seismic Design of Steel Special Moment Frames

Adan menyebutkan bahwa untuk menghindari ketidakstabilan P-delta pada struktur bangunan bertingkat, diharapkan tercapainya perpindahan yang seragam pada tiap lantainya. Untuk mencapai hal tersebut, sangatlah penting untuk menghindari mekanisme perpindahan satu tingkat dimana respons inelastis didominasi oleh mekanisme sendi plastis pada bagian atas dan bawah kolom pada satu tingkat saja (Gambar 2.2). Saat mekanisme satu tingkat terbentuk, kebanyakan bagian inelastis dari perpindahan struktur akan terjadi pada tingkat tersebut, yang menghasilkan efek P-delta pada lokasi tersebut. Untuk menghindari hal ini, peraturan disain bangunan dimaksudkan untuk membuat mekanisme perpindahan yang didominasi oleh sendi plastis yang terjadi pada balok, untuk menghindari sendi plastis yang terjadi pada kolom. Konsep ini juga disebut sebagai “*strong column weak beam design*” (Gambar 2.3).(Adan dkk., 2009)



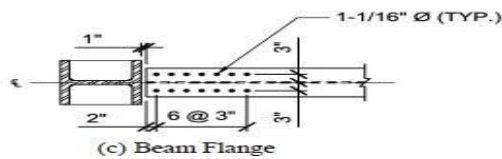
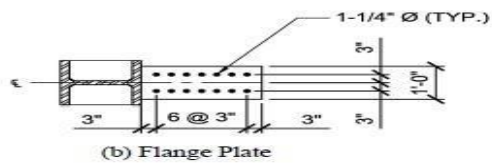
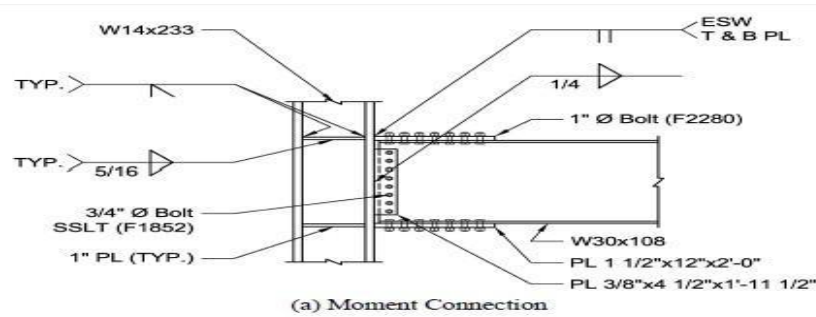
Gambar 2. 2 Mekanisme portal satu tingkat, juga disebut mekanisme tingkat lemah “*weak story mechanism*”
(Sumber: dkk., 2009)



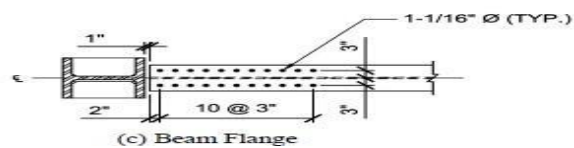
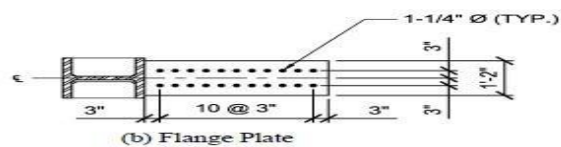
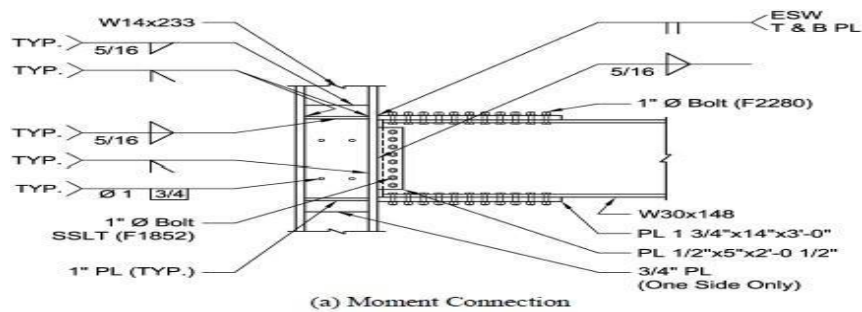
Gambar 2. 3 Mekanisme perpindahan yang ideal “*strong column weak beam*”
(Sumber: dkk., 2009)

2.2.2 Cyclic Testing of Bolted Flange Plate Steel Moment Connections for Special Moment Frames

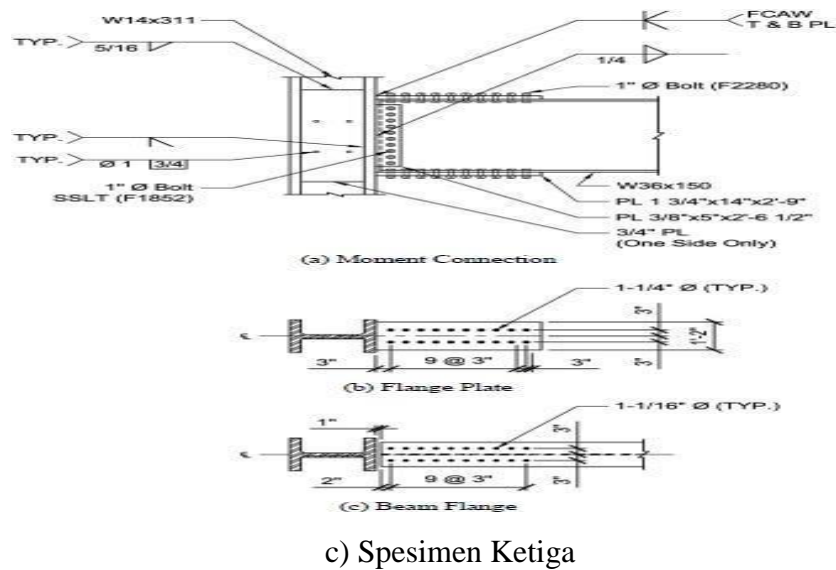
Dalam penelitiannya, Lee mencoba untuk menggunakan sambungan baut pada bagian flens (Gambar 2.4) sebagai salah satu jenis sambungan untuk sistem rangka pemikul momen/*steel moment resisting frame* (SMRF). Dia melakukan variasi pada daerah panel zone. (Sato dkk., 2007)



(a) Spesimen pertama



b) Spesimen Kedua



Gambar 2. 4 Tiga macam spesimen yang digunakan sato

(Sumber: Sato dkk., 2007)

Ketiga macam spesimen sudah memenuhi syarat dari AISC untuk sambungan balok – kolom. Spesimen mencapai sudut perpindahan sebesar 0,06 radian sebelum mengalami kegagalan, ketiga spesimen tersebut mengalami necking pada bagian beam flens pada bagian terluar dari susunan baut tersebut. Pada siklus pergerakan yang besar (5% - 6%) kolom mengalami puntir. Spesimen ini mengabaikan pelat lantai bangunan. (Sato et al., 2007)

2.2.3 Steel non-orthogonal reduced beam section moment Connections — a case study

Total empat buah spesimen dengan skala penuh dilakukan uji laboratorium untuk mengevaluasi performa dari sambungan non-orthogonal pada struktur baja yang telah diaplikasikan pada struktur Los Angeles International Airports.

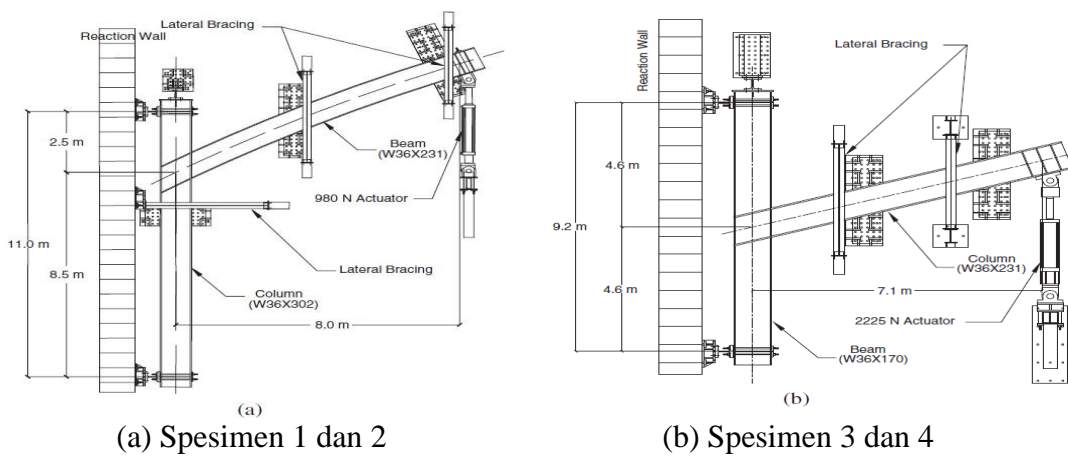
Total empat buah spesimen dengan skala penuh dilakukan uji laboratorium untuk mengevaluasi performa dari sambungan non-orthogonal pada struktur baja yang telah diaplikasikan pada struktur Los Angeles International Airports. Spesimen 1 dan 2 dilakukan simulasi untuk sambungan momen antara balok W36 x 231 terhadap kolom W36 x 302. Spesimen 3 dan 4 menggunakan balok W36 x 170 yang menempel pada ujung atas vertikal dari kolom W36 x 231. Sambungan momen RBS digunakan untuk semua spesimen. (Ball, 2011)

Untuk spesimen 1 dan 2, web balok mengalami tekuk lokal, dan LTB (*Lateral Torsional Buckling*) pada RBS akan dites. Flens atas balok menggunakan sambungan las dan mengalami retak pada drift 4% untuk spesimen 1 dan 5% untuk spesimen 2. Rekaman dari regangan mengindikasikan bahwa flens balok bagian atas dengan

sambungan las mengalami regangan lebih tinggi dibandingkan sambungan pada flens bagian bawah.

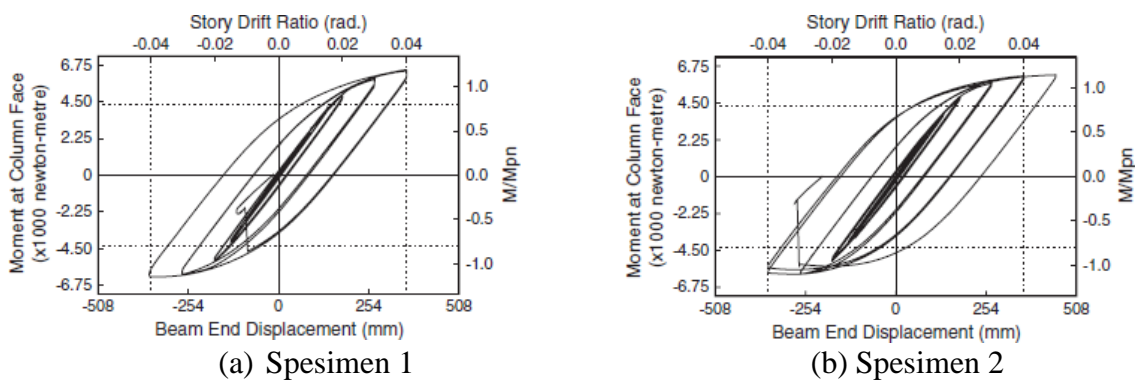
Untuk spesimen 3 dan 4 menunjukkan bahwa energi disipasi dilepaskan ke sepanjang balok, kolom, dan panel zone dalam bentuk pelelehan/yield dan tekuk/buckling.

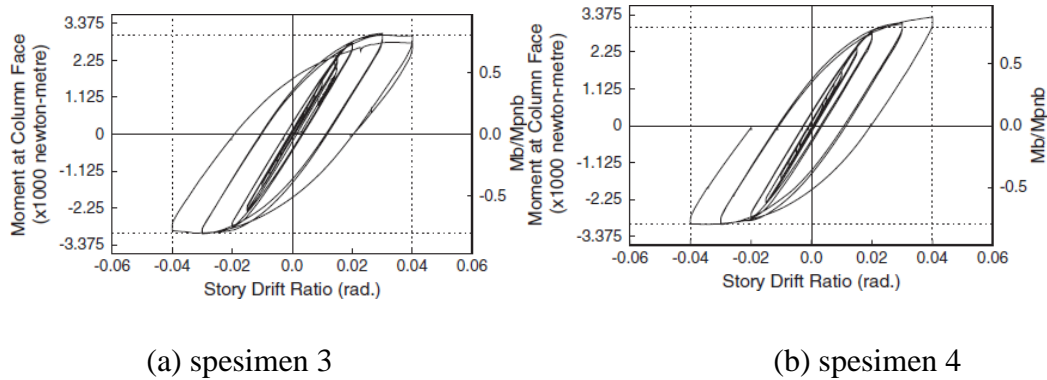
Kedua eksperimen tersebut mengalami LTB pada balok dan puntir pada kolom saat drift 4%. Hasil eksperimen tersebut merujuk pada potongan maksimum RBS pada ANSI/AISC 358 yang mengurangi lebar flens untuk menyediakan perilaku daktilitas yang lebih, dan harus betul – betul dipertimbangkan untuk posisi kolom dalam dan balok dengan ukuran besar.(Ball, 2011)



Gambar 2. 5. Kurva hubungan momen dan story drift

(Sumber: ball 2011)





Gambar 2. 6 kurva hubungan momen dan *story drift*

(Sumber: Ball, 2011)

2.3 Studi hasil penelitian sebelumnya

2.3.1 Development of seismic guidelines for deep-column steel moment connections

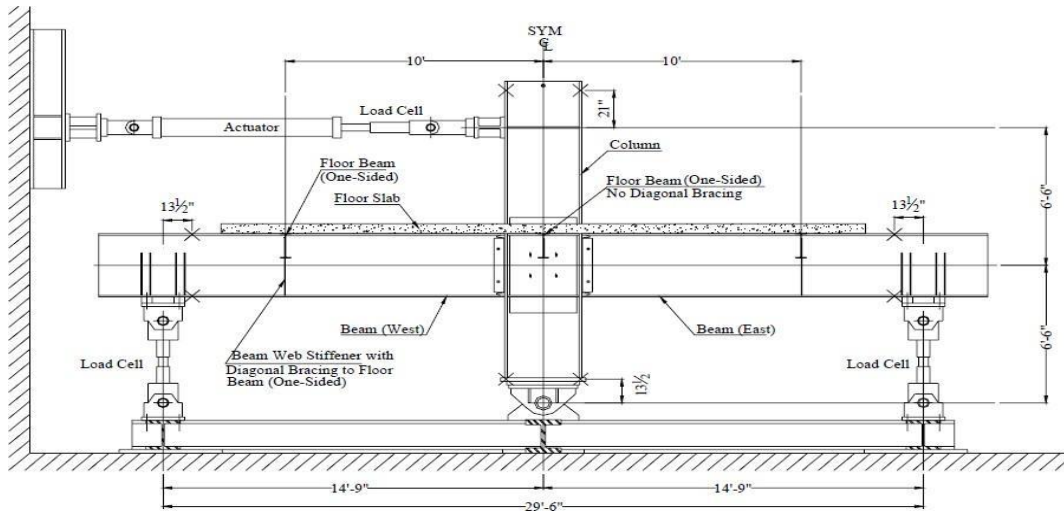
Dalam penelitiannya, Rickles mencoba untuk mencari tahu mengenai efek pelat lantai terhadap perilaku gempa pada sambungan momen bagian interior yaitu diantara dua buah WF. Penekanannya ada pada sambungan RBS karena kepopulerannya dan fakta bahwa banyak peneliti sebelumnya menganjurkan untuk melakukan investigasi lebih jauh terhadap perilaku gempa pada sambungan RBS ini.

Dalam percobaannya, Rickles memecahnya menjadi 3 bagian utama, yaitu :

1. Melakukan studi analisis dengan menggunakan FEM untuk evaluasi berbagai parameter pada perilaku sambungan. Perangkat lunak yang digunakan adalah ABAQUS.
2. Melakukan program percobaan dengan enam buah spesimen untuk mendapatkan efek dari parameter yang dicari pada performa sambungan dan mencari tahu seberapa jauh performa RBS terhadap gempa pada kolom dalam sesuai standar pada AISC
3. Menggunakan hasil dari analisis dan eksperimen untuk menilai kriteria desain yang ada dan membuat prosedur desain baru untuk sambungan momen pada kolom dalam jika dibutuhkan

Rickles menyebutkan bahwa hasil dari kedua metode baik itu FEM dan eksperimen mengindikasikan bahwa pada simpangan 4% untuk pergerakan pada bagian bawah balok dengan RBS disertai pelat lantai adalah kurang dari 20% dari lebar flens balok, dimana nilai tersebut digunakan pada prosedur desain saat ini untuk menentukan torsi yang terjadi pada kolom untuk sambungan RBS. Hasilnya, saat pelat lantai diikutkan dalam perencanaan sambungan RBS maka prosedur desain yang berlaku saat ini

melebihi perkiraan untuk torsi pada kolom. Dengan dasar distribusi momen pada flens balok dari analisis dan eksperimen maka dibutuhkan prosedur yang baru dan terlampir dalam laporan Rickles tersebut.

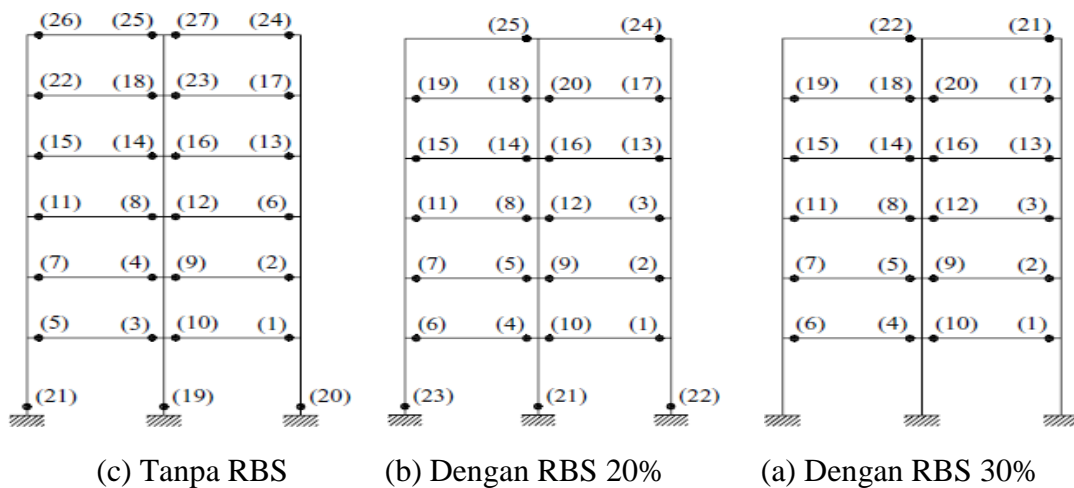


Gambar 2. 7 pemodelan untuk kolom interior

(Sumber: Rickles dkk., 2004)

2.3.2 Performance based analysis of RBS steel frames

Dalam penelitiannya, Alexa mencoba untuk mengaplikasikan penggunaan RBS pada bangunan bertingkat. Model yang dia gunakan adalah bangunan 6 tingkat dengan dua bentangan dan tiga bentangan yang masing – masing dibebani gempa dengan kondisi normal tanpa RBS, dengan RBS 20%, dengan RBS 30%. Mereka menyimpulkan bahwa pengurangan 20 % pada balok tidak berkaitan dengan peningkatan mekanisme runtuh vs mekanisme runtuh pada portal biasa. Pengurangan yang lebih besar (30%) baru bisa mengarahkan kita pada mekanisme runtuh akibat gempa.(Ladar & Alexa., 2009)



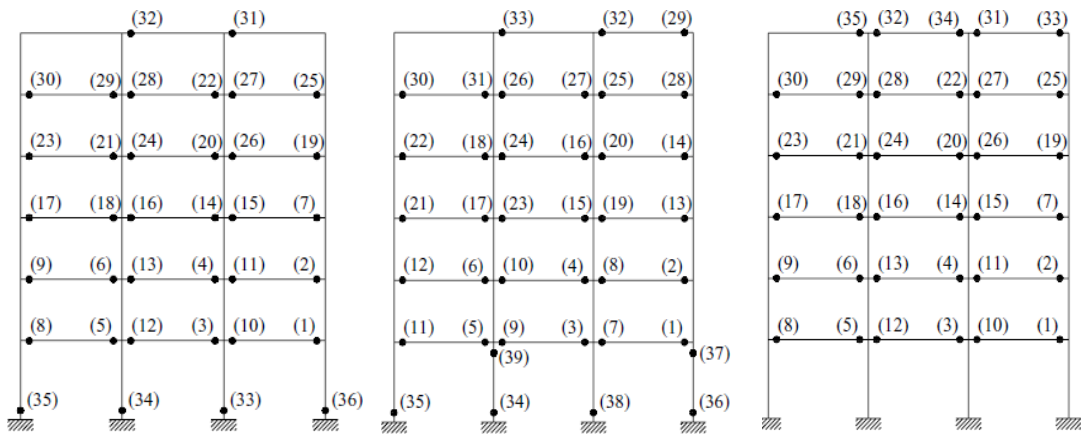
(c) Tanpa RBS

(b) Dengan RBS 20%

(a) Dengan RBS 30%

Gambar 2. 8 Mekanisme runtuh untuk 6 tingkat 2 bentang

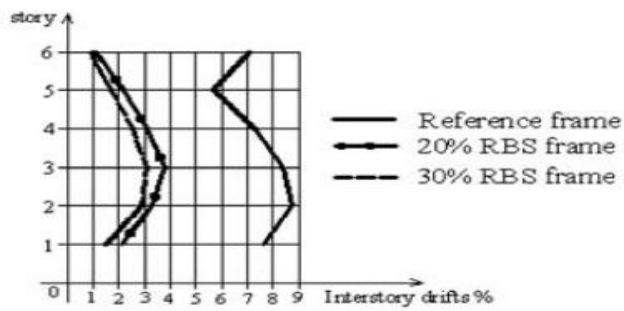
(Sumber: Alexa and Ladar 2009)



(a) Tanpa RBS (b) Dengan RBS 20% (c) Dengan RBS 30%

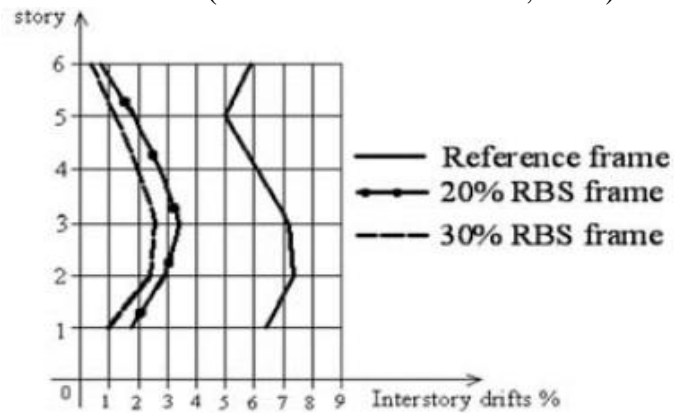
Gambar 2. 9 Mekanisme runtuh untuk 6 tingkat 3 bentang

(Sumber: Ladar & Alexa, 2009)



Gambar 2. 10 *Story drift in percentage* untuk frame dua bentang

(Sumber: Ladar & Alexa, 2009)



Gambar 2. 11 *Story drift in percentage* untuk frame tiga bentang

(Sumber: Ladar & Alexa, 2009)

2.4 Konsep perencanaan struktur tahan gempa

2.4.1 Gempa rencana

Dalam definisinya gempa rencana adalah gempa yang menjadi dasar perencanaan struktur bangunan untuk tahan terhadap guncangan. Dalam *SNI 1726:2019* mendefinisikan gempa rencana sebagai gempa dengan probabilitas terlampaui sebesar 2% dalam 50 tahun. Periode ulang gempa rencana sekitar 2500 tahun, yang berarti bahwa gempa dengan intensitas tersebut diperkirakan akan terjadi setiap 2500 tahun. Perencanaan struktur tahan gempa menggunakan gempa rencana sebagai dasar untuk memastikan bangunan mampu menahan gaya – gaya seismik yang terjadi akibat gempa. Kategori resiko pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan dapat bervariasi tergantung pada kategori resiko bangunan, seperti yang tercantum dalam tabel 2.5. *SNI 1726:2019*

2.4.2 Arah pembebanan gempa

Arah pembebanan gempa pada struktur bangunan merujuk pada arah gerakan atau gaya yang disebabkan oleh gempa bumi yang diterapkan pada struktur tersebut saat perhitungan atau analisis. Dalam perancangan bangunan tahan gempa, arah pembebanan gempa sangat penting untuk memastikan bangunan dapat menahan gaya lateral yang ditimbulkan oleh gempa.

2.4.3 Wilayah gempa

Pada umumnya, desain struktur bangunan tahan gempa merupakan desain yang mengatur hubungan antara respons gaya horizontal yang bekerja pada struktur (faktor kekuatan), kekakuan (*stiffness*), dan kekakuan deformasi struktur.

Berdasarkan *SNI 1726:2019* pada pasal 14 peta gempa 2017, wilayah gempa di Indonesia ditetapkan pada berdasarkan peta percepatan tanah puncak (PGA), parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek 0,2 detik) dan S_1 (percepatan batuan tanah dasar pada periode 1 detik).

2.5 Kriteria desain perencanaan struktur gedung tahan gempa

2.5.1 Kategori desain seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu kategori desain seismik yang bertujuan sebagai sistem klasifikasi yang digunakan untuk menentukan tingkat bahaya gempa bumi yang akan dihadapi suatu bangunan atau struktur, sehingga dapat didesain sesuai dengan tingkat bahaya tersebut. Kategori desain seismik dipengaruhi oleh level bahaya gempa ,jenis tanah, serta penggunaan dan fungsi gedung. Masing – masing bangunan dan struktur harus ditetapkan kedalam kategori desain seismik seperti

ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan 2.2 untuk menunjukkan hasil perencanaan yang efektif:

Tabel 2. 1 Kategori desain sesismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek

Nilai SDS	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$SD1 < 0.167$	A	A
$0.067 < SD1 < 0.133$	B	C
$0.133 < SD1 < 0.20$	C	D
$0.50 \leq SDS$	D	D

Tabel 2. 2 Kategori desain sesimik berdasarkan parameter respons percepatan periode 1 detik

Nilai SDS1	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$SD1 < 0.167$	A	A
$0.067 < SD1 < 0.133$	B	C
$0.133 < SD1 < 0.20$	C	D
$0.20 \leq SDS$	D	D

2.5.2 Kriteria struktur gedung

Pada merancang struktur gedung, gedung harus mempunyai kriteria struktur gedung yang artinya persyaratan yang harus dipenuhi agar sebuah bangunan gedung memiliki struktur yang kuat, aman dan tahan lama. Kriteria ini meliputi kekutan, kekakuan, stabilitas, dan kemampuan memikul beban sesuai dengan fungsi bangunan, lokasi, dan umur layanan yang direncanakan.

2.5.3 Faktor keamanan (Ie) dan kategori resiko struktur bangunan

Faktor keutamaan (*Importance factor*) dan kategori resiko struktur bangunan penting untuk perencanaan tahan gempa. Faktor keutamaan mengukur pentingnya bangunan, sedangkan kategori resiko mengklasifikasikan tingkat kerawanan bangunan terhadap kegagalan. Berdasarkan SNI 1726: 2019, faktor keutamaan (Ie) digunakan untuk mengalikan pengaruh gempa rencana terhadap bangunan, dengan nilai yang berbeda untuk setiap kategori resiko. Berikut kategori resiko dan faktor keutamaan dengan jenis pemanfaatan gedung yaitu gedung kantor yang ditunjukkan pada tabel 2.3 dan 2.4.

Tabel 2. 3 Kategori resiko bangunan gedung dan struktur lainnya untuk beban gempa berdasarkan SNI 1726: 2019

Jenis	Kategori resiko
Gedung dan struktur lainnya yang memiliki resiko rendah, terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan termasuk tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none">- Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan dan- Perikanan- Fasilitas sementara- Gedung penyimpanan- Rumah jaga dan struktur kecil lainnya.	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori resiko I, III, IV, termasuk tapi tidak dibatasi untuk : <ul style="list-style-type: none">- Perumahan- Rumah toko dan rumah kantor- Pasar	II

Tabel 2.3 : *Lanjutan*

Jenis	Kategori resiko
<ul style="list-style-type: none"> - Gedung perkantoran - Gedung apartemen / rumah susun - Pusat pemberlanjaan / mall - Bangunan industri - Pabrik 	<p>II</p>
<p>Gedung dan no gedung yang memiliki resiko tinggi terhadap terjadinya kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan - Penjara - Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan non gedung tidak termasuk kedalam kategori resiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar atau gangguan massa terhadap kehidupan masyarakat termasuk , tapi tidak dibatasi untuk :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah <p>Pusat telekomunikasi</p>	<p>III</p>

Tabel 2.3 : *lanjutan*

Jenis	Kategori resiko
<p>Gedung dan gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas penting, termasuk tetapi tidak dibatasi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bangunan bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah - Fasilitas pemadam kebakaran - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi - Fasilitas kesiapan darurat - Pusat pembangkit energi <p>Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan)</p>	<p>IV</p>

Tabel 2. 4 Faktor keutamaan (*Ie*), berdasarkan SNI: 1726:2019.

Kategori resiko	Faktor keutamaan gempa ,Ie
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

2.5.4 Faktor reduksi gempa (R)

Faktor reduksi merupakan perbandingan antara gaya geser yang terjadi akibat gempa dan gaya geser nominal bangunan. Faktor reduksi gempa adalah faktor yang digunakan untuk mengurangi gaya gempa agar bangunan tidak perlu didesain dalam kondisi elastis. Reduksi tersebut perlu dilakukan karena sangat tidak memungkinkan dari segi ekonomis bahwa struktur tahan gempa dibangun dalam kondisi elastis.

Berdasarkan SNI 1726: 2019 pasal 7.2 tabel 9, sistem penahan gaya seismik yang berbeda diizinkan untuk digunakan, untuk menahan gaya seismik dimasing – masing arah dua sumbu orthogonal struktur, ditentukan oleh parameter -parameter Tabel 2.5

Tabel 2. 5 Faktor koefisien modifikasi respons, faktor kuat lebih sistem, faktor pembesaran defleksi, dan batasan tinggi sistem struktur berdasarkan SNI 1726:2019.

No	Koefisien modifikasi respons R^a	Faktor kuat lebih sistem Ω_o^g	Faktor pembesaran defleksi C_d^b	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur (m) ^c				
				Kategori seismik				
				B	C	D ^d	E ^d	F ^e
1	8	3	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB

2.5.5 Klasifikasi situs

Klasifikasi situs adalah pemetaan atau pembagian situs atau lokasi menjadi beberapa kelas berdasarkan karakteristiknya. Klasifikasi ini biasanya digunakan dalam konteks perencanaan dan konstruksi bangunan, terutama untuk menentukan ketebalan struktur terhadap gempa atau bencana alam lainnya.

2.5.6 Koefisien situs

Koefisien situs adalah nilai yang digunakan untuk mengkonversi percepatan tanah maksimum (*peak ground acceleration*) atau percepatan tanah respons spektrum (*spectral acceleration*) yang dihitung berdasarkan kelas situs ke percepatan tabah yang diperkirakan akan terjadi di lokasi konstruksi. Nilai koefisien situs bergantung pada jenis tanah dan kondisi geologi lokal, serta pada periode getaran seismik. Koefisien situs digunakan untuk menyesuaikan nilai percepatan tanah yang dihitung berdasarkan standar desain gempa SNI 1726:2019 dengan kondisi spesifik di lokasi konstruksi. Tabel koefisien situs ditunjukkan pada tabel berikut ini :

Tabel 2. 6 Koefisien situs Fa

Kelas situs	Parameter respons spektra percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS^b				

Tabel 2. 7 Koefisien situs Fv

Kelas situs	Parameter respons spektra percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS^b				

2.5.7 Penentuan respon spektrum

Penentuan respons spektrum bertujuan untuk mencari tahu bagaimana suatu struktur akan merespons terhadap beban dinamis seperti gempa bumi. Dalam bentuk grafik atau plot. Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara periode getar struktur (T) dengan respons maksimum (misalnya, percepatan, kecepatan atau perpindahan) yang terjadi pada setiap periode.

Sesuai pers 2.1. dan 2.2. seperti berikut ini :

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (2.1)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_I \quad (2.2)$$

Dimana:

S_B = Nilai parameter respons spektra percepatan gempa periode pendek 0,2.

$$S_{DS} = 2/3 S_{MS} \quad (2.3)$$

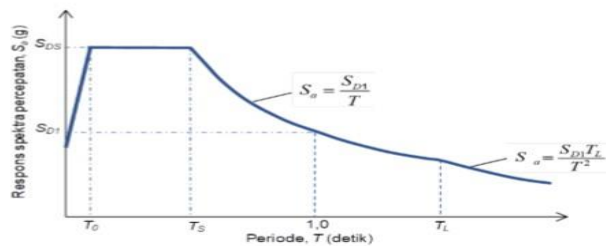
$$S_{D1} = 2/3 S_{M1} \quad (2.4)$$

Dimana :

S_{DS} = Respons spektra percepatan desain untuk periode pendek

S_{D1} = Respons spektra percepatan desain untuk periode 1,0 detik

Selanjutnya, untuk mendapatkan spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengacu dan mengikuti ketentuan berikut sesuai dengan Gambar 2.1.



Gambar 2. 12 Bentuk tipikal spektrum respons desain dipermukaan tanah (SNI 1726 : 2019)

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain S_a didapatkan dari pers. 2.5.

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.5)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a sama dengan S_{DS}
3. Untuk periode lebih besar dari T_s , spektrum respons percepatan desain S_a diambil berdasarkan Pers 2.6.

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.6)$$

Dimana :

T = Periode getar fundamental struktur

Untuk nilai T_0 dan T_s dapat ditentukan dengan Pers. 2.7 dan 2.8.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.7)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.8)$$

2.5.8 Analisis gaya lateral ekivalen

Analisis gaya lateral ekivalen merupakan metode analisis gempa statik yang digunakan dengan cara mengubah pengaruh gempa menjadi gaya lateral statik ekivalen yang bekerja pada struktur. Besarnya gaya gempa dihitung berdasarkan berat struktur, periode struktur, serta parameter percepatan gempa sesuai dengan peraturan yang berlaku. Gaya lateral tersebut kemudian didistribusikan ke setiap lantai struktur untuk dianalisis pengaruhnya terhadap respons struktur.

2.5.8.1 Geser dasar seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1, geser dasar seismik (v) dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan Pers 2.9

$$V = C_s \times W_t \quad (2.9)$$

Dimana :

C_s = Koefisien respons seismik yang ditentukan

W_t = Berat total gedung

2.5.8.2 Perhitungan koefisien dasar seismik

Menurut SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1, persamaan – persamaan yang digunakan untuk mendapatkan koefisien C_s adalah :

a. C_s maksimum

Untuk C_s maksimum ditentukan dengan Pers 2.10.

$$C_s \text{ maksimum} = C_{s \text{ maksimum}} = \frac{SD1}{SDS} \quad (2.10)$$

Dimana :

SDS = Parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode pendek

R = Faktor modifikasi respons

I = Faktor keutamaan hunian yang ditentukan berdasarkan Tabel 2.4

Nilai C_s maksimum diatas tidak perlu melebihi C_s hitungan pada Pers 2.11.

b. C_s hasil hitungan

$$C_s \text{ hasil hitungan} = C_{s \text{ hasil hitungan}} = \frac{SD1}{T\left(\frac{R}{I}\right)} \quad (2.11)$$

Dimana :

$SD1$ = Parameter percepatan respons spektrum desain pada periode 1 detik

R = Faktor modifikasi respons berdasarkan Tabel 2.5

I = Faktor keutamaan hunian yang ditentukan berdasarkan Tabel 2.4

T = Periode struktur dasar (detik)

c. C_s minimum

$$C_s \text{ minimum} = 0,044 SDS I \geq 0,01 \quad (2.12)$$

Dimana:

SDS = Parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode pendek

I = Faktor keutamaan hunian yang ditentukan berdasarkan Tabel 2.4

Sedangkan sebagai tambahan untuk struktur yang berlokasi di daerah dimana S1 jika lebih besar dari 0,6 g maka Cs harus tidak kurang dari Pers 2.13.

d. Cs minimum tambahan

$$C_s \text{ minimum tambahan} = C_s \text{ maksimum tambahan} = \frac{0,5S_2}{\frac{R}{\bar{\alpha}}} \quad (2.13)$$

Dimana:

S1 = Parameter percepatan respons spektrum desain yang dipetakan

R = Faktor modifikasi respons berdasarkan Tabel 2.5

I = Faktor keutamaan hunian yang ditentukan berdasarkan Tabel 2.4

2.5.9 Periode alami fundamental

Dalam konteks struktur periode alami fundamental adalah period getaran yang paling dasar atau paling rendah pada suatu sistem, seperti bangunan atau sinyal periodik. Ini adalah waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu siklus getaran atau osilasi lengkap, dan merupakan karakteristik penting dalam analisis getaran struktur dan sinyal.

Periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik harus ditentukan dari Pers 2.14.

$$T_a \text{ minimum} = C_t \times h_x^n \quad (2.14)$$

Dimana :

$T_a \text{ minimum}$ = Nilai batas bawah periode bangunan

H_n = Ketinggian struktur dalam m diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur (meter)

C_t = Ditentukan dari Tabel 2.8

x = Ditentukan dari Tabel 2.8

Tabel 2. 8 Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x berdasarkan SNI 1726:2019

Tipe struktur	C_r	X
Sistem rangka pemikul momen dimana rangka memikul 100 persen gaya gempa yg diisyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa : Rangka baja pemikul momen	0.0724	0.8
Rangka beton pemikul momen	0.0466 ^a	0.9
Rangka baja dengan bracing eksentris	0,0731 ^a	0,75
Rangka baja dengan bracing terkekang tekuk	0,0731 ^a	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488 ^a	0,75

Periode fundamental pendekatan maksimum (T_a maksimum) ditentukan dari Pers. 2.15.

$$T \text{ maksimum} = C_u T_a \text{ minimum} \quad (2.15)$$

Dimana :

T_a maksimum = Nilai batas atas periode bangunan

C_u = Ditentukan dari Tabel 2.12

Tabel 2. 9 koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung berdasarkan SNI 1726:2019

Paremeter percepatan respons spektra desain pada 1 detik , S_{DI}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\geq 0,1$	1,7

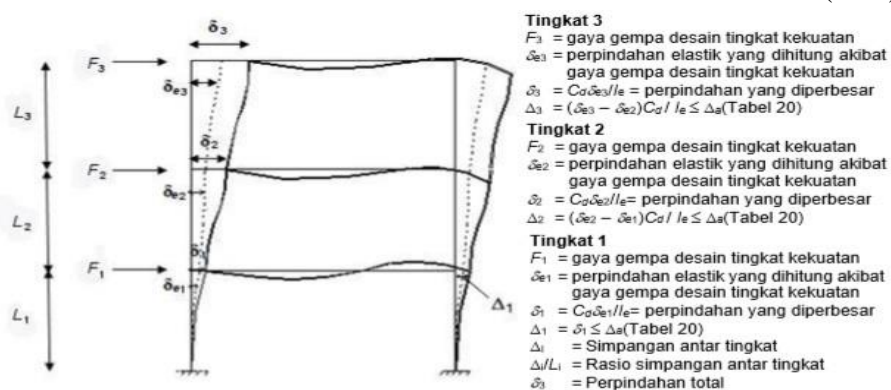
2.5.10 Analisis respons dinamik

Analisis ini penting untuk memahami bagaimana struktur akan bereaksi terhadap gaya seperti gempa bumi, angin, atau benturan. Analisis respons dinamik adalah studi mengenai perilaku struktur (seperti bangunan atau jembatan) ketika dikenakan beban dinamis, yaitu beban yang berubah – ubah seiring waktu.

2.5.11 Simpangan antar lantai

Dalam mendesain struktur bangunan harus diperhatikan simpangan antar lantainya. Simpangan antar lantai adalah (*story drift*) adalah perpindahan lateral relatif antara dua tingkat bangunan yang berdekatan. Ini adalah ukuran penting dalam analisis struktur bangunan, terutama dalam konteks perancangan tahan gempa, karena simpangan yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan pada elemen non – struktural dan mengganggu kenyamanan penghuni. Defleksi pusat massa di tingkat x (δ_x) mm harus ditentukan sesuai pers 2.16.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (2.16)$$



Gambar 2. 13 Penentuan simpangan antar lantai

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

2.5.12 Beban dan kombinasi pembebanan

Beban kerja pada struktur atau komponen struktur bisa ditetapkan berdasarkan peraturan pembebanan yang berlaku. Beban mati adalah beban – beban yang bersifat tetap selama masa layan, antara lain berat struktur, pipa – pipa, saluran – saluran listrik, *Ac/heater*, lampu – lampu, penutup lantai / atap, dan plafon. Beban hidup adalah beban – beban yang berubah besar dan lokasinya selama masa layan, antara lain berat manusia, perabotan, peralatan yang dapat dipindah – pindah, kendaraan, dan barang – barang lainnya. Beban gempa adalah gaya – gaya yang berasal dari gerakan – gerakan tanah dikombinasi dengan sifat – sifat dinamis struktur karena seringkali percepatan horizontal tanah lebih besar dari pada percepatan vertikal, dan struktur secara umum lebih sensitif terhadap gerakan horizontal dari pada gerakan vertikal, seluruh beban – beban yang bekerja, seperti beban mati, beban hidup, dan beban gempa tersebut diperhitungkan dengan faktor pembesaran dan kombinasi (*load combination*) berdasarkan SNI-1727-2020.

2.5.13 Soft storey

Soft storey adalah suatu tingkat yang lemah, yang kekakuannya jauh lebih kecil dari pada tingkat – tingkat yang lain. Oleh karena itu dalam merencanakan kekakuan tingkat harus berhati – hati agar tidak terjadi *Soft storey*. Kekakuan tingkat untuk setiap kolom pada lantai yang sama dapat diperkirakan dengan Pers 2.17.

$$K = \frac{12EI}{H^3} \quad (2.17)$$

Dimana:

H = Tinggi tingkat (cm)

J = Inersia kolom (m⁴)

K = Kekakuan tingkat (kg/cm)

2.5.14 Kekakuan struktur

Kekakuan struktur adalah gaya yang di perlukan struktur bila mengalami deformasi sebesar satu satuan. Nilai kekakuan struktur ini tergantung dari material yang digunakan, dimensi elemen struktur, penulangan, modulus elastisitas, modulus elastisitas geser, dan momen inersia polar. Selain itu, kekakuan struktur juga terkait dengan nilai dari periode struktur tersebut. Dapat dilihat dari persamaan 2.18.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{w} \quad (2.18)$$

Dimana = $\sqrt{\frac{k}{m}}$, dengan demikian $T = \frac{1}{\sqrt{k}}$

Dengan demikian, semakin besar periode struktur maka nilai kekakuan dari struktur tersebut semakin kecil, begitu sebaliknya.

2.5.15 Kriteria desain struktur

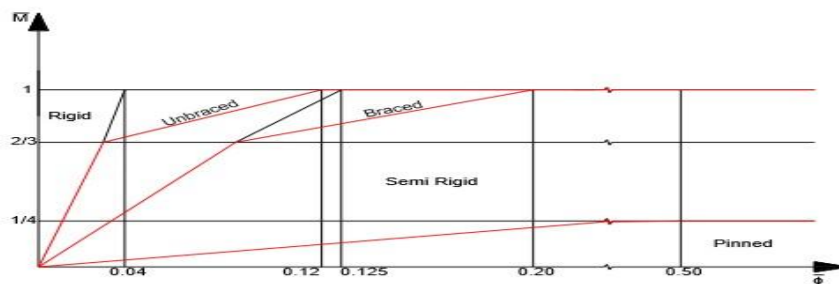
Suatu struktur dapat tersusun dari beberapa elemen dengan sifat atau karakteristik yang berlainan. Berdasarkan elemen- elemen penyusunnya, struktur dapat dibedakan 4 macam yaitu struktur balok - kolom, struktur *Trusses* (struktur rangka batang), struktur *frame* (struktur rangka kaku), dan struktur shell (meliputi *plate*, *shell* dan *Membran*).

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

2.6 Perencanaan sambungan

2.6.1 Sambungan momen

Sambungan momen (*moment connection*) adalah jenis sambungan dalam rekayasa struktur yang dirancang untuk mentransfer momen lentur antara dua anggota struktur, selain juga gaya geser dan gaya aksial. Sambungan ini bersifat kaku, yaitu mencegah rotasi antar anggota yang disambungkan. Sambungan momen digunakan dalam struktur rangka baja untuk membuat sambungan antara balok dan kolom, sehingga struktur dapat menahan momen lentur yang disebabkan oleh beban yang bekerja.



Gambar 2. 14 Kurva momen – rotasi (M -φ)

2.7 Sambungan balok-kolom baja

2.7.1 Sambungan las

Sambungan las (*welding joint*) adalah titik atau tepi tempat dua atau lebih potongan logam atau plastik disatukan dengan cara pengelasan. Dalam proses pengelasan, panas yang dihasilkan dari sumber seperti busur listrik, gas, atau laser, digunakan untuk meleburkan logam di area sambungan. Logam yang telah melebur kemudian mendingin dan mengeras, membentuk sambungan yang kuat.

Tujuan sambungan las yaitu menghasilkan sambungan yang kuat dan tahan lama, serta dapat digunakan untuk berbagai jenis material dan aplikasi.

2.7.2 Sambungan baut

Sambungan baut adalah sambungan yang menggunakan baut sebagai elemen pengikat untuk menggabungkan dua atau lebih bagian secara mekanis. Baut biasanya dipasangkan dengan mur yang memiliki ulir dalam, sehingga ketika mur dikencangkan, kedua bagian yang disambung menjadi terikat kuat.

Sambungan ini bersifat bisa dibongkar pasang (*removable joint*), sehingga sering digunakan dalam konstruksi, mesin, dan peralatan yang memerlukan perakitan serta perawatan berkala.

2.7.3 Analisa plastisitas baja

Analisa plastisitas baja adalah pemahaman tentang kemampuan baja untuk mengalami deformasi permanen atau perubahan bentuk yang tidak dapat kembali ke bentuk semula setelah gaya ditetapkan. Baja umumnya bersifat duktail, yang berarti memiliki kemampuan untuk diregangkan tanpa patah. Analisa ini penting dalam berbagai aplikasi, seperti konstruksi, manufaktur, dan desain produk, karena membantu memahami perilaku baja di bawah beban dan memprediksi kemungkinan kegagalan.

2.7.4 Tegangan

Tegangan adalah tahanan material terhadap gaya atau beban. Tegangan diukur dalam bentuk gaya per luas. Tegangan dibedakan menjadi dua yaitu Engineering stress dan true stress. Engineering stress dapat dirumuskan sebagai berikut pada persamaan 2.19 :

$$\sigma_{\text{eng}} = \frac{F}{A_0} \quad (2.19)$$

Dimana :

σ_{eng} = Engineering stress (Mpa)

F = Gaya (N)

A_0 = Luas permukaan awal (mm^2)

Sedangkan true stress adalah tegangan hasil pengukuran intensitas gaya reaksi yang dibagi dengan luas permukaan sebenarnya (*actual*). *True stress* dapat dihitung dengan persamaan (2.20)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.20)$$

Dimana :

σ = *True stress* (Mpa)

F = Gaya (N)

A = Luas permukaan sebenarnya (mm^2)

2.7.5 Regangan

Regangan didefinisikan sebagai perubahan ukuran atau bentuk material dari panjang awal sebagai hasil dari gaya yang menarik atau yang menekan pada material. Batasan sifat elastis perbandingan regangan dan tegangan akan linier akan berakhir sampai pada titik mulur. Hubungan tegangan dan regangan tidak lagi linier pada saat material mencapai pada batasan fase sifat plastis.

regangan dibedakan menjadi dua, yaitu: *engineering strain* dan *true strain*. *engineering strain* adalah regangan yang dihitung menurut dimensi benda aslinya (panjang awal). Sehingga untuk mengetahui besarnya regangan yang terjadi adalah dengan membagi perpanjangan dengan panjang semula.

$$E_{eng} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (2.21)$$

Dimana :

E_{eng} = *Engineering strain*

Δl = Perubahan panjang

L_0 = Panjang mula – mula

l = Panjang setelah diberi gaya

True strain regangan yang dihitung secara bertahap (*increment strain*), dimana regangan dihitung pada kondisi dimensi benda saat itu (sebenarnya) dan bukan dihitung berdasarkan panjang awal dimensi benda. Maka persamaan regangan untuk true strain (ϵ) terdapat pada persamaan 2.22

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2.22)$$

Dimana :

$$\varepsilon = \text{True strain}$$

2.7.6 Kurva tegangan regangan

Ada beberapa hal yang harus diketahui dalam hal tegangan – regangan pada mekanika bahan yaitu :

a. Kurva *True stress and true strain*

Proses pengepresan (*stamping*) atau *sheet metal forming* menggunakan sifat plastis (*plasticity*) dari material logam yang akan menyebabkan bahan plat menjadi bentuk baru apabila diregang melebihi batas elastis (*elasticity*) sehingga deformasinya permanen.

Hal yang mendasar dari proses pengepresan adalah memanfaatkan sifat plastisitas dari material saat plat diberi gaya. Dengan memanfaatkan tahap plastisitas tersebut maka proses pembentukan dapat dicapai, dimana bentuk plat akan sesuai dengan bentuk cetakan yang diinginkan.

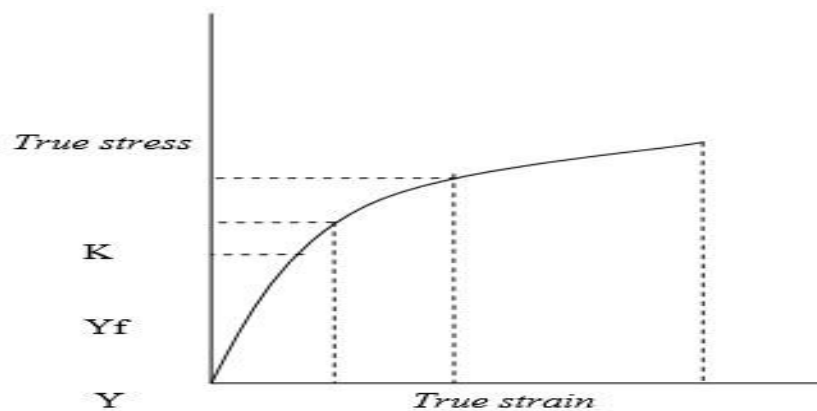
Persamaan kurva tegangan – regangan dalam bentuk eksponensial dapat dilihat dari persamaan 2.23 adalah sebagai berikut :

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (2.23)$$

Dimana :

K = *strenght coefficient*

n = *Hardening exponent*



Gambar 2. 15 Kurva *true stress* dan *true strain*

Prinsip tegangan pada kondisi plastis dengan teori von mises stress. Kriteria ukuran terjadinya keluluhan yang digunakan secara luas adalah ketika luasan bidang mulai terdeformasi plastis sampai tegangan pada permukaan luasan mencapai nilai maksimum (kritis). Beberapa peneliti telah menyatakan menggunakan kriteria ini. Teori ini disebut dengan teori batas luluh tegangan sisa (*von mises yield theory*).

Kriteria luluh (*yield*) pada penelitian ini menggunakan persamaan *Von mises yield condition* yang dapat dilihat dari persamaan 2.24 sebagai berikut :

$$\sigma_f = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.24)$$

Dimana :

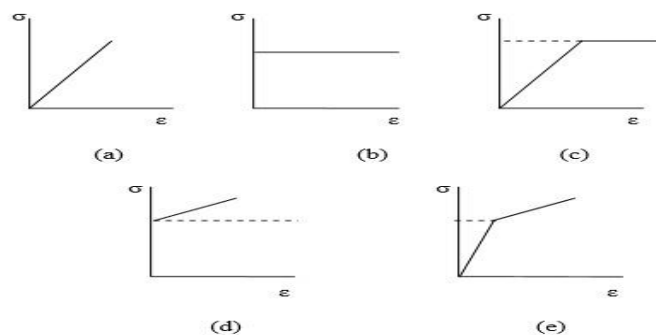
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = \text{principle stresses}$

$\sigma_f = \text{Flow stress}$

Kondisi luluh pada suatu bidang menggunakan angka perbandingan tegangan (*stress ratio*) .

b. Jenis – jenis kurva *stress – strain*

Setiap material mempunyai kurva *stress – strain* yang berbeda – beda tergantung dari komposisi dan beberapa faktor seperti perlakuan panas. Kurva tegangan – regangan dipengaruhi oleh temperatur, *strain rate*, efek tekanan hidrostatis, dan efek radiasi. Beberapa jenis kurva *Stress – strain* sebagai berikut :



Gambar 2. 16 Jenis kurva stress and strain. (a) *perfectly elastic*,(b) *Rigid perfectly plastic*(c) *elastic, perfectly plastic*(d) *Rigid, lineary strain hardening*(e) *elastic, lineary stain hardening*)

c. Daktalitas

Dalam penelitian ini struktur yang digunakan yaitu material baja, maka daktalitas baja adalah kemampuan baja untuk berdeformasi secara permanen (plastis) sebelum patah, atau dengan kata lain kemampuan baja untuk mengalami regangan

yang besar sebelum pecah. Dalam konteks struktur bangunan tahan gempa daktilitas baja sangat penting karena memungkinkan struktur untuk menyerap energi gempa melalui deformasi plastis, sehingga mencegah kerusakan yang lebih parah.

2.7.7 Beban siklik

Beban siklik merupakan beban berulang yang diterima oleh suatu struktur. Dimana kekuatan *fatigue* merupakan kekuatan yang dapat didukung untuk sejumlah siklus tertentu. Kekuatan fatigue akibat beban siklik dipengaruhi oleh berbagai pembebanan tingkat pembebanan *load story* dan sifat material. Berikut gambar beban siklik ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Gambar beban siklik sesuai Fema (2002)

2.7.8 Analisis kurva histeresis

Analisis kurva histeresis (*hysteresis curve analysis*) adalah proses studi dan interpretasi kurva yang menunjukkan hubungan antara masukan dan keluaran dalam sistem yang mengalami histeresis. Luas daerah yang tertutup dalam kurva histeresis mewakili energi yang diserap dan hilang oleh material selama proses magnetisasi dan demagnetisasi. Rumus untuk menghitung energi yang diserap (loss) ini adalah pada persamaan 2.25 sebagai berikut :

$$E = \int B \, dH \quad (2.25)$$

Dimana :

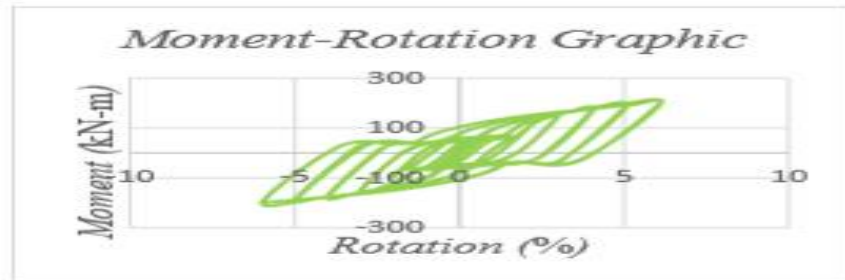
E : energi yang diserap per satuan volume (J/m^3)

B : kerapatan fluks magnetik(T)

H : kekuatan medan magnet (A/m)

\int : Simbol integral, yang berarti penjumlahan dari area kecil – kecil di bawah kurva

Seperti contoh pada gambar 2.18 sebagai berikut :



Gambar 2. 18 *hysteresis loop*

2.7.9 Struktur Baja Tahan Gempa

Struktur baja tahan gempa didesain untuk berperilaku duktail dan mampu menyerap energi gempa melalui deformasi plastis pada elemen-elemen tertentu. Pada sistem Special Moment Resisting Frame (SMRF), energi gempa diharapkan diserap melalui plastisitas pada balok, sementara kolom tetap bersifat elastis. Untuk mencapai tujuan tersebut, detail sambungan menjadi sangat penting dalam memastikan bahwa daerah plastis tidak terjadi di daerah sambungan, melainkan pada daerah yang telah direncanakan sebelumnya, seperti dalam sistem RBS.

2.7.10 Konsep Reduced Beam Section

Reduced Beam Section (RBS) adalah pendekatan dalam mendetailkan sambungan momen pada struktur baja, dengan mengurangi penampang balok di dekat sambungan (biasanya sekitar 0.05–0.10 kali panjang bentang balok dari kolom). Tujuannya adalah:

- Menggeser lokasi plastisitas dari daerah sambungan ke badan balok
- Menurunkan konsentrasi tegangan di sambungan balok-kolom
- Meningkatkan kinerja daktilitas sambungan

RBS sering disebut sebagai “dog bone connection” karena bentuk pemotongan profil balok yang menyerupai tulang anjing.

2.8 Pedoman Pemodelan dari FEMA

2.8.1 FEMA 350

Fema 350 memberikan rekomendasi desain sambungan momen pada struktur baja tahan gempa, termasuk geometri pemotongan RBS, kapasitas sambungan, dan kekakuan sambungan. Geometri umum RBS meliputi:

- Jarak pemotongan: 0.6–0.75 b_f (lebar sayap balok)
- Panjang pemotongan: 0.5–0.75 d (tinggi profil balok)

- Kedalaman pemotongan: 0.2–0.25 bf

2.8.2 FEMA 356 dan FEMA 440

Fema 356 menyediakan pedoman dalam pemodelan perilaku inelastik elemen struktur dalam analisis nonlinear (pushover/dinamik). Beberapa hal penting:

- Model plastisitas: Digunakan model momen–rotasi ($M-\theta$)
- Plastis hinge ditempatkan di lokasi plastis (seperti di daerah RBS)
- Parameter rotasi untuk balok dengan detailing baik (seperti RBS):
 - Rotasi yield (θ_y) ≈ 0.01 rad
 - Rotasi maksimum (θ_u) $\approx 0.04-0.08$ rad

FEMA 440 memperbaiki dan menyempurnakan model backbone nonlinear pada FEMA 356 dengan mempertimbangkan efek degradasi kekakuan dan kekuatan akibat siklik gempa.

2.9 Pemodelan Sambungan RBS Balok-Kolom

2.9.1 Elemen Struktur

Pemodelan struktur dengan sambungan RBS dapat dilakukan menggunakan elemen batang (frame element) dengan penempatan plastis hinge pada lokasi RBS, yakni sekitar 0.05L–0.10L dari muka kolom.

2.9.2 Plastis Hinge

Model hinge nonlinier digunakan untuk mensimulasikan perilaku plastis balok. Kurva backbone momen-rotasi mengikuti rekomendasi FEMA 356 sebagai berikut:

Tabel 2. 10 Kurva backbone momen-rotasi rekomendasi FEMA 356

Titik	Deskripsi	Rotasi (rad)	Keterangan
A	Awal	0.0	Titik awal
B	Yield	0.01	Rotasi leleh
C	Kapasitas penuh	0.04–0.06	Rotasi maksimum
D	Softening	0.06–0.08	Penurunan kekuatan
E	Kegagalan	>0.08	Kegagalan sambungan

2.9.3 Penempatan Hinge

Penempatan plastis hinge dilakukan pada ujung balok, bukan pada pusat simpul, dengan jarak sesuai daerah pengurangan penampang (cut zone). Ini untuk mencerminkan lokasi aktual pembentukan sendi plastis.

2.10 Disipasi Energi

2.10.1 Pengertian Disipasi Energi

Disipasi energi adalah kemampuan suatu elemen struktur dalam menyerap dan melepas energi yang diterimanya dari beban dinamis (misalnya gempa) melalui deformasi inelastis. Pada sambungan balok–kolom baja, disipasi energi terutama terjadi pada daerah plastis sambungan, yang sengaja didesain menggunakan metode Reduced Beam Section (RBS) seperti radius cut, tapered cut, atau dogbone cut.

2.10.2 Teori Menghitung Disipasi Energi dan Hubungan dengan Kurva Histeresis

Ketika struktur dikenai pembebanan siklik, responsnya digambarkan dalam bentuk kurva beban–perpindahan ($F-\Delta$) atau momen–rotasi ($M-\theta$).

- Kurva histeresis akan membentuk “loop” tertutup.
- Luas area loop histeresis = energi yang didisipasikan dalam satu siklus pembebanan.

2.10.3 Rumus Perhitungan

1. Energi Disipasi (kurva gaya–perpindahan)

$$E_d = \oint F d \quad (2.26)$$

dengan:

- F = gaya lateral (N atau kN)
- Δ = perpindahan lateral (mm atau m)
- \oint = integral tertutup, menggambarkan luas area dalam kurva histeresis

2. Energi Disipasi (kurva momen–rotasi)

$$E_d = \oint M d\theta \quad (2.27)$$

dengan:

- M = momen lentur (Nm atau kNm)
- θ = rotasi (rad)

3. Energi Total Kumulatif (semua siklus):

$$E = \sum (E_{d,i}) \quad , i = 1 \rightarrow n \quad (2.28)$$

dengan:

- $E_{d,i}$ = energi disipasi pada siklus ke- i
- n = jumlah siklus

4. Indeks Efisiensi Disipasi Energi

Untuk membandingkan kinerja elemen struktur, sering digunakan indeks disipasi energi:

$$\eta = E / (F_{\max} : \Delta_{\max}) \quad (2.29)$$

dengan:

- E = total energi disipasi kumulatif
- F_{\max} = gaya maksimum tercapai
- Δ_{\max} = perpindahan maksimum

Semakin tinggi nilai η , semakin efisien struktur dalam menyerap energi gempa.

5. Relevansi dengan Sambungan RBS

- Radius cut, straight cut mengarahkan plastisitas pada bagian balok tertentu.
- Bagian plastis inilah yang menjadi “fuse energi”.
- Perbedaan bentuk cut akan memengaruhi luas kurva histeresis, sehingga memengaruhi jumlah energi yang dapat didisipasikan.

2.11 Kerangka Pemikiran

Struktur baja yang direncanakan sebagai struktur tahan gempa harus memiliki perilaku duktail dan mampu mendisipasikan energi gempa melalui deformasi plastis. Salah satu konsep perencanaan struktur tahan gempa pada struktur baja adalah konsep strong column–weak beam, dimana sendi plastis diharapkan terjadi pada balok dan bukan pada kolom atau daerah sambungan.

Salah satu metode yang digunakan untuk memenuhi konsep tersebut adalah penggunaan Reduced Beam Section (RBS), yaitu dengan cara mengurangi penampang balok pada jarak tertentu dari muka kolom. Tujuan dari RBS adalah untuk memindahkan lokasi sendi plastis menjauh dari muka kolom sehingga kerusakan terpusat pada daerah balok yang telah direduksi dan sambungan balok–kolom tetap aman.

Reduced Beam Section (RBS) memiliki beberapa tipe pemotongan, di antaranya radius cut dan straight cut. Perbedaan bentuk pemotongan ini akan mempengaruhi distribusi tegangan, regangan, pola leleh, perpindahan, serta kemampuan disipasi energi pada sambungan balok–kolom akibat pembebanan siklik.

Sambungan RBS tipe radius cut memiliki bentuk lengkung sehingga dapat mengurangi konsentrasi tegangan dan menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata. Sedangkan sambungan RBS tipe straight cut memiliki bentuk pemotongan lurus yang lebih sederhana dalam pelaksanaan, namun cenderung menimbulkan konsentrasi tegangan pada sudut pemotongan.

Berdasarkan perbedaan bentuk tersebut, maka dilakukan analisis elemen hingga dengan pembebanan siklik untuk membandingkan kinerja sambungan RBS tipe radius cut dan straight cut. Parameter yang dibandingkan meliputi nilai tegangan, regangan, perpindahan, pola histeresis, dan disipasi energi. Dari hasil analisis tersebut dapat diketahui tipe sambungan yang memiliki kinerja lebih baik terhadap pembebanan siklik.

2.12 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah diuraikan, maka hipotesis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

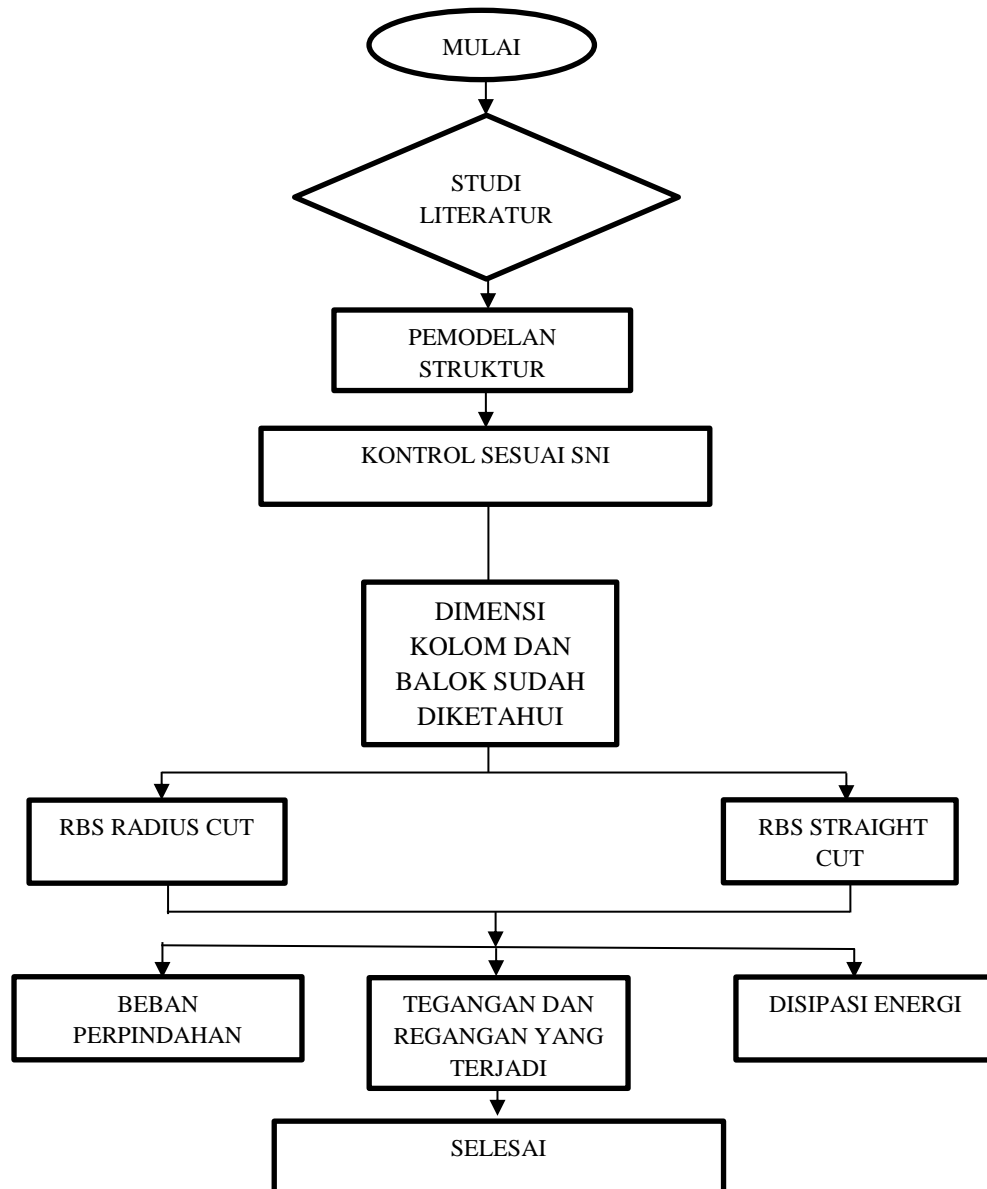
1. Terdapat perbedaan kinerja antara sambungan RBS tipe *radius cut* dan *straight cut* terhadap pembebanan siklik, ditinjau dari tegangan, regangan, perpindahan, dan disipasi energi.
2. Model *straight cut* menunjukkan tegangan yang lebih terkendali.
3. Model *straight cut* memiliki kapasitas disipasi energi yang lebih besar.
4. Model *radius cut* memiliki distribusi regangan plastis yang lebih merata dan respons histeresis yang lebih stabil.

BAB III

METODOLOGI

3.1 Umum

Langkah-langkah dalam perencanaan dan analisis struktur dilakukan dengan beberapa tahapan. Adapun tahapan-tahapan tersebut dapat dilihat pada Gambar bagan alir.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Berdasarkan Gambar 3.1, dapat dijelaskan bahwa dalam Tugas Akhir ini Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pemodelan numerik berbasis elemen hingga (Finite Element Method/FEM). Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi perilaku nonlinier sambungan baja Reduced Beam Section (RBS) akibat

pembebanan siklik dengan mengacu pada FEMA 350 dan AISC 358. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan pendekatan dua tingkat pemodelan, yaitu:

1. Pemodelan struktur global menggunakan perangkat lunak berbasis analisa struktur untuk memperoleh dimensi struktur, gaya dalam dan parameter respons struktur.
2. Pemodelan detail sambungan RBS menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga mikro untuk menganalisis perilaku lokal sambungan hingga terjadi keruntuhan.

Pembebanan siklik diterapkan menggunakan metode displacement-controlled cyclic loading sesuai prosedur pengujian sambungan momen khusus pada struktur baja tahan gempa.

menggunakan dua variasi bentuk potongan yaitu radius cut dan straight cut ketika dikenai pembebanan siklik.

3.1.1 Faktor respons gempa (c)

Rencananya berdirinya bangunan dalam pemodelan struktur gedung ini di kota Mataram yang dinilai sebagai rawan gempa di Indonesia dengan data PGA (*Peak ground acceleration*) $S_s = 1,0347$ g dan $S_1 = 0,4047$ g pada tanah sedang berdasarkan peta spektra Indonesia. Berdasarkan SNI 1726:2019, respons spektrum gempa rencana harus dianalisis terlebih dahulu.

Adapun tahapan – tahapan yang dilakukan untuk membuat spektrum respons gempa desain dapat dilakukan sebagai berikut :

- a. Penentuan koefisien F_a dan F_v

- Koefisien F_a

Koefisien F_a ditentukan berdasarkan beberapa parameter, yaitu nilai S_s yang terdapat pada Tabel 2.10 dan berdasarkan jenis tanah sedang. Maka diperoleh nilai F_a dibawah ini .

$$F_a = 1,0861$$

- Koefisien F_v

Koefisien F_v ditentukan berdasarkan beberapa parameter, yaitu nilai S_1 yang terdapat pada tabel 2.11 dan berdasarkan jenis tanah sedang. Maka diperoleh nilai F_v dibawah ini .

$$F_v = 1,8953$$

b. Penentuan nilai SMS dan SM1

$$\text{SMS} = \text{Fa.Ss}$$

$$\text{SMS} = 1,0861 \cdot 1,0347$$

$$\text{SMS} = 1,123$$

$$\text{SM1} = \text{Fv.S1}$$

$$\text{SM1} = 1,8953 \cdot 0,4047$$

$$\text{SM1} = 0,767$$

c. Penentuan nilai SDS dan SD1

$$\text{Nilai } \mu = 2/3$$

$$\text{SDS} = 2/3 \cdot \text{Fa.SMS}$$

$$\text{SDS} = 2/3 \cdot 0,836 \cdot 1,0347$$

$$\text{SDS} = 0,7492$$

$$\text{SD1} = 2/3 \cdot \text{Fv.S1}$$

$$\text{SD1} = 2/3 \cdot 1,8952 \cdot 0,4047$$

$$\text{SD1} = 0,5114$$

d. Penentuan nilai Ts dan T0

$$\text{Ts} = \text{SD1/SDS}$$

$$\text{Ts} = 0,5114/0,7492$$

$$\text{Ts} = 0,6825$$

$$\text{T0} = 0,2 \cdot \text{Ts}$$

$$\text{T0} = 0,2 \cdot 0,6825$$

$$\text{T0} = 0,1365$$

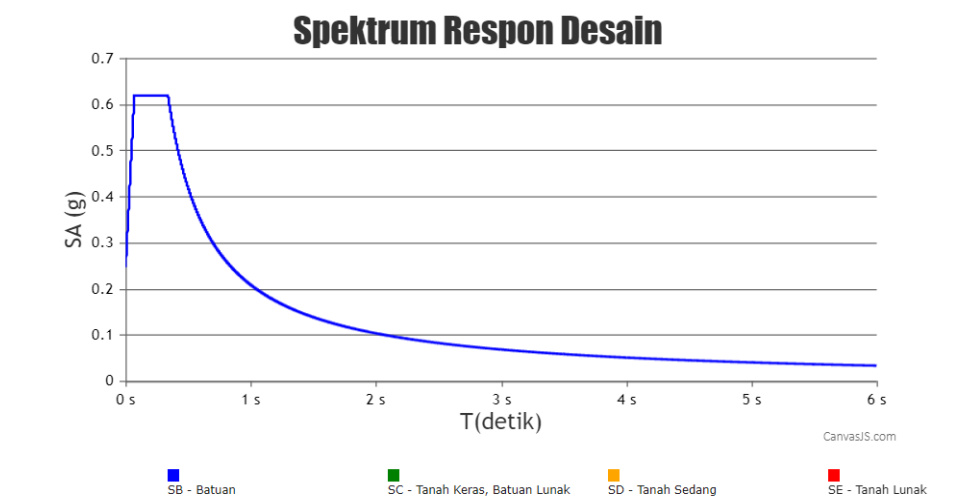
3.2 Respons Spektrum Desain Gempa

3.2.1 Desain Respons Spektrum Mataram (Tanah Sedang)

Berdasarkan SNI 1726:2019, respons spektrum gempa didesain pada kondisi tanah sedang yang terletak di Mataram, kemudian dianalisis dengan data- data $PGA = 0.4567 g$, $S_s = 10.347g$ dan $SI = 0.4047 g$. maka akan didapatkan koefisien atau nilai-nilai yang diperlukan dalam pembuatan respons spektrum desain. Nilai-nilai tersebut yaitu:

- Nilai $F_a = 1,1$
- Nilai $F_v = 1,9$
- $SDS = 0,75$
- $SDI = 0,51$
- $T_0 = 0,14$
- $T_s = 0,68$

Respons spektrum diplot ke dalam grafik seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Respons spektrum desain berdasarkan SNI 1726:2019 Mataram dengan jenis tanah sedang.

Selanjutnya nilai respons spektrum desain yang didapatkan tersebut digunakan dalam analisis dinamik struktur linear dengan metode respons spektrum pada pemodelan menggunakan program Analisa struktur.

3.3 Pemodelan Struktur

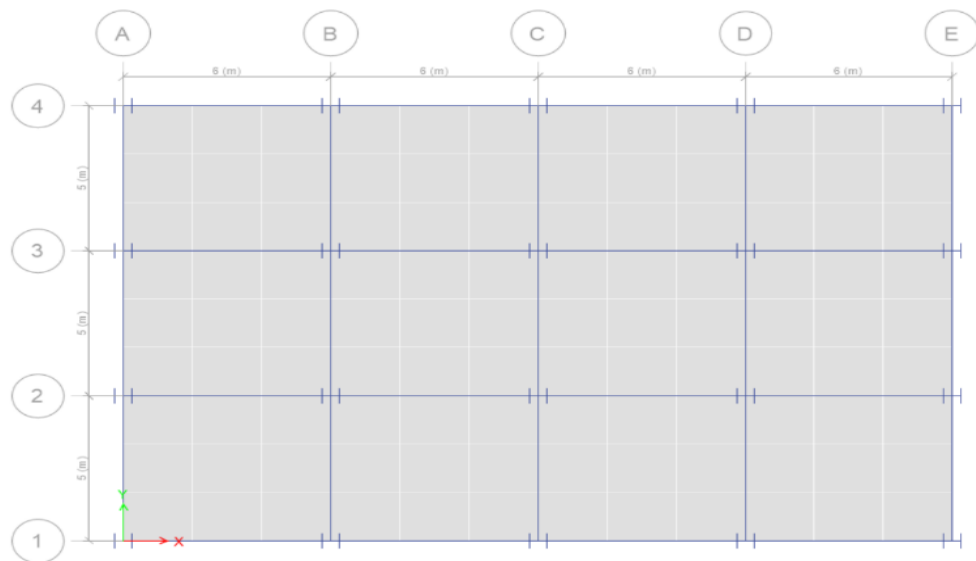
3.3.1 Data Perencanaan Struktur

Adapun data perencanaan struktur yang digunakan pada pemodelan dalam perangkat lunak berbasis analisa struktur, yaitu:

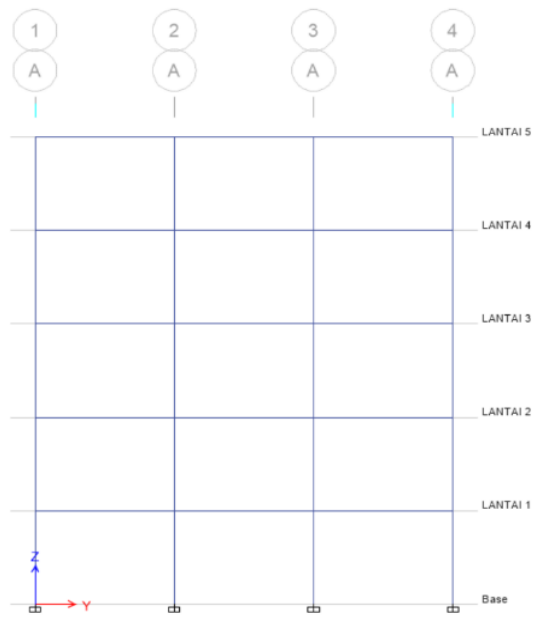
1. Jenis pemanfaatan gedung perkantoran.
2. Gedung terletak di kota Mataram
3. Klasifikasi situs tanah Sedang (SD)
4. Sistem struktur yang digunakan adalah Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)
5. Jenis portal struktur gedung adalah Baja.
6. Mutu baja tulangan yang digunakan adalah BJ 41:
 - Kuat leleh minimum (f_y) : 250 MPa
 - Kuat tarik minimum (f_u) : 410 Mpa

3.3.2 Konfigurasi Bangunan

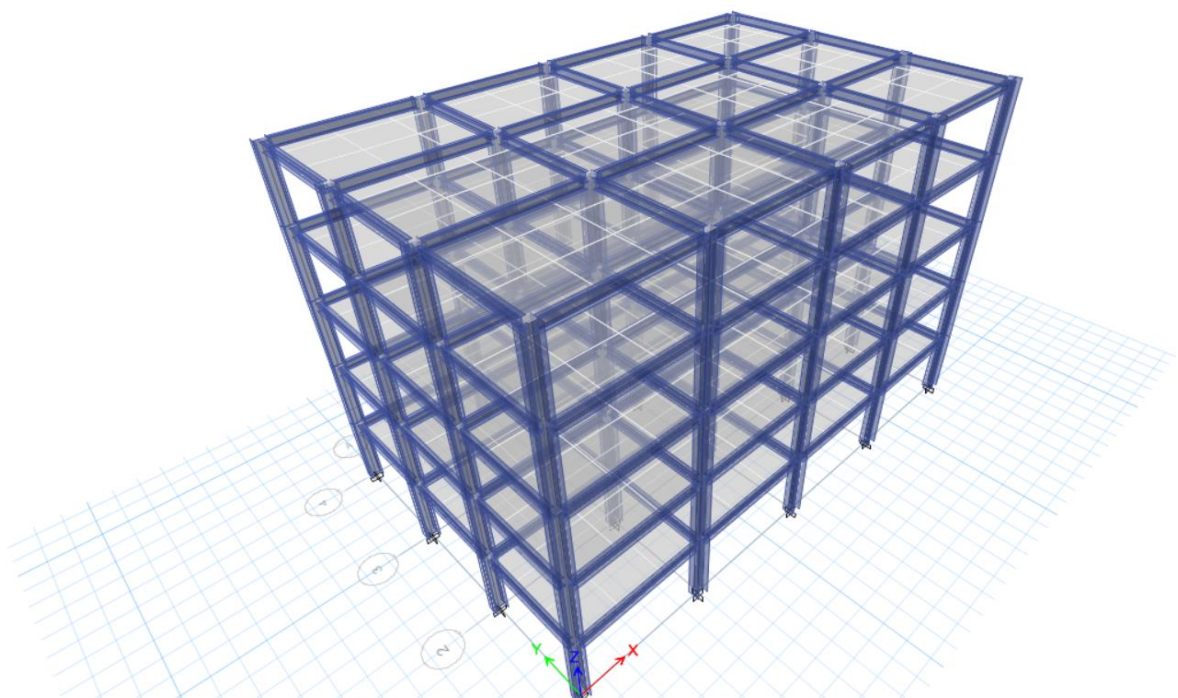
Dalam Tugas Akhir ini, struktur bangunan yang direncanakan adalah struktur baja dengan sistem rangka pemikul momen khusus. Bangunan 5 Lantai berbentuk persegi yang simetri (*regular building*) seperti yang terlihat pada Gambar 3.3.



a)



b)



c)

Gambar 3. 3 : a) Denah struktur Model , b) Proyeksi bangunan Model , c) Bentuk tipikal struktur portal tanpa dinding geser (SRPMK).

3.3.3 Dimensi Kolom-Balok

Bangunan yang direncanakan adalah struktur beraturan, Struktur gedung direncanakan dengan dimensi penampang yang berbeda. Ukuran balok dan kolom terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Dimensi Kolom-Balok

Jumlah Lantai	Ukuran Balok	Ukuran Kolom
1	WF 400x200x8	H-Beam 458x417x30
2	WF 428x407x20	H-Beam 458x417x30
3	WF 428x407x20	H-Beam 458x417x30
4	WF 428x407x20	H-Beam 458x417x30
5	WF 428x407x20	H-Beam 458x417x30

3.4 Analisis Struktur

3.4.1 Analisis Dinamik Struktur Linier

Analisis ini menggunakan Metode Respons Spektrum. Pada analisis ini, alat bantu perangkat lunak yang digunakan adalah program analisa struktur.

3.4.2 Pembebanan

Beban gravitasi yang bekerja pada struktur bangunan diambil dari SNI 1727:2020 yang telah disesuaikan dengan jenis dan fungsi bangunan. Beban-beban tersebut adalah beban hidup dan beban mati yang berhubungan dengan komponen material bangunan. Nilai beban hidup dan beban mati yang digunakan dalam perencanaan dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3.

Tabel 3. 2 Berat material konstruksi berdasarkan SNI 1727:2020.

Beban Mati	Besarnya Beban
Beton bertulang	2400 kg/m ³
Plafon dan penggantung	18 kg/m ²
Adukan /cm dari semen	21 kg/m ²
Pasangan bata setengah batu	250 kg/m ²
Penutup lantai dari keramik	24 kg/m ²

Tabel 3. 3 Beban hidup pada lantai dan atap struktur berdasarkan SNI 1727:2020.

Beban Hidup	Besarnya Beban
Lantai sekolah, perkantoran, apartemen, hotel, asrama, pasar, rumah sakit	240 kg/m ²
Beban hidup pada atap Gedung	100 kg/m ²

Selanjutnya nilai-nilai tersebut dihitung dan diakumulasikan sesuai dengan luas bangunan pada masing-masing tingkat/lantai yang kemudian digunakan sebagai *input* dalam pemodelan Program Analisa Struktur.

3.4.3 Analisis respons spektrum

Prosedur analisis respons spektrum dilakukan dengan menggunakan program Analisa Struktur. Analisis respons spektrum ini dilakukan dengan memperhitungkan pengecekan struktur terhadap simpangan, p delta, ketidakberaturan struktur.

3.4.4 Simpangan antar tingkat

Simpangan antar tingkat (*inter – story drift*) adalah perpindahan lateral relatif antara dua tingkat bangunan yang berdekatan. Ini adalah ukuran seberapa jauh dua lantai bangunan bergerak satu terhadap yang lain secara mendatar dan penting untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan selama gempa. Pengecekan simpangan antar tingkat berdasarkan bangunan yang didesain harus sesuai dengan SNI 1726:2019 seperti berikut ini :

Tabel 3. 4 Simpangan antar tingkat

Stor y	<i>Displacement</i>		<i>Elastic Drift</i>		<i>H</i>	<i>Inelastic Drift</i>		<i>Drift Limit</i>	<i>Ce k</i>
	δ_{ex}	δ_{ey}	δ_{ex}	δ_{ey}		Δ_x	Δ_y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
5	31,62	34,314	4,949	3,661	3500	27,220	20,136	53,846	OK
4	26,671	30,653	6,708	6,339	3500	36,894	34,865	53,846	OK
3	19,963	24,314	8,049	8,728	3500	44,270	48,004	53,846	OK
2	11,914	15,586	7,761	9,601	3500	42,686	52,806	53,846	OK
1	4,153	5,985	4,153	5,985	3500	22,842	32,918	53,846	OK

3.4.5 Pengaruh p- δ

Pengaruh non linear orde dua yang terjadi pada struktur saat mengalami beban aksial (p) dan perpindahan lateral (Δ) secara bersamaan. Pengaruh p- δ menciptakan momen tambahan yang destabilisasi, menyebabkan struktur menjadi lebih rentan terhadap tekuk atau kegagalan.

Tabel 3. 5 Tabel pengaruh p δ

Story	<i>Inelastic Drift</i>		<i>Story Forces</i>			<i>H</i>	<i>Koefisien Stabilitas</i>		<i>Batas Pengaruh P-Delta</i>	<i>Batas Stabilitas Struktur, θ_{max}</i>	<i>Cek</i>
	Δ_x	Δ_y	<i>P</i>	V_x	V_y		θ_x	θ_y			
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)						
5	27,220	20,136	1532,57	123,21	125,07	3500	0,0176	0,0128	0,1	0,0909	OK
4	36,894	34,865	4275,58	251,23	254,46	3500	0,0326	0,0304	0,1	0,0909	OK
3	44,270	48,004	7018,58	355,93	359,48	3500	0,0453	0,0487	0,1	0,0909	OK
2	42,686	52,806	9761,59	439,08	442,24	3500	0,0493	0,0605	0,1	0,0909	OK
1	22,842	32,918	12504,59	506,32	508,88	3500	0,0293	0,0420	0,1	0,0909	OK

3.5 Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan parameter yang digunakan dalam penelitian untuk dianalisis dan dibandingkan hasilnya. Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi variabel lainnya. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis sambungan Reduced Beam Section (RBS), yaitu:

- Sambungan RBS tipe radius cut
- Sambungan RBS tipe straight cut

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah hasil analisis struktur yang meliputi:

- Nilai tegangan (stress)
- Nilai regangan (strain)
- Nilai perpindahan (displacement)
- Pola kurva histeresis
- Nilai disipasi energi

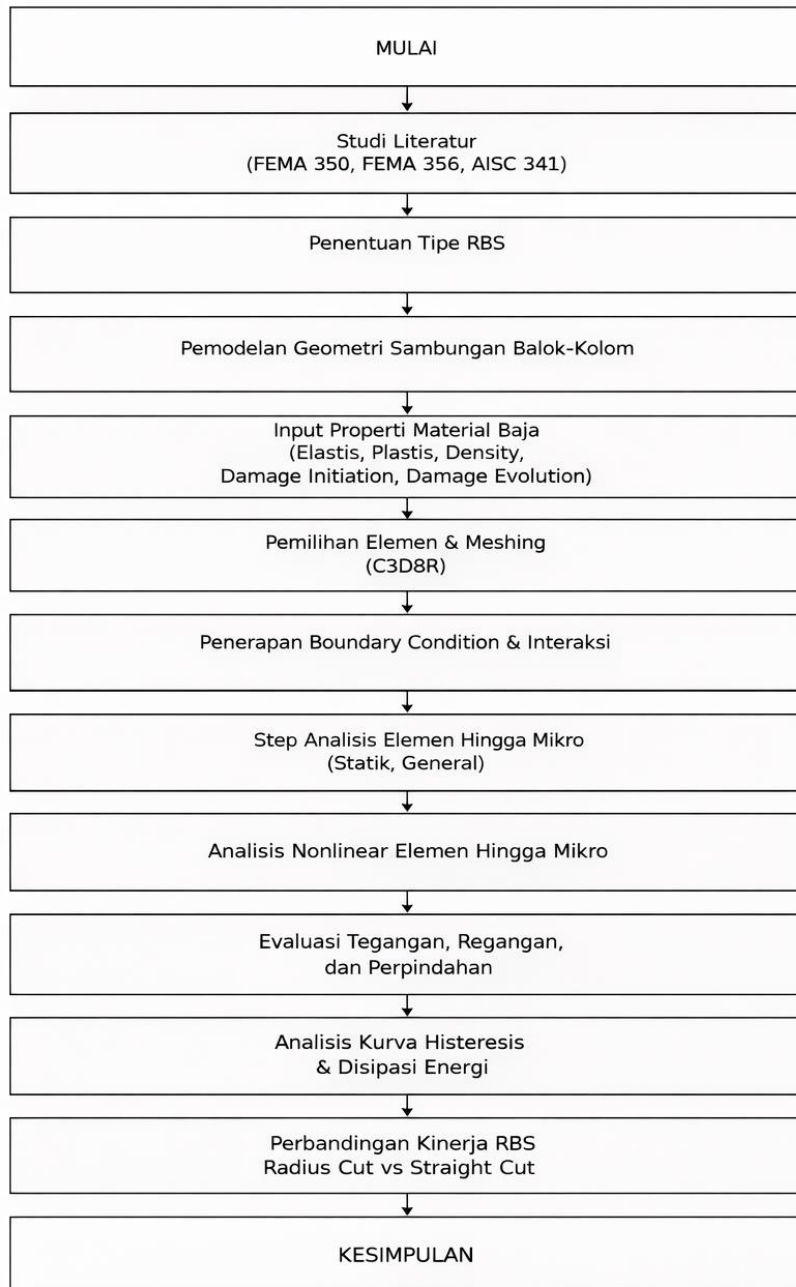
3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang dibuat sama atau konstan agar tidak mempengaruhi hasil penelitian. Variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi:

- Mutu material baja
- Dimensi balok dan kolom
- Model sambungan
- Ukuran mesh
- Boundary condition
- Pembebanan siklik
- Jarak pemotongan RBS
- Panjang balok dan kolom

3.6 Tahapan Pemodelan Menggunakan Elemen Hingga (FEM)

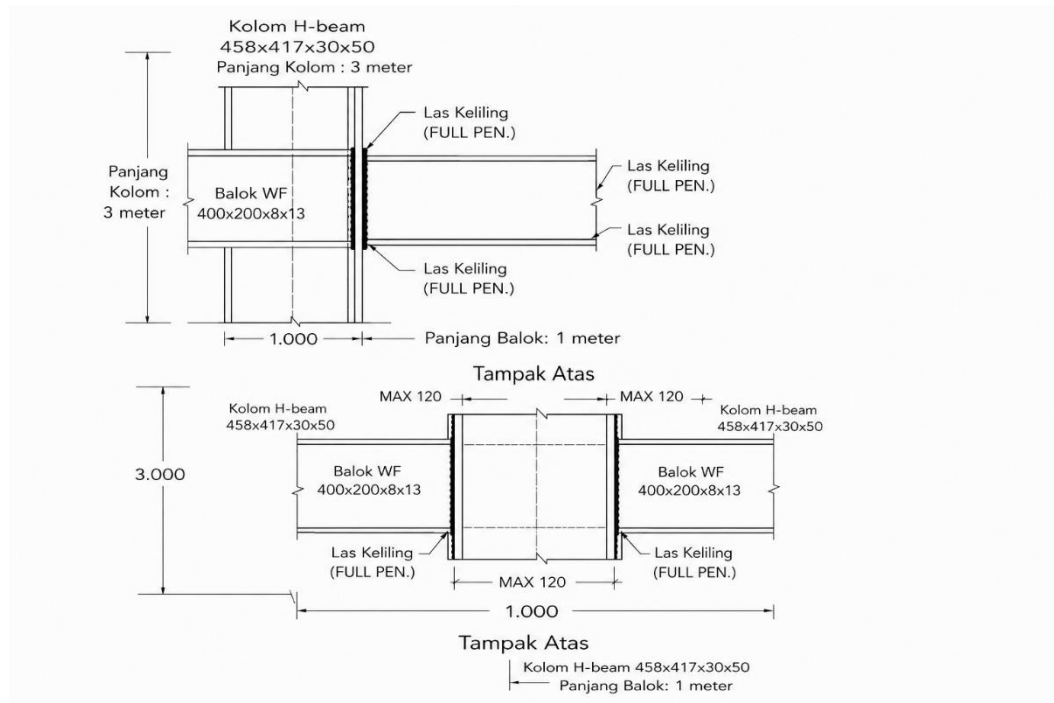
FLOWCHART METODOLOGI SIMULASI ELEMEN HINGGA MIKRO SAMBUNGAN RBS



Gambar 3. 4 Diagram Alir Analisis

3.6.1 Dimensi Penampang Balok dan Kolom

Pada penelitian ini, elemen struktur yang dimodelkan terdiri dari balok dan kolom baja dengan jenis dan mutu material yang sama, yaitu baja struktural BJ 41. Pemilihan baja BJ 41 didasarkan pada penggunaannya yang umum pada struktur bangunan baja di Indonesia serta memiliki sifat mekanik yang cukup baik untuk menahan beban siklik akibat gempa.



Gambar 3. 5 Sambungan balok-Kolom benda uji

Kolom yang digunakan adalah profil H-beam $458 \times 417 \times 30 \times 50$ dengan tinggi total 3.000 mm, sedangkan balok yang digunakan adalah profil WF $400 \times 200 \times 8 \times 13$ dengan panjang total 1.000 mm. Panjang balok dan tinggi kolom tersebut ditetapkan untuk merepresentasikan bagian elemen struktur di sekitar sambungan yang mengalami pengaruh langsung akibat pembebanan siklik.

Balok dihubungkan ke kolom menggunakan sistem sambungan las penuh (full penetration weld) yang dilengkapi dengan pelat sambung dan stiffener. Sambungan ini direncanakan sebagai sambungan momen penuh, sehingga mampu mentransfer momen lentur dan gaya geser dari balok ke kolom secara efektif.

Pada bagian balok, dilakukan reduksi penampang pada daerah sayap balok untuk membentuk RBS. Pada tipe radius cut, pengurangan lebar sayap balok dibuat dengan bentuk lengkung sehingga transisi reduksi penampang berlangsung lebih halus dan konsentrasi tegangan dapat diminimalkan. Sementara itu, pada tipe straight cut, reduksi lebar sayap balok dilakukan dengan potongan lurus, yang menghasilkan perubahan penampang secara lebih tajam dibandingkan radius cut.

Kedua tipe RBS ditempatkan pada jarak tertentu dari muka kolom dengan tujuan memindahkan lokasi terbentuknya sendi plastis menjauh dari daerah sambungan. Dengan demikian, kerusakan akibat pembebanan gempa diharapkan terjadi pada daerah balok yang telah direduksi, bukan pada kolom atau daerah sambungan las.

Untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan daerah sambungan, dipasang stiffener pada sayap kolom di sekitar pertemuan balok dan kolom. Stiffener ini berfungsi untuk memperkuat daerah transfer gaya, mencegah deformasi lokal pada kolom, serta membantu distribusi tegangan yang lebih merata.

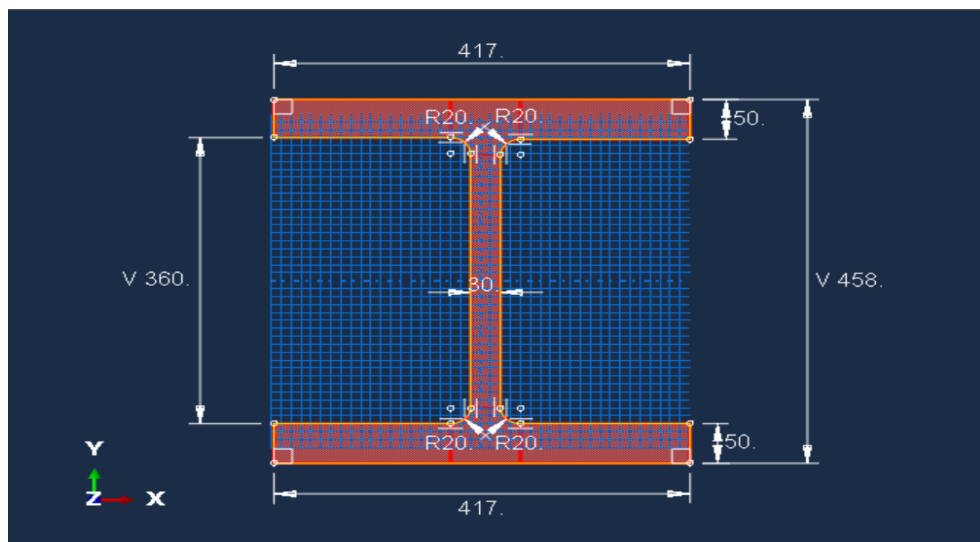
Dimensi pelat sambung, stiffener, serta zona RBS ditentukan berdasarkan ukuran penampang balok dan kolom serta kebutuhan kekuatan sambungan. Dengan konfigurasi geometri dan dimensi seperti yang ditunjukkan pada gambar, sambungan balok–kolom dengan RBS radius cut dan straight cut dapat dianalisis dan dibandingkan kinerjanya dalam penelitian ini.

Material baja BJ 41 pada balok dan kolom dimodelkan sebagai material elastis–plastis dengan pendekatan bilinear kinematic hardening. Selain itu, parameter density, damage initiation, dan damage evolution juga dimasukkan ke dalam pemodelan untuk merepresentasikan perilaku kerusakan material akibat akumulasi regangan plastis selama pembebanan siklik.

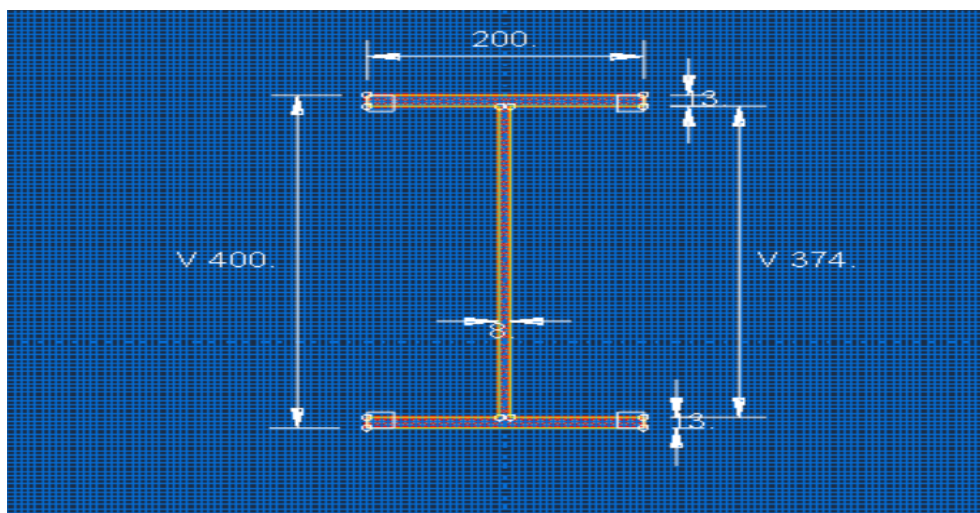
Dengan penggunaan profil balok dan kolom serta mutu material yang sama, diharapkan hasil analisis dapat menunjukkan perbedaan perilaku struktur yang lebih dipengaruhi oleh bentuk RBS, yaitu radius cut dan straight cut, tanpa dipengaruhi oleh perbedaan sifat material. Dengan disamakannya parameter profil dan mutu material, maka variabel yang diteliti dalam penelitian ini hanya terfokus pada perbedaan geometri Reduced Beam Section (RBS), sehingga hasil perbandingan yang diperoleh menjadi lebih objektif dan dapat menggambarkan pengaruh bentuk RBS terhadap kinerja struktur secara lebih akurat.

Melalui analisis elemen hingga yang dilakukan, perilaku struktur dapat diamati berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu distribusi tegangan, distribusi regangan, perpindahan maksimum, pola leleh yang terjadi, serta kemampuan disipasi energi yang ditunjukkan melalui kurva histeresis. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi kinerja sambungan balok–kolom dengan variasi bentuk RBS dalam menerima pembebanan siklik.

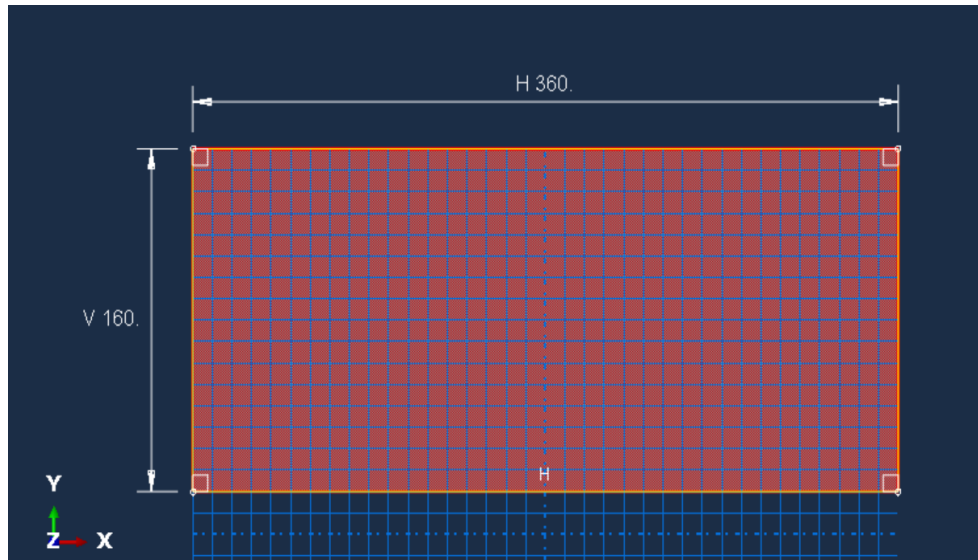
Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya membandingkan nilai hasil analisis secara numerik, tetapi juga menganalisis mekanisme perilaku struktur yang terjadi, seperti lokasi terbentuknya sendi plastis, penyebaran tegangan dan regangan, serta kestabilan kurva histeresis yang dihasilkan.



a)



b)



c)

Gambar 3. 6 : a) Dimensi Kolom, b) Dimensi Balok , c) Dimensi Stiffner.

3.6.2 Variabel Penelitian Sambungan RBS

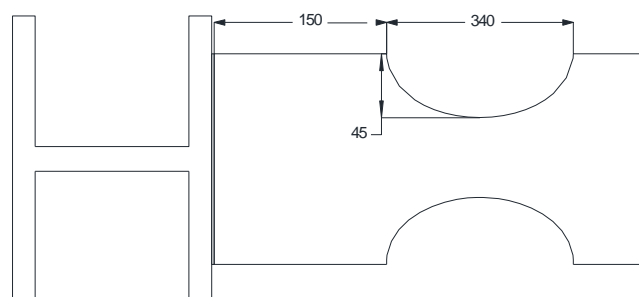
Variabel utama dalam penelitian ini adalah bentuk Reduced Beam Section (RBS), dengan dua variasi sebagai berikut:

a. RBS Tipe Radius Cut

RBS tipe radius cut merupakan bentuk pengurangan penampang balok dengan profil lengkung (radius) pada bagian sayap balok. Bentuk ini bertujuan untuk:

- Mengurangi konsentrasi tegangan secara bertahap
- Menghasilkan distribusi regangan plastis yang lebih merata
- Meningkatkan daktilitas sambungan

Radius pemotongan ditentukan sesuai rekomendasi FEMA 350, sehingga lokasi sendi plastis terbentuk pada daerah RBS dan bukan pada muka kolom.



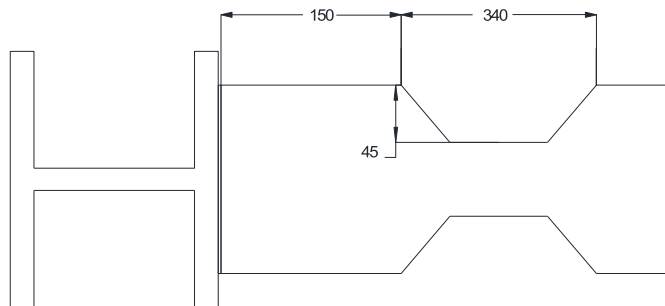
Gambar 3. 7 RBS Radius Cut

b. RBS Tipe Straight Cut

RBS tipe straight cut merupakan bentuk pengurangan penampang balok dengan potongan lurus pada sayap balok. Tipe ini memiliki geometri yang lebih sederhana dibandingkan radius cut, sehingga lebih mudah dalam pelaksanaan fabrikasi.

Namun, bentuk potongan lurus berpotensi menimbulkan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi pada sudut potongan, sehingga perlu dievaluasi lebih lanjut melalui analisis numerik untuk mengetahui:

- Perilaku plastis sambungan
- Kapasitas disipasi energi
- Pola keruntuhan yang terjadi akibat pembebanan siklik



Gambar 3. 8 RBS Straight Cut

3.6.3 Tujuan Perbandingan Radius Cut dan Straight Cut

Perbandingan antara RBS tipe radius cut dan straight cut dilakukan untuk mengevaluasi:

1. Distribusi tegangan Von Mises
2. Pola regangan plastis
3. Perilaku kurva histeresis
4. Besar perpindahan lateral maksimum
5. Kapasitas disipasi energi
6. Mekanisme keruntuhan sambungan

Hasil perbandingan ini menjadi dasar penentuan tipe RBS yang memiliki kinerja paling optimal terhadap pembebanan siklik sesuai standar SRPMK.

3.6.4 Pemodelan dan Analisis Sambungan RBS Menggunakan Perangkat Lunak Berbasis Elemen Hingga Mikro

Pada penelitian ini, analisis numerik sambungan balok–kolom Reduced Beam Section (RBS) dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga mikro dengan pendekatan analisis nonlinier statik (Static, General). pemilihan elemen hingga mikro didasarkan pada karakteristik pembebanan yang bersifat quasi-static siklik, sehingga lebih sesuai dibandingkan elemen hingga yang umumnya digunakan untuk analisis dinamik kecepatan tinggi atau impak.

Analisis dilakukan untuk mengevaluasi perilaku struktur sambungan RBS akibat pembebanan siklik berulang hingga terjadi keruntuhan, sesuai dengan ketentuan FEMA 350, FEMA 356, FEMA 440, dan AISC 341.

3.6.5 Jenis Analisis pada Elemen Hingga Mikro

Jenis analisis yang digunakan adalah:

- Step Analysis : Static, General
- Time Period : 20
- Nonlinear Geometry (NLGEOM) : Aktif
- Increment Control : Automatic stabilization
- Loading Control : Displacement control

Analisis nonlinier mempertimbangkan:

- Nonlinieritas material (plastisitas baja)
- Nonlinieritas geometri (deformasi besar)
- Degradasi kekakuan akibat beban siklik

3.6.6 Pemodelan Geometri Sambungan

Model numerik terdiri dari:

- 1 (satu) kolom baja profil H-Beam
- 1 (satu) balok baja profil WF
- 4 (empat) Stiffnerr baja
- Sambungan balok–kolom dengan las penuh

- Variasi RBS:
 - Radius cut
 - Straight Cut

Panjang balok yaitu 1000 mm dibuat cukup untuk memastikan terbentuknya sendi plastis pada daerah RBS, bukan pada muka kolom, sesuai konsep strong column–weak beam.

3.6.7 Definisi Parameter Material pada Pemodelan Elemen Hingga Mikro

Material baja yang digunakan dalam penelitian ini dimodelkan sebagai material elastis–plastis nonlinier dengan pendekatan bilinear kinematic hardening. Pemodelan ini dipilih karena mampu menggambarkan perilaku baja struktur yang mengalami pembebanan bolak-balik, khususnya pada sambungan balok–kolom dengan Reduced Beam Section (RBS).

Pada tahap awal pembebanan, material baja masih berada pada kondisi elastis, di mana hubungan antara tegangan dan regangan masih bersifat linier. Pada kondisi ini, material akan kembali ke bentuk semula apabila beban dilepaskan. Namun, ketika tegangan yang terjadi telah melampaui tegangan leleh, material akan memasuki kondisi plastis dan mengalami deformasi permanen.

Perilaku plastis baja dimodelkan menggunakan pendekatan bilinear, yaitu dengan mengasumsikan bahwa hubungan tegangan–regangan setelah leleh masih bersifat linier, tetapi dengan kemiringan yang lebih kecil dibandingkan daerah elastis. Kemiringan pada daerah plastis ini dikenal sebagai modulus pengerasan plastis. Pendekatan bilinear digunakan karena lebih sederhana dan cukup stabil untuk analisis nonlinier statik, serta banyak digunakan dalam penelitian sambungan baja dengan pembebanan siklik.

Model pengerasan yang digunakan adalah kinematic hardening, di mana permukaan luluh material akan bergeser seiring dengan bertambahnya regangan plastis, tanpa mengalami perubahan ukuran. Model ini dinilai lebih sesuai untuk analisis pembebanan siklik karena mampu menangkap penurunan tegangan leleh pada saat pembebanan balik, yang dikenal sebagai efek Bauschinger.

Parameter elastis material baja yang digunakan meliputi modulus elastisitas dan rasio Poisson. Sementara itu, parameter plastis ditentukan berdasarkan nilai tegangan leleh dan regangan plastis yang merepresentasikan kondisi pasca-leleh. Nilai

modulus pengerasan plastis diambil sebagai persentase kecil dari modulus elastisitas baja agar model tetap stabil secara numerik.

Dengan menggunakan model material elastis–plastis bilinear dengan kinematic hardening ini, diharapkan perilaku siklik sambungan RBS dapat dimodelkan secara lebih realistis, terutama dalam hal pembentukan sendi plastis, degradasi kekakuan, serta kemampuan struktur dalam mendisipasikan energi akibat pembebanan berulang.

1. Perilaku Elastis (Elastic)

Perilaku elastis merupakan kondisi material ketika mengalami deformasi sementara akibat pembebanan dan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan. Pada tahap ini, hubungan antara tegangan dan regangan bersifat linier dan mengikuti Hukum Hooke.

Tabel 3. 6 Material elastis

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas	E	210.000	MPa
Rasio Poisson	N	0,30	-

Parameter elastis material baja dalam Elemen Hingga Mikro didefinisikan oleh:

- Modulus elastisitas (E), yang menunjukkan kekakuan material
- Rasio Poisson (ν), yang menggambarkan hubungan regangan lateral dan longitudinal

Perilaku elastis berlaku hingga tegangan mencapai tegangan leleh (yield stress).

2. Perilaku Plastis (Plastic)

Perilaku plastis adalah kondisi ketika material telah melewati batas elastis dan mengalami deformasi permanen, sehingga tidak dapat kembali ke bentuk awal meskipun beban dilepaskan.

Dalam Elemen Hingga Mikro, perilaku plastis baja dimodelkan menggunakan:

- Kriteria luluh Von Mises
- Hubungan tegangan plastis – regangan plastis

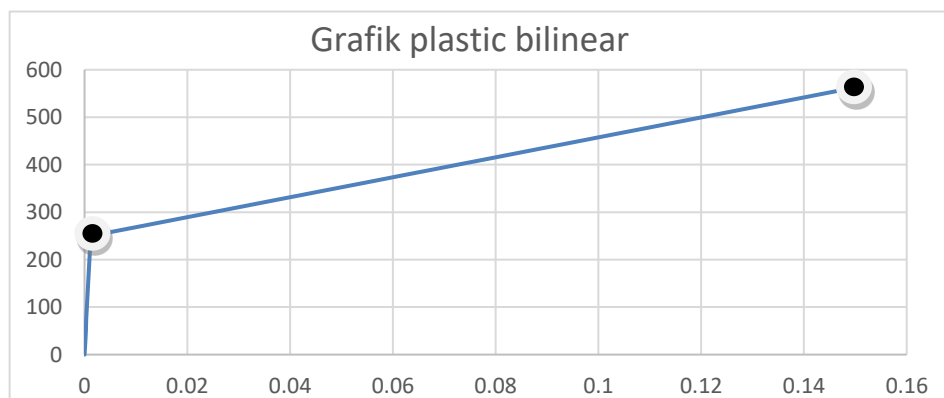
Perilaku plastis memungkinkan terbentuknya sendi plastis pada daerah Reduced Beam Section (RBS), yang merupakan mekanisme utama disipasi energi pada struktur tahan gempa.

3. Perilaku Plastis Bilinear

Setelah mencapai tegangan leleh, material memasuki daerah plastis yang dimodelkan secara linier dengan kemiringan kurva yang lebih kecil dibandingkan daerah elastis. Kemiringan ini disebut sebagai modulus pengerasan plastis (hardening modulus, H).

Tabel 3. 7 Material Plastis Bilinear

Tegangan Leleh	Regangan Plastis
$f_y = 250 \text{ MPa}$	0,000
562.5 MPa	0,015



Gambar 3. 9 Grafik Plastic Bilinear

Keterangan:

- Titik pertama = awal leleh
- Titik kedua = kondisi pasca-leleh (strain hardening)
- Kemiringan kurva kedua menunjukkan hardening modulus (H)

Pendekatan bilinear ini menyederhanakan kurva tegangan–regangan aktual baja namun tetap mampu menggambarkan:

- Deformasi plastis permanen
- Penurunan kekakuan setelah leleh
- Akumulasi regangan plastis akibat pembebanan siklik

4. Kinematic Hardening

Kinematic hardening merupakan model pengerasan plastis di mana permukaan luluh (yield surface) mengalami pergeseran (translation) seiring dengan bertambahnya regangan plastis, tanpa perubahan ukuran.

Pendekatan ini sangat sesuai untuk analisis siklik karena:

- Mampu menangkap penurunan tegangan leleh pada pembebanan balik
- Mewakili fenomena Bauschinger effect
- Menghasilkan kurva histeresis yang realistis

Oleh karena itu, kinematic hardening lebih tepat digunakan dibandingkan isotropic hardening untuk analisis sambungan RBS yang mengalami beban gempa bolak-balik.

Tabel 3. 8 Material Kinematic hardening

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Modulus Pengerasan Plastis	H	2.500	MPa
Jenis Hardening	–	Kinematic	–

Nilai H 2500 Mpa tersebut diambil sebesar sekitar 1–2% dari modulus elastisitas baja, sesuai praktik umum pemodelan baja struktur untuk analisis siklik.

5. Implementasi Kinematic Hardening Bilinear di Elemen Hingga Mikro

Dalam Elemen Hingga Mikro, material didefinisikan sebagai berikut:

1. Elastic → E dan ν
2. Plastic → pasangan nilai tegangan–regangan plastis bilinear
3. Hardening Rule → *Kinematic hardening*

Kurva bilinear ditentukan oleh:

- Tegangan leleh awal (f_y)
- Regangan plastis awal ($\epsilon_p = 0$)
- Modulus pengerasan pasca-leleh (H)

Contoh Kurva Tegangan–Regangan Bilinear

- elastis:
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{3.1}$$

- plastis:
$$\sigma = f_y + H \cdot \varepsilon_p \tag{3.2}$$

di mana:

- σ = tegangan
- ε = regangan total
- ε_p = regangan plastis

6. Massa Jenis (Density)

Density atau massa jenis merupakan parameter material yang menyatakan massa per satuan volume material. Dalam analisis Elemen Hingga Mikro, density digunakan untuk:

- Perhitungan massa struktur
- Stabilitas numerik analisis
- Analisis dinamik (jika digunakan)

Untuk analisis statik nonlinier (Static, General), density tidak mempengaruhi hasil secara langsung, namun tetap diperlukan untuk konsistensi model material.

Tabel 3. 9 Material Massa Jenis (Density)

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa Jenis	P	7.850	kg/m ³

7. Damage (Kerusakan Material)

Damage merupakan kondisi degradasi material akibat akumulasi deformasi plastis yang menyebabkan penurunan kekakuan dan kekuatan material. Damage digunakan untuk memodelkan awal terjadinya keruntuhan material secara bertahap.

Dalam Elemen Hingga Mikro, damage tidak langsung menyebabkan kegagalan elemen, tetapi merepresentasikan penurunan kemampuan material menahan beban.

8. Damage Initiation – Ductile Damage

Ductile damage initiation merupakan kriteria awal terjadinya kerusakan material akibat regangan plastis yang besar, khususnya pada material yang bersifat duktail seperti baja.

Kriteria ini bergantung pada:

- Regangan plastis ekuivalen
- Kondisi tegangan (stress triaxiality)

Pada sambungan RBS, ductile damage initiation digunakan untuk mendeteksi awal kerusakan pada daerah plastis sebelum terjadi keruntuhan total.

9. Damage Evolution (Evolusi Kerusakan)

Damage evolution menggambarkan perkembangan kerusakan material setelah damage initiation terjadi. Parameter ini mengatur bagaimana material kehilangan kekuatan dan kekakuannya secara bertahap hingga mencapai kegagalan.

Dalam Elemen Hingga Mikro, damage evolution dapat didefinisikan berdasarkan:

- Regangan plastis
- Energi disipasi (fracture energy)

Damage evolution sangat penting untuk memodelkan proses keruntuhan progresif akibat pembebanan siklik.

10. Hubungan Damage dengan Keruntuhan Sambungan

Kombinasi antara:

- Perilaku elastis
- Perilaku plastis
- Damage initiation
- Damage evolution

memungkinkan simulasi:

- Terbentuknya sendi plastis
- Degradasi kekakuan siklik

- Penurunan kapasitas struktur
- Mekanisme keruntuhan sambungan RBS sesuai FEMA dan AISC

3.6.8 Perilaku Tegangan–Regangan Baja

Material baja dimodelkan sebagai elastis–plastis nonlinier dengan kriteria luluh Von Mises dan pengerasan isotropik (Kinematik hardening).

Hubungan tegangan–regangan mengikuti kurva true stress–true strain, yang terdiri dari:

1. Daerah elastis linier
2. Titik leleh (yield)
3. Daerah plastis dengan strain hardening
4. Deformasi plastis besar hingga mendekati keruntuhan

Perilaku ini memungkinkan:

- Terbentuknya sendi plastis
- Degradasi kekakuan akibat siklik
- Simulasi daktilitas baja secara realistis

Tabel 3. 10 Parameter Material Baja

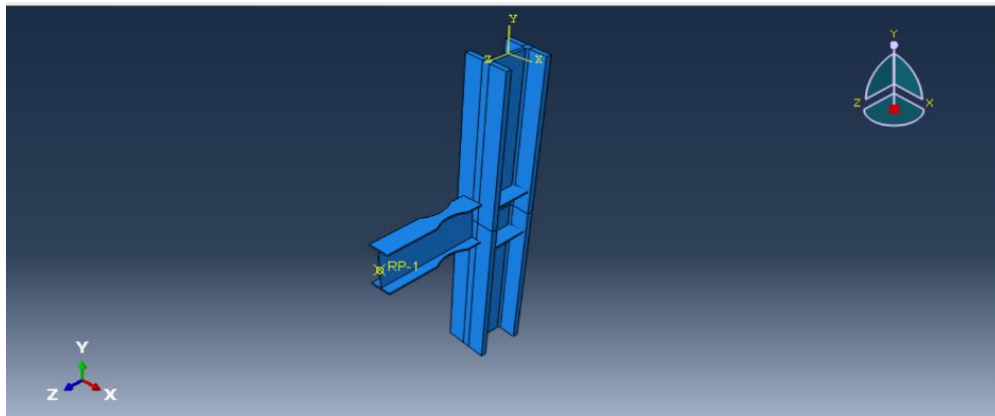
Parameter Material	Nilai
Modulus Elastisitas, E	210000 MPa
Rasio Poisson, ν	0,3
Tegangan Leleh, f_y	250 MPa
Tegangan Ultimit, f_u	562,5 MPa
Regangan leleh	0,15
Beban Aksial	- 41000 N
Hardening	Kinematik

3.6.9 Tahap Assembly Model Sambungan RBS

Tahap assembly merupakan tahapan perakitan seluruh komponen struktur yang telah dimodelkan sebelumnya pada modul *Part* di Elemen Hingga Mikro. Pada tahap ini, elemen balok dan kolom disatukan untuk membentuk model sambungan balok–kolom yang utuh sesuai dengan konfigurasi penelitian.

Assembly dilakukan untuk dua tipe sambungan Reduced Beam Section (RBS), yaitu RBS radius cut dan RBS straight cut. Perbedaan kedua model hanya terletak pada bentuk pengurangan penampang balok, sedangkan dimensi balok, kolom, dan posisi sambungan dibuat sama untuk menjaga konsistensi hasil analisis.

1. Assembly Sambungan RBS Radius Cut



Gambar 3. 10 Assembly RBS Radius Cut

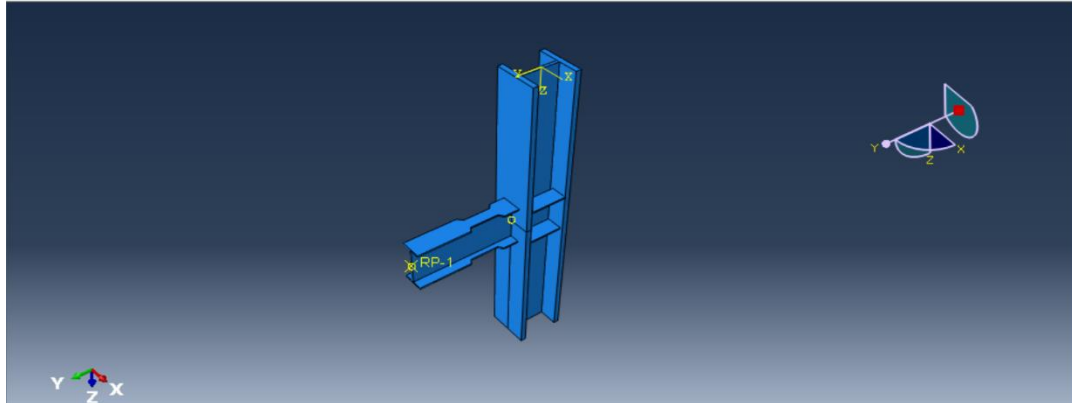
Pada model RBS radius cut, balok yang telah dimodifikasi dengan potongan berbentuk lengkung pada kedua sayap balok dirakit dengan kolom baja profil WF. Posisi balok diatur sedemikian rupa sehingga sumbu balok sejajar dengan sumbu kolom dan ujung balok tepat berada pada muka kolom.

Setelah posisi balok dan kolom sesuai, sambungan antara balok dan kolom dimodelkan sebagai sambungan las penuh dengan menggunakan fitur tie constraint. Pendekatan ini mengasumsikan bahwa tidak terjadi slip maupun pemisahan antara balok dan kolom selama pembebanan.

Pemodelan ini bertujuan agar perilaku inelastik terfokus pada daerah RBS, sehingga keruntuhan tidak terjadi pada daerah sambungan balok–kolom. Selanjutnya, pembebanan diberikan dalam bentuk *displacement control* pada ujung balok secara siklik untuk memperoleh kurva histeresis dan nilai disipasi energi struktur. Dengan

konfigurasi ini, diharapkan sendi plastis terbentuk pada daerah RBS yang telah direncanakan.

2. Assembly Sambungan RBS Straight Cut



Gambar 3. 11 Assembly RBS Straight Cut

Tahap assembly pada model RBS straight cut dilakukan dengan prosedur yang sama seperti pada model radius cut. Balok dengan potongan lurus pada sayap balok dirakit dengan kolom baja pada posisi yang sama dan dengan orientasi yang identik.

Sambungan balok dan kolom juga dimodelkan menggunakan tie constraint, sehingga kondisi sambungan diasumsikan kaku dan mampu menyalurkan gaya secara penuh. Dengan demikian, perbedaan perilaku struktur yang terjadi pada analisis selanjutnya diharapkan hanya dipengaruhi oleh bentuk RBS, yaitu potongan lurus pada balok.

3.6.10 Tahap Meshing Model Sambungan RBS

Tahap meshing merupakan proses pendiskritan model struktur menjadi elemen-elemen hingga yang lebih kecil agar perilaku struktur dapat dianalisis secara numerik menggunakan metode elemen hingga. Kualitas dan ukuran mesh sangat berpengaruh terhadap ketelitian hasil analisis, khususnya pada daerah yang mengalami konsentrasi tegangan dan regangan plastis.

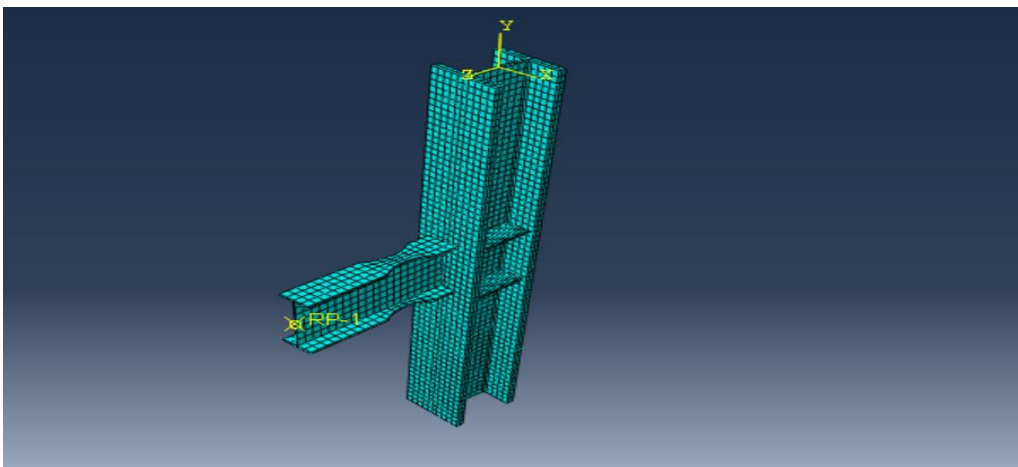
Pada penelitian ini, ukuran mesh dibuat seragam pada seluruh bagian model. Penggunaan ukuran mesh yang sama bertujuan untuk menjaga konsistensi hasil analisis serta memastikan bahwa perbandingan perilaku struktur antara model radius cut dan straight cut tidak dipengaruhi oleh perbedaan ukuran mesh. Dengan demikian, hasil analisis yang diperoleh dapat dibandingkan secara lebih objektif karena kedua model menggunakan tingkat ketelitian mesh yang sama pada seluruh bagian struktur.

1. Meshing pada Sambungan RBS Radius Cut

Proses meshing pada model RBS radius cut dilakukan dengan menggunakan ukuran elemen yang berbeda pada beberapa bagian struktur, yaitu balok, kolom, dan stiffener, menyesuaikan dengan dimensi dan kebutuhan pemodelan. Meskipun demikian, pada daerah sambungan balok–kolom dan area Reduced Beam Section (RBS), ukuran mesh dibuat sama dan tidak lebih halus dibandingkan bagian lainnya.

Penggunaan ukuran mesh yang sama pada daerah sambungan bertujuan untuk menjaga konsistensi hasil analisis serta menghindari pengaruh perbedaan kerapatan elemen terhadap distribusi tegangan, regangan plastis (PEEQ), perpindahan, dan disipasi energi. Dengan demikian, respons struktur yang diperoleh benar-benar dipengaruhi oleh bentuk geometri RBS radius cut, bukan oleh perbedaan ukuran mesh pada daerah kritis.

Pemodelan elemen hingga pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga mikro, sehingga pengaturan mesh yang seragam pada daerah sambungan memastikan bahwa hasil simulasi dapat merepresentasikan perilaku struktur secara stabil di bawah pembebanan siklik.

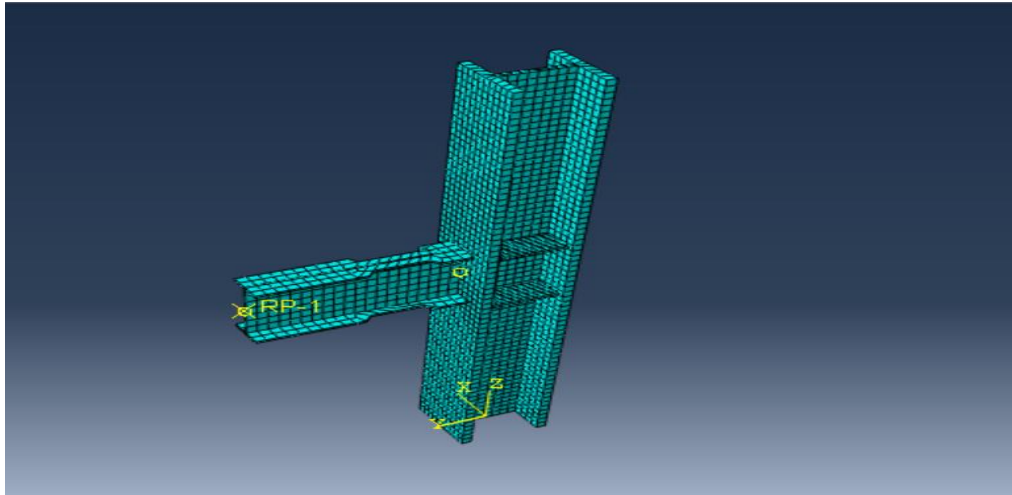


Gambar 3. 12 Mesh Radius Cut

2. Meshing pada Sambungan RBS Straight Cut

Proses meshing pada model RBS straight cut dilakukan dengan prinsip yang sama seperti pada model radius cut. Penggunaan ukuran mesh yang sama pada daerah sambungan dilakukan agar perbandingan antara model radius cut dan straight cut dapat dilakukan secara objektif. Dengan kondisi mesh yang sama pada area kritis, perbedaan hasil analisis seperti distribusi tegangan, regangan plastis, kurva histeresis, dan disipasi energi sepenuhnya disebabkan oleh perbedaan bentuk geometri RBS, bukan karena perbedaan ukuran elemen hingga.

Simulasi dilakukan menggunakan elemen hingga mikro sehingga keseragaman mesh pada daerah sambungan memastikan bahwa hasil analisis kedua model dapat dibandingkan secara langsung dalam evaluasi perilaku siklik sambungan balok–kolom.



Gambar 3. 13 Mesh Straight Cut

3.6.11 Boundary Condition dan Kontak

Boundary condition diterapkan sebagai berikut:

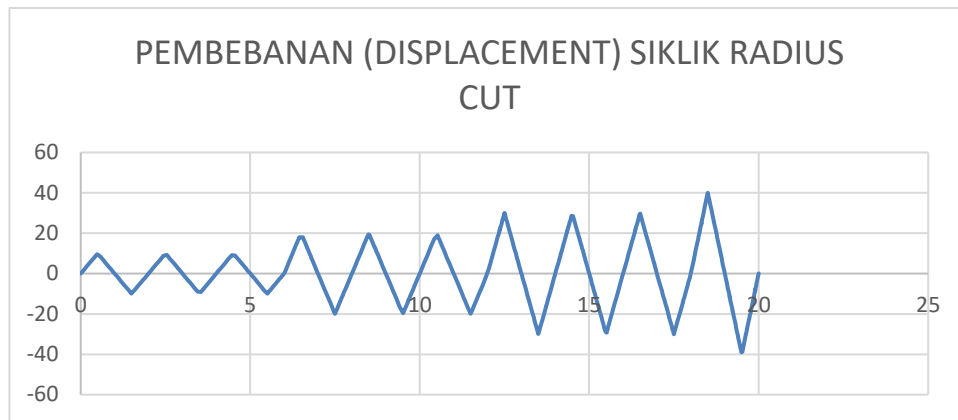
- Ujung bawah kolom: Pinned support (Sendi)
- Ujung atas kolom: translasi lateral dibatasi (Rol)
- Ujung atas kolom: diberikan beban aksial Sebesar -41000 N
- Ujung balok: diberi kontrol perpindahan displacement siklik

Sambungan las dimodelkan menggunakan tie constraint, yang mengasumsikan tidak terjadi slip maupun kegagalan las.

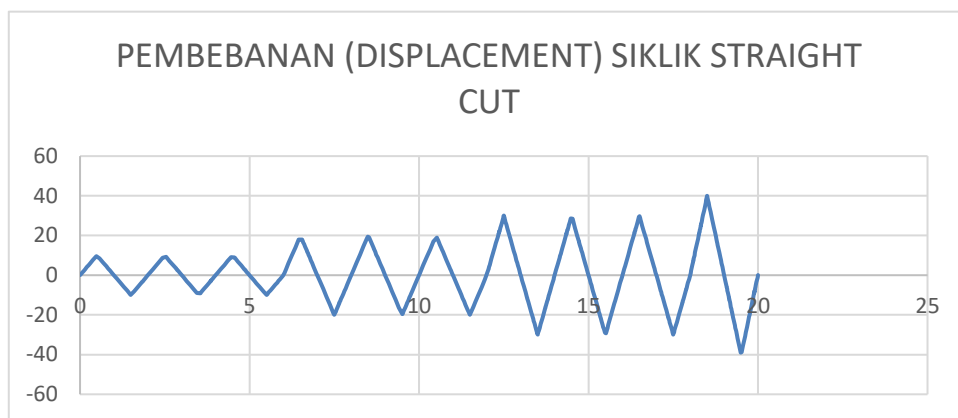
3.6.12 Pembebanan Siklik

Pembebanan pada model sambungan balok–kolom dilakukan secara siklik terkontrol perpindahan (displacement-controlled cyclic loading) untuk merepresentasikan respons struktur akibat beban gempa. Pembebanan diterapkan pada ujung balok dengan arah bolak-balik (positif dan negatif) sesuai dengan pola pembebanan yang telah ditentukan.

Pada penelitian ini, amplitudo perpindahan maksimum yang diberikan sebesar 40 mm dengan jumlah 3 siklus pembebanan. Setiap siklus terdiri dari pembebanan ke arah positif hingga mencapai perpindahan maksimum, kemudian diikuti pembebanan ke arah negatif dengan besar perpindahan yang sama, sehingga membentuk satu siklus penuh.



Gambar 3. 14 Pembebanan Displacement Siklik Radius Cut



Gambar 3. 15 Pembebanan Displacement Siklik Straight Cut

Pembebanan siklik tersebut diterapkan secara seragam pada sambungan RBS tipe radius cut dan RBS tipe straight cut, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.14 dan Gambar 3.15. Gambar 3.14 memperlihatkan penerapan pembebanan siklik pada sambungan RBS radius cut, sedangkan Gambar 3.15 menunjukkan penerapan pembebanan siklik pada sambungan RBS straight cut.

Penerapan pola pembebanan yang sama pada kedua tipe sambungan bertujuan untuk memastikan bahwa perbedaan respons struktur yang dihasilkan semata-mata disebabkan oleh perbedaan geometri/tipe potongan RBS, bukan akibat variasi pola atau besaran pembebanan. Dengan demikian, perbandingan perilaku histeresis, distribusi regangan plastis, kapasitas deformasi, serta kemampuan disipasi energi antara sambungan radius cut dan straight cut dapat dilakukan secara objektif dan konsisten.

BAB IV

PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisa elemen hingga pada sambungan balok–kolom dengan Reduced Beam Section (RBS) tipe radius cut dan straight cut yang diberi pembebanan siklik. Pembahasan difokuskan pada respons struktur terhadap pembebanan, meliputi perilaku perpindahan, distribusi tegangan dan regangan plastis, Kurva Histeresis, serta kemampuan disipasi energi.

4.1 Umum

Analisis dilakukan terhadap dua model sambungan, yaitu sambungan dengan RBS radius cut dan sambungan dengan RBS straight cut. Kedua model dimodelkan dengan dimensi balok dan kolom yang sama, material baja BJ 41, serta kondisi pembebanan dan batasan yang identik. Dengan demikian, perbedaan respons struktur yang terjadi diharapkan hanya dipengaruhi oleh perbedaan bentuk RBS.

Output utama yang dianalisis pada bab ini meliputi:

- Perpindahan (displacement)
- Tegangan von Mises
- Regangan plastis ekuivalen (PEEQ)
- Disipasi Energi
- Kurva histeresis gaya–perpindahan

Pembebanan pada penelitian ini menggunakan metode kontrol perpindahan (displacement control) yang diberikan pada ujung balok. Metode ini digunakan untuk mensimulasikan pengaruh beban gempa terhadap struktur, dimana beban gempa menyebabkan struktur mengalami perpindahan lateral (drift), bukan hanya menerima beban gaya statik. Oleh karena itu, dalam analisis perilaku siklik sambungan balok–kolom, pembebanan lebih tepat dimodelkan dalam bentuk perpindahan yang dikontrol.

Berdasarkan ketentuan pada SNI 1726:2019, pengaruh gempa rencana pada struktur dinyatakan dalam bentuk simpangan antar lantai (story drift). Hal ini menunjukkan bahwa kinerja struktur terhadap gempa dievaluasi berdasarkan kemampuan struktur dalam mengalami deformasi atau perpindahan lateral tanpa mengalami keruntuhan.

Selain itu, mengacu pada SNI 1727 - 2020, sambungan balok–kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) harus mampu mengalami deformasi inelastik yang besar melalui mekanisme leleh pada balok (strong column–weak beam). Oleh karena itu, pembebanan siklik dengan kontrol perpindahan hingga target displacement tertentu digunakan untuk memastikan bahwa sambungan memiliki daktilitas dan kemampuan disipasi energi yang baik saat menerima beban gempa.

Nilai perpindahan maksimum yang diterapkan pada ujung balok adalah sebesar 40 mm dengan pola pembebanan siklik. Pemberian beban perpindahan pada ujung balok ini bertujuan untuk melihat perilaku sambungan balok–kolom, khususnya pada daerah Reduced Beam Section (RBS), terhadap deformasi siklik serta untuk mengetahui pola leleh, distribusi tegangan, distribusi regangan plastis, dan kemampuan disipasi energi dari masing-masing model sambungan.

Dengan penempatan beban perpindahan pada ujung balok, maka rotasi plastis diharapkan terjadi pada daerah RBS sehingga mekanisme strong column–weak beam dapat tercapai dan keruntuhan tidak terjadi pada daerah kolom maupun daerah sambungan las.

4.2 Distribusi Perpindahan

Analisis perpindahan dilakukan untuk mengetahui respons deformasi struktur akibat pembebanan yang diberikan. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga mikro dengan metode elemen hingga. Parameter perpindahan yang dianalisis adalah displacement total (U, Magnitude) pada arah Lokal.

Perpindahan maksimum diperoleh dari hasil analisis elemen hingga mikro pada ujung balok. Untuk mengevaluasi tingkat deformasi, digunakan rasio drift sebagai berikut:

$$\delta = \Delta / L \tag{4.1}$$

Keterangan:

- δ = rasio drift
- Δ = perpindahan maksimum (mm)
- L = panjang balok (mm)

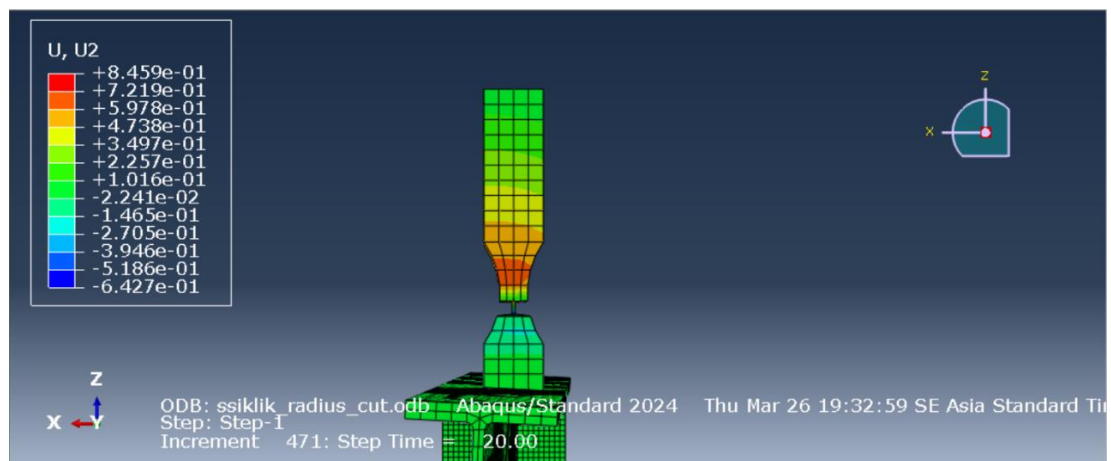
Pada penelitian ini, panjang balok sebesar 1000 mm, sehingga untuk perpindahan maksimum sebesar 40 mm, diperoleh:

$$\delta = \frac{40}{1000} = 0,04 = 4\% \quad (4.2)$$

Nilai drift sebesar 4% ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi inelastik struktur akibat pembebanan gempa dan sesuai dengan rekomendasi FEMA.

4.2.1 Perpindahan Sambungan RBS Tipe Radius Cut

Berdasarkan hasil analisis elemen hingga, distribusi perpindahan pada sambungan balok–kolom dengan tipe Reduced Beam Section (RBS) radius cut dapat dilihat pada Gambar 4.1. Kontur perpindahan (U, U-2) menunjukkan bahwa perpindahan maksimum terjadi pada ujung balok, yaitu pada titik pembebanan berupa reference point (RP) dengan displacement control sebesar ± 40 mm.



Gambar 4.1 Distribusi Perpindahan (U, U-2) Sambungan RBS Tipe Radius Cut

Sementara itu, berdasarkan hasil kontur perpindahan, nilai perpindahan pada daerah Reduced Beam Section (RBS) radius cut lebih kecil dibandingkan perpindahan pada ujung balok, yaitu sebesar 8,459 mm arah U-2, (sumbu – Y), sedangkan pada bagian kolom nilai perpindahan sangat kecil yaitu 0 mm. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi pada struktur bukan berupa translasi murni, melainkan berupa rotasi pada daerah sambungan balok–kolom. Sementara itu, perpindahan minimum bernilai 0 mm, yang terjadi pada bagian kolom. Hal ini menunjukkan bahwa kolom tetap berperilaku kaku dan deformasi lebih terkonsentrasi pada balok, sehingga prinsip *strong column–weak beam* dapat terpenuhi.

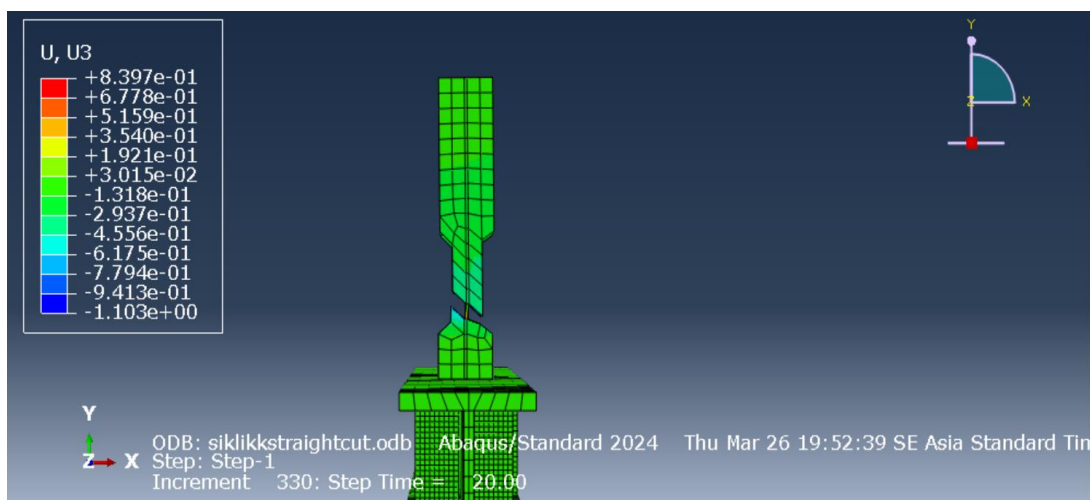
Perbedaan nilai perpindahan antara ujung balok dan daerah RBS menunjukkan bahwa telah terjadi rotasi plastis pada daerah RBS radius cut. Rotasi plastis ini menyebabkan ujung balok mengalami perpindahan yang besar.

sedangkan daerah sambungan yang lebih dekat dengan kolom mengalami perpindahan yang lebih kecil. Distribusi perpindahan ini menunjukkan bahwa deformasi terpusat pada daerah balok, khususnya pada daerah Reduced Beam Section, sehingga sendi plastis yang diharapkan terbentuk pada balok dapat tercapai.

Dengan demikian, sambungan RBS radius cut menunjukkan perilaku deformasi yang sesuai dengan konsep perencanaan struktur tahan gempa, dimana plastisitas terjadi pada balok dan kolom tetap dalam kondisi elastis (strong column–weak beam). Hal ini menunjukkan bahwa model RBS radius cut mampu mengarahkan lokasi sendi plastis menjauhi muka kolom dan meningkatkan kinerja struktur dalam menerima pembebanan siklik. Dengan demikian, perbedaan nilai perpindahan antara radius cut dan straight cut menunjukkan bahwa bentuk pengurangan penampang berpengaruh terhadap perilaku deformasi struktur pada pembebanan siklik.

4.2.2 Perpindahan Sambungan RBS Tipe Straight Cut

Berdasarkan hasil analisis elemen hingga, distribusi perpindahan pada sambungan balok–kolom dengan tipe Reduced Beam Section (RBS) straight cut dapat dilihat pada Gambar 4.2. Berdasarkan kontur perpindahan (U, Magnitude), terlihat bahwa perpindahan maksimum terjadi pada ujung balok pada titik pembebanan berupa reference point (RP) dengan displacement control sebesar ± 40 mm.



Gambar 4.2 Distribusi Perpindahan (U, U-3) Sambungan RBS Tipe Straight Cut

Sementara itu, Nilai perpindahan pada daerah *Reduced Beam Section* (RBS) *straight cut* tercatat sebesar 8,397 mm pada arah U-3 (sumbu $-Z$), yang menunjukkan respons deformasi yang lebih terkendali dibandingkan dengan model RBS *radius cut*. Nilai perpindahan yang lebih kecil ini mengindikasikan bahwa model *straight cut* memiliki kekakuan yang lebih baik dalam menahan deformasi akibat pembebanan siklik. Perilaku ini dipengaruhi oleh distribusi regangan plastis pada daerah

penampang tereduksi, dimana pada model *straight cut* deformasi cenderung terjadi secara efektif tanpa menyebabkan peningkatan perpindahan yang berlebihan.

Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi plastisitas pada daerah RBS, struktur masih mampu mempertahankan kestabilan deformasinya. Selain itu, perpindahan pada kolom tetap sangat kecil atau mendekati nol, yang menegaskan bahwa mekanisme struktur masih mengikuti konsep *strong column–weak beam*, dimana plastisitas terlokalisasi pada balok. Kondisi ini menunjukkan bahwa model *straight cut* tetap memenuhi kriteria desain tahan gempa.

Dengan demikian, nilai perpindahan yang lebih kecil pada model RBS *straight cut* menunjukkan bahwa deformasi struktur lebih terkendali, sehingga model ini dapat dikatakan lebih unggul dibandingkan model RBS *radius cut* dalam mengendalikan respons perpindahan akibat pembebanan siklik. Perbedaan ini menegaskan bahwa bentuk pengurangan penampang memiliki pengaruh signifikan terhadap perilaku deformasi struktur.

4.2.3 Perbandingan Perpindahan RBS Radius Cut dan RBS Straight Cut

Berdasarkan hasil analisis elemen hingga, distribusi perpindahan pada kedua model sambungan *Reduced Beam Section* (RBS), baik *radius cut* maupun *straight cut*, menunjukkan pola yang serupa, yaitu perpindahan maksimum terjadi pada ujung balok akibat pembebanan *displacement control*, sedangkan perpindahan pada kolom sangat kecil atau mendekati nol. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua model telah memenuhi konsep *strong column–weak beam*, dimana deformasi plastis terjadi pada balok dan bukan pada kolom.

Namun demikian, jika dibandingkan berdasarkan nilai perpindahan maksimum, model RBS *straight cut* menunjukkan nilai sebesar 8,397 mm, yang sedikit lebih kecil dibandingkan dengan model RBS *radius cut* sebesar 8,459 mm. Perbedaan nilai perpindahan ini menunjukkan bahwa model *straight cut* memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengendalikan deformasi struktur.

Nilai perpindahan yang lebih kecil pada model *straight cut* mengindikasikan bahwa kekakuan struktur relatif lebih tinggi dibandingkan dengan model *radius cut*. Dengan kekakuan yang lebih besar, deformasi yang terjadi menjadi lebih terkendali dan tidak mengalami peningkatan yang signifikan pada daerah tertentu. Sebaliknya, nilai perpindahan yang lebih besar pada model *radius cut* menunjukkan bahwa struktur cenderung mengalami deformasi yang lebih besar akibat pembebanan yang sama.

Dengan demikian, berdasarkan perbandingan nilai perpindahan, model RBS *straight cut* menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam hal kekakuan dan pengendalian deformasi dibandingkan dengan model RBS *radius cut*. Hal ini menegaskan bahwa bentuk pengurangan penampang berpengaruh terhadap respons deformasi struktur pada pembebanan siklik.

4.3 Distribusi Tegangan von Mises

Tegangan Von Mises merupakan kriteria kegagalan yang umum digunakan pada material duktal seperti baja struktural. Kriteria ini mempertimbangkan kombinasi tegangan normal dan geser yang bekerja secara multiaxial, sehingga mampu merepresentasikan kondisi tegangan yang terjadi secara nyata pada struktur.

Analisis tegangan Von Mises dilakukan untuk mengevaluasi perilaku plastis material pada sambungan balok–kolom dengan Reduced Beam Section (RBS).

Distribusi tegangan diperoleh dari simulasi numerik menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga mikro pada kondisi pembebanan maksimum.

Untuk mengevaluasi kondisi tegangan material baja, digunakan kriteria tegangan ekuivalen von Mises, yang dirumuskan sebagai:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_m} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.3)$$

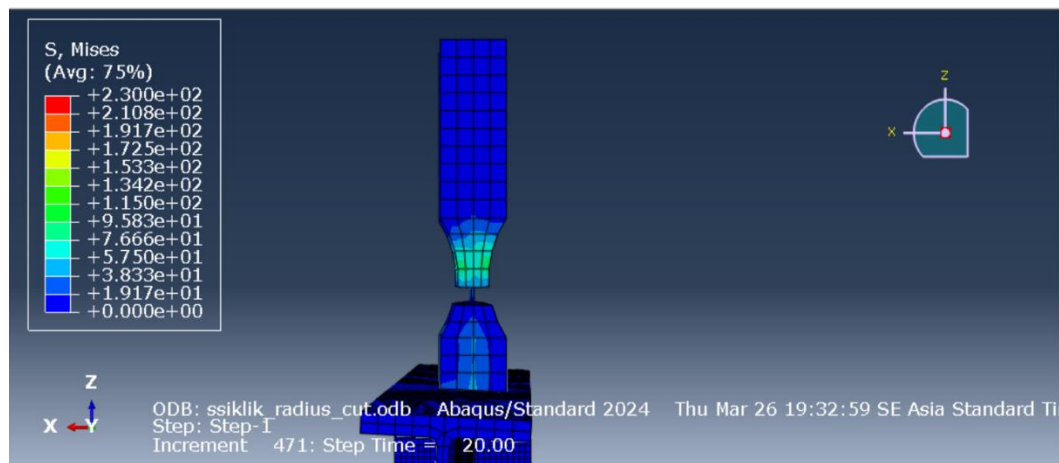
Keterangan:

- σ_{vm} = tegangan von Mises
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tegangan utama

Tegangan von Mises digunakan untuk menentukan apakah material telah memasuki kondisi leleh. Apabila nilai σ_{vm} melebihi tegangan leleh baja BJ 41, maka material dinyatakan telah berperilaku plastis.

4.3.1 Distribusi Tegangan Von Mises Model RBS Radius Cut

Berdasarkan hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada daerah Reduced Beam Section (RBS) dengan nilai sebesar 230 MPa, sedangkan tegangan minimum yang terjadi sebesar 0 MPa. Tegangan maksimum yang terjadi pada daerah RBS menunjukkan bahwa bagian tersebut merupakan lokasi konsentrasi tegangan akibat pengurangan luas penampang pada balok.



Gambar 4.3 Distribusi Tegangan Von Mises (S, von mises) Sambungan RBS Tipe Radius Cut

Tabel 4. 1 Tegangan Von Mises Model RBS Radius Cut

Tegangan maksimum	230 MPa
Tegangan minimum	0 MPa
Lokasi kritis	Sudut RBS

Nilai tegangan maksimum sebesar 230 MPa menunjukkan bahwa material balok pada daerah RBS telah mendekati tegangan leleh baja struktur, yaitu sekitar 250 MPa. Kondisi ini mengindikasikan bahwa daerah tersebut berada pada kondisi kritis dan telah mengalami pelelehan awal (*initial yielding*), sehingga berpotensi menjadi lokasi terbentuknya sendi plastis. Terjadinya pelelehan pada balok menegaskan bahwa perencanaan sambungan telah memenuhi konsep *strong column–weak beam*, dimana balok dirancang untuk mengalami leleh terlebih dahulu sebelum kolom.

Distribusi tegangan menunjukkan bahwa nilai tertinggi berada pada area transisi antara lengkungan RBS dan badan balok. Hal ini disebabkan oleh perubahan geometri penampang yang menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan akibat peralihan aliran gaya dari daerah penampang tereduksi menuju bagian balok yang lebih kaku.

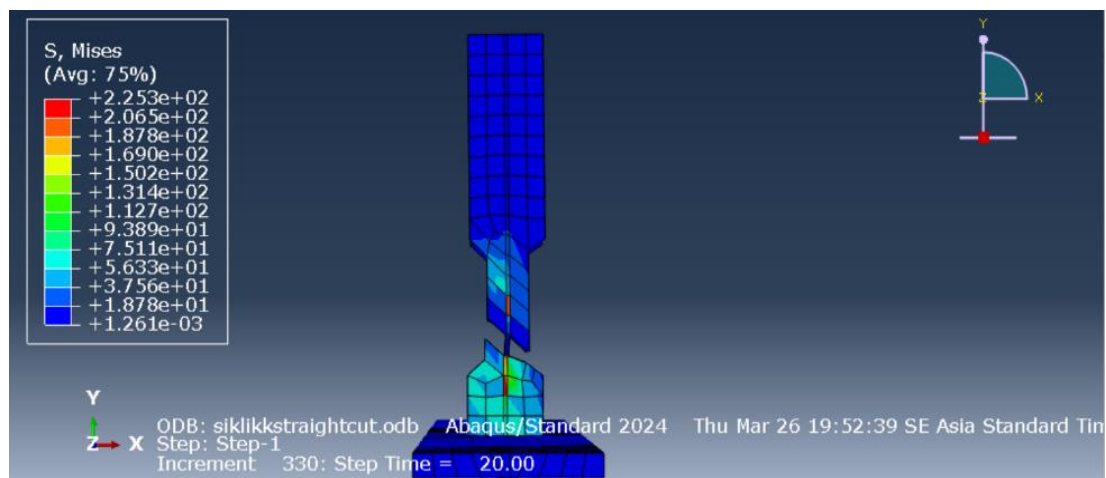
Meskipun bentuk lengkungan pada RBS tipe *radius cut* dapat membantu mendistribusikan tegangan, hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi relatif lebih tinggi dibandingkan model *straight cut*. Hal ini

mengindikasikan bahwa kemampuan *radius cut* dalam mengendalikan tegangan masih kurang optimal, sehingga lebih cepat mendekati kondisi leleh.

Dengan demikian, nilai tegangan *von Mises* maksimum sebesar 230 MPa menunjukkan bahwa daerah *radius cut* berada pada kondisi yang lebih kritis dan memiliki tingkat keamanan yang lebih rendah dibandingkan model *straight cut*. Kondisi ini menegaskan bahwa, meskipun mekanisme plastisitas pada balok telah tercapai, model *straight cut* lebih unggul dalam mengontrol tegangan dan meningkatkan kinerja struktur terhadap pembebanan siklik.

4.3.2 Distribusi Tegangan Von Mises Model RBS Straight Cut

Distribusi tegangan Von Mises pada model RBS straight cut, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4, menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada model ini sebesar 225 MPa, sedangkan tegangan minimum sebesar 0.001 MPa. Tegangan maksimum tersebut terjadi pada daerah Reduced Beam Section (RBS).



Gambar 4.4 Distribusi Tegangan von mises (S, von mises) Sambungan RBS Tipe Straight Cut

Tegangan maksimum sebesar 225 MPa menunjukkan bahwa balok pada daerah *Reduced Beam Section* (RBS) telah mendekati tegangan leleh baja struktur yang berada pada kisaran 250 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah RBS pada model *straight cut* telah mulai mengalami pelelehan awal (*initial yielding*). Terjadinya pelelehan pada balok menunjukkan bahwa mekanisme struktur telah sesuai dengan konsep *strong column–weak beam*, dimana balok direncanakan mengalami leleh terlebih dahulu sebelum kolom.

Tabel 4. 2 Tegangan Von Mises Model RBS Straight Cut

Tegangan maksimum	225 MPa
Tegangan minimum	0.001 MPa
Lokasi kritis	Area RBS

Konsentrasi tegangan terlihat pada area peralihan antara bagian *straight cut* dan badan balok akibat perubahan geometri penampang yang relatif tegas. Perubahan penampang yang tidak gradual menyebabkan terjadinya peningkatan gradien tegangan pada lokasi tersebut. Hal ini ditunjukkan oleh pola kontur tegangan dengan gradasi warna yang berubah secara signifikan, yang mengindikasikan adanya konsentrasi tegangan pada sudut reduksi penampang.

Di sisi lain, bagian kolom dan area balok di luar zona RBS menunjukkan nilai tegangan yang sangat rendah yaitu 0,001 MPa, yang menandakan bahwa distribusi beban telah terfokus pada daerah balok yang mengalami reduksi penampang. Kondisi ini menunjukkan bahwa kolom tetap berada dalam kondisi elastis sehingga integritas struktur utama tetap terjaga.

Meskipun terdapat konsentrasi tegangan pada daerah tertentu, nilai tegangan maksimum pada model *straight cut* lebih rendah dibandingkan dengan model *radius cut*. Hal ini menunjukkan bahwa proses pelelehan pada model *straight cut* terjadi lebih lambat, sehingga struktur mampu mempertahankan perilaku elastis dalam rentang pembebanan yang lebih besar.

Dengan demikian, model RBS *straight cut* dapat dinilai memiliki kinerja yang lebih baik dalam mengontrol tegangan, menunda terjadinya leleh awal, serta meningkatkan ketahanan struktur terhadap pembebanan gempa siklik.

4.3.3 Perbandingan Distribusi Tegangan Von Mises Kedua Model

Berdasarkan hasil analisis, terdapat perbedaan perilaku tegangan antara model RBS tipe *radius cut* dan *straight cut*. Nilai tegangan *Von Mises* maksimum pada *radius cut* sebesar 230 MPa, sedangkan pada *straight cut* sebesar 225 MPa. Nilai tegangan yang lebih tinggi pada *radius cut* menunjukkan bahwa model tersebut lebih cepat

mendekati tegangan leleh, sehingga berada pada kondisi yang lebih kritis dibandingkan dengan model *straight cut*.

Sebaliknya, model *straight cut* menunjukkan nilai tegangan yang lebih rendah, yang mengindikasikan bahwa distribusi tegangan pada struktur lebih terkendali. Kondisi ini memungkinkan struktur untuk mempertahankan perilaku elastis dalam rentang pembebanan yang lebih besar serta menunda terjadinya pelelehan awal.

Dengan demikian, model *straight cut* dapat dinilai lebih unggul dalam mengontrol tegangan dan meningkatkan tingkat keamanan struktur, karena mampu mengurangi konsentrasi tegangan yang berlebihan serta memperlambat proses kerusakan awal. Perbedaan ini menunjukkan bahwa bentuk pengurangan penampang berpengaruh signifikan terhadap respons tegangan struktur dalam menerima pembebanan gempa siklik.

4.4 Distribusi Regangan Plastis

Distribusi regangan plastis ekuivalen (PEEQ) digunakan untuk mengevaluasi lokasi dan tingkat deformasi plastis pada sambungan balok–kolom. Parameter ini sangat penting karena menunjukkan daerah terbentuknya sendi plastis yang menjadi indikator utama kinerja seismik sambungan RBS.

Pada model radius cut, regangan plastis menyebar lebih merata di sepanjang daerah RBS. Sementara itu, pada model *straight cut*, regangan plastis lebih terlokalisasi di sekitar ujung potongan.

Secara teoritis, regangan plastis ekuivalen didefinisikan sebagai:

a. Regangan plastis ekuivalen

$$\varepsilon_{peq} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right) \left(\varepsilon_{ij}^p \cdot \varepsilon_{ij}^p\right)} \quad (4.4)$$

Keterangan:

- ε_{peq} = regangan plastis ekuivalen
- ε_{ij}^p = komponen regangan plastis

Regangan plastis ekuivalen digunakan untuk menyatakan tingkat deformasi plastis material dalam bentuk satu nilai skalar. Rumus ini merupakan hasil transformasi tensor

regangan plastis ke dalam bentuk ekuivalen sehingga memudahkan identifikasi daerah yang mengalami plastisitas tertinggi. Nilai ε_{peq} yang besar menunjukkan bahwa material telah mengalami deformasi inelastik yang signifikan dan berpotensi menjadi lokasi terbentuknya sendi plastis.

b. Kriteria Terbentuknya sendi plastis

$$\varepsilon_{peq} \geq \varepsilon_y \quad (4.5)$$

Keterangan:

ε_y = regangan leleh baja

Kondisi material dinyatakan telah memasuki fase plastis apabila nilai regangan plastis ekuivalen telah melampaui regangan leleh baja. Persamaan ini digunakan sebagai dasar untuk membedakan daerah yang masih elastis dan daerah yang telah mengalami deformasi permanen.

c. Hubungan regangan dan tegangan plastis

$$\sigma = E (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (4.6)$$

Keterangan:

σ = tegangan

E = modulus elastisitas

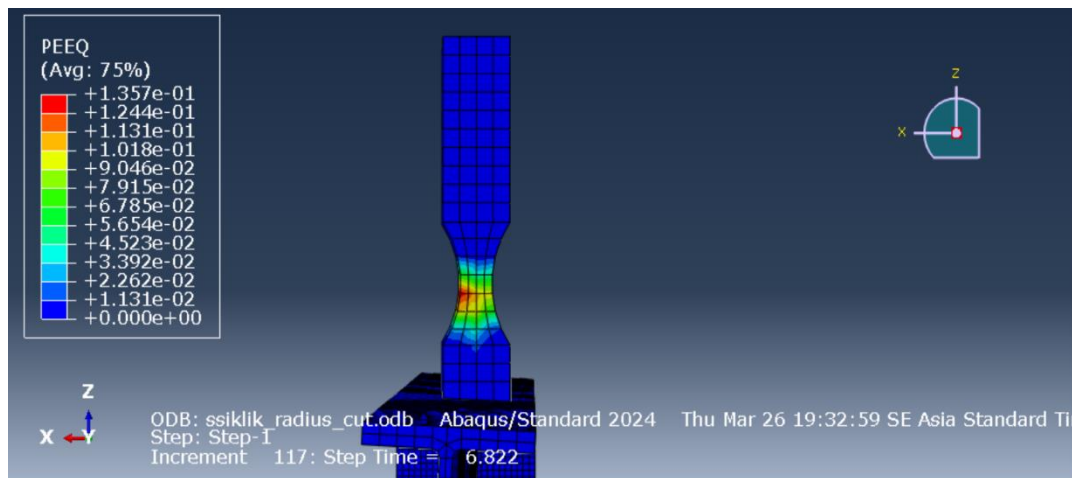
ε = regangan total

ε_p = regangan plastis

Persamaan ini menunjukkan bahwa tegangan yang bekerja pada material ditentukan oleh bagian elastis dari regangan total. Regangan plastis dikurangkan dari regangan total karena bagian tersebut tidak lagi memberikan kontribusi terhadap kekakuan material. Hubungan ini digunakan dalam model plastisitas untuk menggambarkan perilaku baja setelah melewati titik leleh.

4.4.1 Distribusi Regangan Plastis pada RBS Radius Cut

Berdasarkan Gambar 4.5, yang merupakan kontur regangan plastis ekuivalen (Equivalent Plastic Strain/PEEQ) pada sambungan RBS radius cut, terlihat bahwa regangan plastis terkonsentrasi pada daerah Reduced Beam Section (RBS) dan menjauhi muka kolom. pada model radius cut menunjukkan bahwa plastifikasi dominan terjadi pada balok di daerah pengurangan penampang.



Gambar 4.5 Distribusi Regangan Plastis (PEEQ) Sambungan RBS Tipe Radius Cut

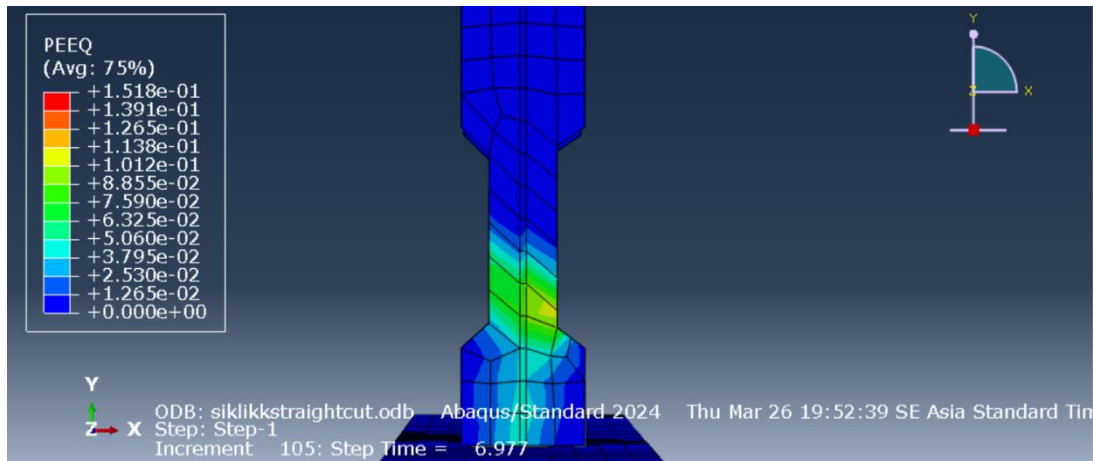
Nilai PEEQ maksimum pada model radius cut mencapai sekitar 0.1357% atau setara dengan 13,57%, Nilai regangan plastis tersebut menunjukkan bahwa pada daerah RBS telah terjadi deformasi plastis akibat pembebanan siklik yang diberikan pada ujung balok. Terjadinya regangan plastis pada daerah RBS menunjukkan bahwa daerah tersebut telah berfungsi sebagai lokasi terbentuknya sendi plastis, sesuai dengan konsep perencanaan struktur tahan gempa dimana sendi plastis diharapkan terjadi pada balok dan bukan pada kolom. Distribusi regangan plastis yang menyebar ini menunjukkan bahwa sendi plastis terbentuk sesuai dengan konsep desain RBS, yaitu pada daerah balok dan bukan pada kolom.

Jika dibandingkan dengan regangan ultimit baja struktural yang berada pada kisaran 0,15–0,20%, maka nilai regangan plastis pada model RBS radius cut sebesar 0,1357% menunjukkan bahwa material telah mengalami plastifikasi yang signifikan namun belum melampaui kapasitas regangan ultimitnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa daerah RBS radius cut memiliki cadangan daktilitas yang lebih baik.

4.4.2 Distribusi Regangan Plastis pada RBS Straight Cut

Berdasarkan hasil analisis elemen hingga, diperoleh nilai regangan plastis ekuivalen (Equivalent Plastic Strain/PEEQ) maksimum pada daerah Reduced Beam Section (RBS) tipe straight cut sebesar 0,1518 % atau setara dengan 15,18 %. Nilai

regangan plastis tersebut menunjukkan bahwa deformasi plastis yang terjadi pada daerah RBS cukup besar akibat pembebanan siklik yang diberikan.



Gambar 4.6 Distribusi Regangan Plastis (PEEQ) Sambungan RBS Tipe Straight Cut

Konsentrasi regangan plastis yang tinggi pada area tertentu menunjukkan bahwa deformasi plastis terjadi secara lokal dan tidak terdistribusi secara merata. Kondisi ini berpotensi menyebabkan terjadinya kerusakan lokal lebih cepat akibat akumulasi regangan pada satu titik kritis.

Tabel 4. 3 Perbandingan Perilaku Plastis

Parameter	Radius Cut	Straight Cut
Nilai PEEQ	Lebih rendah	Lebih tinggi
Potensi retak local	Lebih kecil	Lebih besar
Daktilitas	Lebih baik	Lebih rendah

Jika dibandingkan dengan regangan ultimit baja struktural yang berada pada kisaran 0,15–0,20%, maka nilai regangan plastis pada model RBS straight cut sebesar 0,1518% telah mendekati batas regangan ultimit baja. Kondisi ini menunjukkan bahwa material pada daerah RBS straight cut berada pada kondisi mendekati terjadinya retak awal (fracture initiation) akibat regangan plastis yang tinggi.

Distribusi regangan plastis pada model RBS straight cut terlihat cenderung terpusat pada daerah sudut pemotongan lurus. Konsentrasi regangan plastis ini menunjukkan bahwa deformasi plastis yang terjadi tidak menyebar secara merata, melainkan terkonsentrasi pada satu titik tertentu. Konsentrasi regangan plastis tersebut berpotensi menyebabkan kerusakan lokal lebih cepat dibandingkan dengan model RBS radius cut.

Dengan demikian, meskipun nilai regangan plastis maksimum pada model *straight cut* lebih besar, namun regangan plastis tersebut terjadi secara terlokalisasi sehingga menunjukkan perilaku struktur yang kurang stabil dalam menerima pembebanan siklik.

4.4.3 Perbandingan PEEQ antara Radius Cut dan Straight Cut

Perbandingan distribusi regangan plastis ekuivalen (PEEQ) dilakukan untuk mengetahui pengaruh bentuk *Reduced Beam Section* (RBS) terhadap lokasi terbentuknya deformasi plastis pada sambungan balok–kolom akibat pembebanan siklik. Perbandingan distribusi regangan dilakukan untuk mengetahui pengaruh geometri *Reduced Beam Section* (RBS) terhadap perilaku deformasi pada sambungan akibat pembebanan siklik. Berdasarkan data numerik hasil simulasi, terdapat perbedaan karakteristik regangan yang cukup signifikan antara kedua model pemotongan.

Pada model *straight cut*, nilai regangan maksimum tercatat sebesar 15,18%. Secara visual, regangan ini cenderung terkonsentrasi pada area transisi tajam di titik awal pengurangan sayap balok. Hal ini mengindikasikan adanya efek takikan (*notch effect*) yang memicu lokalisasi regangan pada area yang sempit, sehingga memperbesar risiko inisiasi retak dini akibat kelelahan material (*fatigue*) pada beban siklik.

Sebaliknya, pada model *radius cut*, nilai regangan maksimum lebih rendah, yaitu sebesar 13,57%. Meskipun nilainya lebih kecil dibandingkan tipe *straight cut*, hal ini menunjukkan distribusi beban yang lebih merata. Bentuk radius yang lebih halus mampu mengurangi konsentrasi tegangan sehingga deformasi plastis menyebar lebih bertahap di sepanjang daerah RBS. Kondisi ini menunjukkan bahwa tipe *radius cut* memiliki perilaku yang lebih stabil dalam menerima pembebanan siklik karena mampu mengurangi akumulasi regangan lokal yang berlebihan sebelum terjadi keruntuhan.

4.4.4 Evaluasi Potensi Kerusakan dan Mekanisme Keruntuhan Berdasarkan Regangan Plastis Ekuivalen (PEEQ)

Evaluasi tingkat kerusakan material pada sambungan balok–kolom dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan nilai regangan plastis ekuivalen (PEEQ). Parameter ini digunakan karena mampu menggambarkan akumulasi deformasi inelastik yang terjadi pada material baja akibat pembebanan siklik. Regangan plastis

ekuivalen menunjukkan besarnya deformasi permanen yang dialami material selama proses pembebanan berulang.

Semakin besar nilai PEEQ, semakin besar deformasi plastis yang terjadi pada elemen struktur. Dalam perencanaan struktur tahan gempa, deformasi plastis diharapkan terjadi pada daerah Reduced Beam Section (RBS) sebagai fuse zone, sehingga struktur mampu mendisipasikan energi tanpa mengalami kerusakan pada kolom.

Berdasarkan hasil analisis, nilai PEEQ maksimum pada sambungan RBS model *straight cut* menunjukkan akumulasi regangan plastis sebesar 15,18%, yang sangat terlokalisasi pada sudut tajam pemotongan lurus. pola kontur warna merah yang terisolasi ini mengindikasikan adanya "titik lemah" yang ekstrem.

Pada pembebanan siklik, titik konsentrasi regangan ini akan mengalami siklus regangan inelastis yang berulang pada area yang sangat sempit, yang memicu fenomena *low-cycle fatigue* (kelelahan siklus rendah). Akibatnya, retak inisiasi diprediksi akan muncul lebih awal pada sudut tajam tersebut dan merambat cepat ke arah badan balok (*web*), sehingga menurunkan kapasitas memikul beban secara mendadak sebelum daktilitas penuh balok tercapai.

Sebaliknya, pada model *radius cut*, meskipun nilai PEEQ mencapai angka 13,57%, distribusi kerusakan permanen ini tersebar secara merata di sepanjang lengkungan sayap balok. Kontur warna merah hingga kuning yang meluas menunjukkan bahwa volume material yang mengalami disipasi energi jauh lebih besar.

Dalam kondisi beban siklik, distribusi regangan yang halus (*smooth distribution*) ini sangat menguntungkan. Karena regangan tidak bertumpuk pada satu titik tajam, material baja dapat mengalami pengerasan regangan (*strain hardening*) secara lebih seragam. Hal ini menunda munculnya retak lokal dan memungkinkan struktur untuk mempertahankan kekuatannya dalam jumlah siklus pembebanan yang lebih banyak dibandingkan tipe lurus.

4.5 Disipasi Energi Sambungan

Disipasi energi merupakan salah satu parameter penting dalam analisis pembebanan siklik karena menunjukkan kemampuan struktur dalam menyerap dan meredam energi akibat beban berulang. Pada sambungan balok–kolom dengan sistem Reduced Beam Section (RBS), disipasi energi terjadi melalui deformasi plastis yang

terbentuk pada daerah reduksi penampang balok. Semakin besar energi yang dapat didisipasikan, semakin baik kemampuan struktur dalam menahan beban siklik, terutama pada kondisi gempa.

Disipasi energi digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sambungan dalam menyerap dan meredam energi gempa melalui deformasi inelastik. Parameter ini diperoleh dari hubungan antara gaya dan perpindahan yang terjadi selama pembebanan siklik.

Secara matematis, energi disipasi satu siklus dinyatakan sebagai:

$$E = \oint F d\Delta \quad (4.7)$$

a. Disipasi Energi Satu Siklus

$$E = \oint F d\Delta$$

Keterangan:

- E = energi disipasi dalam satu siklus pembebanan (kN·mm)
- F = gaya reaksi lateral (kN)
- Δ = perpindahan lateral (mm)

Persamaan ini menyatakan bahwa energi disipasi sama dengan luas kurva histeresis gaya–perpindahan.

b. Disipasi Energi dengan Metode Numerik

$$E \approx \sum 0.5 (F_i + F_{i+1}) (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \quad (4.8)$$

Keterangan:

- F_i, F_{i+1} = gaya pada dua titik data berturut
- Δ_i, Δ_{i+1} = perpindahan pada dua titik berturut
- E = energi disipasi per siklus

Rumus ini digunakan untuk menghitung luas kurva histeresis secara numerik menggunakan metode trapesium.

c. Energi Total Seluruh Siklus

$$E_{\text{total}} = \sum E_{\text{siklus}}$$

Keterangan:

- E_{total} = energi disipasi total
- E_{siklus} = energi pada masing-masing siklus

Energi total menunjukkan kemampuan keseluruhan sambungan dalam menyerap energi gempa.

4.5.1 Hasil Disipasi Energi

Berdasarkan hasil analisis elemen hingga, diperoleh bahwa nilai disipasi energi total pada model RBS radius cut sebesar 62232911.69 N.mm, sedangkan pada model RBS straight cut sebesar 71408266.60 N.mm. Hasil ini menunjukkan bahwa model straight cut mampu mendisipasikan energi lebih besar dibandingkan dengan model radius cut selama siklus pembebanan berlangsung.

Tabel 4. 4 Nilai Energi Total Disipasi Energi

Model RBS	Energi Total (N·mm)
Radius Cut	62232911.69
Straight Cut	71408266.60

Besarnya nilai disipasi energi pada model *straight cut* menunjukkan bahwa deformasi plastis yang terjadi mampu menyerap energi dalam jumlah yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan distribusi regangan plastis yang menyebar secara lebih luas pada elemen struktur balok, sehingga meningkatkan area plastifikasi dan berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas disipasi energi selama pembebanan siklik.

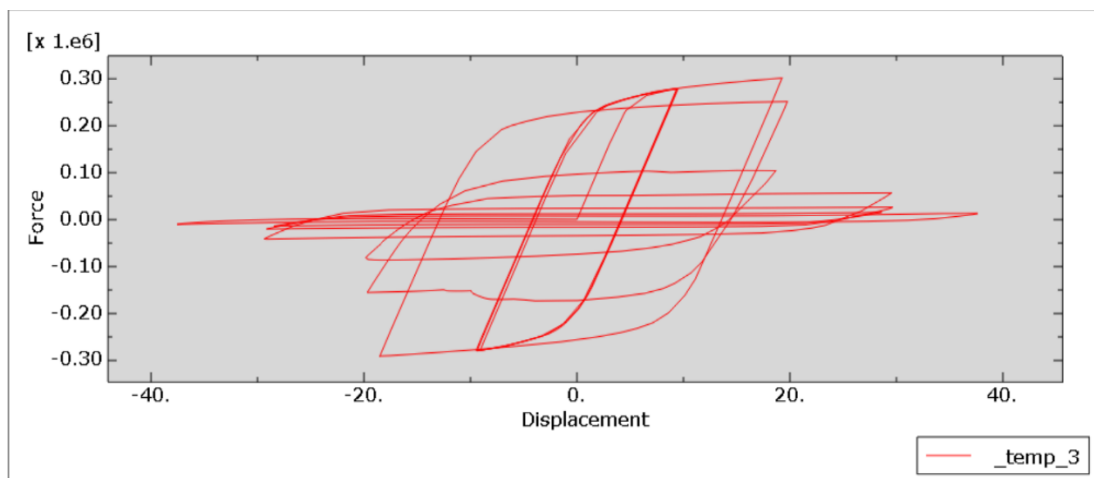
4.6 Kurva Histeresis Sambungan RBS

Kurva histeresis digunakan untuk mengevaluasi perilaku struktur baja terhadap pembebanan siklik, khususnya dalam menilai kemampuan daktilitas, kapasitas penyerapan energi, serta kestabilan respons struktur selama siklus pembebanan berulang. Kurva ini diperoleh dari hubungan antara gaya (force) dan perpindahan (displacement) pada titik kontrol yang ditentukan pada ujung balok.

Pada penelitian ini, kurva histeresis dianalisis untuk dua model sambungan balok–kolom dengan variasi geometri Reduced Beam Section (RBS), yaitu model RBS radius cut dan model RBS straight cut.

4.6.1 Kurva Histeresis Model RBS Radius Cut

Berdasarkan hasil analisis pembebanan siklik menggunakan metode elemen hingga, diperoleh kurva histeresis hubungan gaya–perpindahan pada model sambungan balok–kolom dengan konfigurasi Reduced Beam Section (RBS) radius cut seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. Kurva histeresis menunjukkan respons struktur terhadap pembebanan bolak-balik yang diberikan secara bertahap hingga mencapai perpindahan maksimum.



Gambar 4.7 kurva histeresis Radius Cut

Pada tahap awal pembebanan, kurva menunjukkan hubungan gaya dan perpindahan yang masih linier. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur masih berada pada fase elastis, dimana tegangan yang terjadi belum melebihi tegangan leleh material. Pada tahap ini, tidak terjadi deformasi permanen pada balok maupun kolom.

Seiring bertambahnya siklus pembebanan, kurva mulai mengalami perubahan bentuk dan tidak lagi linier. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur mulai memasuki fase plastis, dimana sebagian elemen balok telah mengalami tegangan melebihi batas leleh. Pada tahap ini terlihat bahwa kurva histeresis mulai membentuk loop yang semakin lebar, yang menunjukkan bahwa struktur mulai mampu mendisipasikan energi akibat pembebanan siklik.

Pada siklus pembebanan berikutnya, terlihat bahwa loop histeresis semakin melebar dan stabil. Hal ini menunjukkan bahwa struktur masih mampu menahan pembebanan berulang tanpa mengalami penurunan kekakuan yang signifikan.

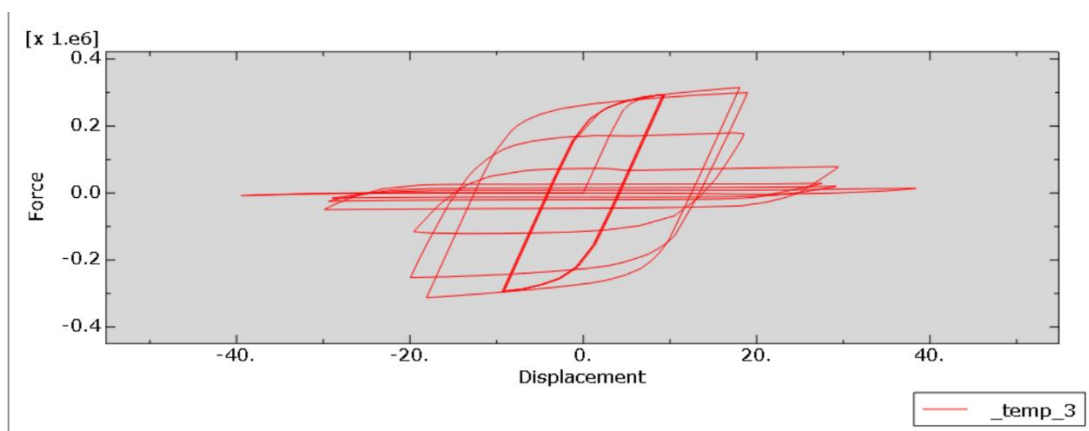
Distribusi plastis yang terjadi pada daerah RBS menyebabkan deformasi terkonsentrasi pada balok, sehingga mekanisme strong column – weak beam masih terpenuhi.

Pada tahap akhir pembebanan, terlihat bahwa bentuk kurva mulai mengalami penurunan kemiringan dan terjadi perubahan bentuk loop yang menunjukkan adanya degradasi kekakuan. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur mulai mendekati batas kapasitasnya, namun masih mampu menahan pembebanan hingga mencapai perpindahan maksimum yang diberikan tanpa terjadi kegagalan pada kolom.

Berdasarkan bentuk kurva histeresis yang stabil dan mampu membentuk loop yang lebih sempit, model radius cut menunjukkan kestabilan respons dan daktilitas struktur.

4.6.2 Kurva Histeresis Model RBS Straight Cut

Hasil analisis pembebanan siklik pada model sambungan balok–kolom dengan konfigurasi Reduced Beam Section (RBS) straight cut ditunjukkan pada Gambar 4.8. Kurva histeresis menggambarkan hubungan antara gaya dan perpindahan selama pembebanan bolak-balik hingga mencapai perpindahan maksimum.



Gambar 4.8 kurva histeresis Straight Cut

Pada tahap awal pembebanan, kurva menunjukkan hubungan yang masih linier antara gaya dan perpindahan. Hal ini menunjukkan bahwa struktur masih berada pada kondisi elastis, dimana material belum mengalami leleh dan deformasi yang terjadi masih bersifat sementara.

Dengan bertambahnya siklus pembebanan, kurva mulai menunjukkan perubahan bentuk dan membentuk loop histeresis. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur telah memasuki fase plastis, dimana sebagian elemen balok mengalami

tegangan yang melebihi batas leleh. Loop yang terbentuk pada kurva menunjukkan bahwa struktur mulai mendisipasikan energi akibat pembebanan berulang.

Pada siklus berikutnya, terlihat bahwa loop histeresis yang terbentuk pada model straight cut cenderung lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa energi yang diserap selama pembebanan siklik semakin meningkat. Penyebaran plastifikasi yang terjadi pada badan dan sayap balok menyebabkan area yang mengalami deformasi menjadi lebih luas.

Pada tahap pembebanan yang lebih besar, terlihat adanya perubahan bentuk kurva yang menunjukkan penurunan kekakuan dan degradasi kekuatan, namun struktur masih mampu menahan pembebanan hingga mencapai perpindahan maksimum yang diberikan. Tidak terlihat kegagalan pada kolom sehingga mekanisme plastis masih terjadi pada balok.

Berdasarkan bentuk kurva histeresis yang terbentuk, model straight cut menunjukkan kemampuan disipasi energi yang lebih besar dan stabil, ditandai dengan luas loop histeresis yang lebih besar pada beberapa siklus pembebanan.

4.6.3 Perbandingan Kurva Histeresis RBS Radius Cut dan RBS Straight Cut

Berdasarkan perbandingan kurva histeresis antara model radius cut dan straight cut, terlihat bahwa kedua model mampu menahan pembebanan siklik hingga perpindahan maksimum yang diberikan. Namun terdapat perbedaan pada bentuk loop histeresis yang dihasilkan.

Model radius cut menunjukkan perilaku deformasi yang lebih besar, yang menandakan bahwa struktur memiliki daktilitas yang baik. Plastifikasi terjadi secara terkontrol pada daerah RBS sehingga distribusi deformasi lebih merata.

Model straight cut menunjukkan loop histeresis yang lebih lebar pada beberapa siklus pembebanan, yang menunjukkan bahwa energi yang diserap selama pembebanan lebih besar. Penyebaran plastifikasi pada badan dan sayap balok menyebabkan kemampuan disipasi energi meningkat, sehingga struktur mampu menahan pembebanan berulang dengan energi yang lebih besar.

Berdasarkan hasil tersebut, model RBS straight cut memiliki disipasi energi yang lebih besar dan luas loop histeresis yang lebih besar, sedangkan model radius cut menunjukkan deformasi yang lebih besar tetapi energi yang diserap lebih kecil.

4.6.4 Pembahasan Umum Perilaku Siklik

Berdasarkan hasil analisis kurva histeresis gaya–perpindahan, dapat disimpulkan bahwa geometri *Reduced Beam Section* (RBS) berpengaruh terhadap karakteristik respons siklik sambungan balok–kolom, khususnya terhadap kestabilan kurva, kapasitas gaya, serta kemampuan disipasi energi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model RBS *radius cut* dan *straight cut* memiliki pola kurva histeresis yang relatif serupa, dengan kapasitas gaya dan rentang perpindahan yang sebanding pada setiap siklus pembebanan.

Namun demikian, model RBS *straight cut* menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam menahan pembebanan siklik, yang ditunjukkan oleh bentuk *loop* histeresis yang cenderung lebih lebar pada beberapa siklus. Luas *loop* histeresis yang lebih besar mengindikasikan bahwa energi yang didisipasikan selama pembebanan berulang lebih tinggi dibandingkan dengan model *radius cut*.

Perubahan geometri penampang pada model *straight cut* menyebabkan distribusi deformasi plastis tidak hanya terjadi pada badan balok, tetapi juga menyebar hingga ke sayap balok. Penyebaran plastifikasi yang lebih luas ini meningkatkan kontribusi deformasi plastis terhadap penyerapan energi, sehingga kemampuan struktur dalam meredam beban siklik menjadi lebih optimal.

Sebaliknya, model RBS *radius cut* menunjukkan respons siklik yang lebih stabil dengan distribusi deformasi plastis yang cenderung lebih terlokalisasi. Meskipun kondisi ini mencerminkan perilaku yang lebih duktail, kapasitas disipasi energi yang dihasilkan relatif lebih rendah dibandingkan model *straight cut*.

Secara keseluruhan, kedua tipe RBS memiliki kemampuan disipasi energi yang baik di bawah pembebanan siklik. Namun, berdasarkan karakteristik kurva histeresis, model RBS *straight cut* menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam hal kapasitas disipasi energi dan penyebaran plastifikasi, sehingga lebih efektif dalam menahan pembebanan gempa siklik, sedangkan model *radius cut* lebih menonjol dalam aspek kestabilan respons dan duktalitas.

4.7 Pengaruh Bentuk RBS terhadap Kinerja Sambungan

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa bentuk *Reduced Beam Section* (RBS) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perilaku sambungan balok–kolom. Model RBS *straight cut* menunjukkan kinerja yang lebih

baik dalam menahan pembebanan siklik, yang ditunjukkan oleh kapasitas disipasi energi yang lebih tinggi serta penyebaran regangan plastis yang lebih luas pada badan dan sayap balok. Kondisi ini memungkinkan struktur untuk menyerap energi gempa secara lebih efektif selama pembebanan berulang.

Sebaliknya, model RBS *radius cut* menunjukkan distribusi tegangan dan regangan plastis yang cenderung lebih terlokalisasi pada daerah tertentu di sekitar RBS. Meskipun kondisi ini mencerminkan perilaku yang lebih duktail, kapasitas disipasi energi yang dihasilkan relatif lebih rendah dibandingkan dengan model *straight cut*. Hal ini mengindikasikan bahwa kemampuan model *radius cut* dalam menahan pembebanan berulang masih berada di bawah model *straight cut*.

4.8 Evaluasi Umur Struktur Berdasarkan Pembebanan Siklik

Umur struktur pada sambungan balok–kolom dalam penelitian ini dievaluasi berdasarkan kemampuan struktur dalam menahan pembebanan siklik hingga mencapai perpindahan maksimum yang direncanakan tanpa mengalami kegagalan. Dalam konteks pembebanan siklik, umur struktur tidak dinyatakan dalam satuan waktu, melainkan dalam kemampuan struktur mempertahankan kekuatan dan kekakuannya selama siklus pembebanan berlangsung.

Pembebanan siklik diberikan secara bertahap hingga mencapai perpindahan maksimum sebesar 40 mm, dengan beberapa siklus pada setiap tingkat perpindahan. Struktur dikatakan masih memiliki kinerja yang baik apabila selama pembebanan tidak terjadi keruntuhan pada kolom dan deformasi plastis tetap terkonsentrasi pada daerah *Reduced Beam Section* (RBS) pada balok.

Berdasarkan hasil analisis, baik model RBS *radius cut* maupun *straight cut* mampu menahan seluruh siklus pembebanan tanpa mengalami kegagalan pada kolom. Plastifikasi yang terjadi tetap berada pada balok, sehingga mekanisme *strong column–weak beam* terpenuhi. Hal ini menunjukkan bahwa kedua model masih berada dalam batas kinerja yang diharapkan.

Namun demikian, terdapat perbedaan dalam kemampuan struktur mempertahankan respons selama pembebanan siklik. Model *straight cut* menunjukkan kapasitas disipasi energi yang lebih besar serta penyebaran plastifikasi yang lebih luas pada badan dan sayap balok. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur mampu menyerap energi lebih banyak dan mempertahankan kinerjanya secara lebih stabil selama siklus pembebanan.

Dengan demikian, berdasarkan hasil analisis hingga perpindahan maksimum, kedua model memiliki kinerja yang baik, namun model RBS *straight cut* menunjukkan ketahanan siklik yang lebih tinggi, sehingga secara relatif memiliki kinerja umur struktur yang lebih baik dibandingkan dengan model *radius cut* pada kondisi pembebanan yang sama.

4.9 Evaluasi terhadap Ketentuan FEMA dan AISC

Hasil analisis menunjukkan bahwa mekanisme keruntuhan terjadi pada balok dan bukan pada kolom. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan telah memenuhi konsep strong column–weak beam sesuai ketentuan FEMA dan AISC.

Struktur juga mampu mengalami deformasi inelastik yang cukup besar sebelum terjadi kerusakan signifikan, yang menunjukkan perilaku duktail sambungan.

4.10 Penentuan Model Terbaik Terhadap Pembebanan Siklik

Penentuan model terbaik terhadap pembebanan gempa siklik dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter utama, yaitu tegangan *Von Mises*, regangan, perpindahan, dan disipasi energi. Hasil analisis menunjukkan bahwa model *straight cut* memiliki nilai tegangan yang lebih rendah, perpindahan yang lebih kecil, serta kapasitas disipasi energi yang lebih besar dibandingkan dengan model *radius cut*. Hal ini mengindikasikan bahwa model *straight cut* memiliki kekakuan yang lebih tinggi, distribusi tegangan yang lebih baik, serta kemampuan yang lebih efektif dalam menyerap energi gempa selama pembebanan siklik.

Selain itu, model *straight cut* menunjukkan penyebaran regangan plastis yang lebih luas pada badan dan sayap balok, yang berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas disipasi energi. Namun demikian, nilai regangan maksimum pada model *straight cut* telah mendekati bahkan melampaui batas regangan koyak baja struktur ($\pm 15\%$), sehingga menunjukkan potensi terjadinya kegagalan material apabila pembebanan terus berlanjut.

Di sisi lain, model *radius cut* menunjukkan nilai regangan yang masih berada di bawah batas koyak, sehingga memiliki tingkat duktalitas yang lebih baik dan lebih aman terhadap potensi *fracture*. Meskipun demikian, nilai tegangan yang lebih tinggi, perpindahan yang lebih besar, serta kapasitas disipasi energi yang lebih rendah menunjukkan bahwa kinerja struktur secara keseluruhan masih berada di bawah model *straight cut*.

Dengan demikian, secara umum model *straight cut* dapat dinilai lebih unggul dalam merespons pembebanan gempa siklik karena memiliki kombinasi kekakuan, kekuatan, dan kapasitas disipasi energi yang lebih baik. Namun, model *radius cut* tetap menunjukkan keunggulan dalam aspek daktilitas. Oleh karena itu, pemilihan model terbaik perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kapasitas energi dan ketahanan terhadap kegagalan material, dimana *straight cut* lebih efektif dalam menahan beban gempa, sedangkan *radius cut* lebih aman dalam menghindari keruntuhan getas.

4.11 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode elemen hingga terhadap sambungan balok–kolom dengan variasi Reduced Beam Section (RBS) radius cut dan RBS straight cut pada pembebanan siklik, diperoleh beberapa kesimpulan mengenai perilaku struktur terhadap perpindahan, tegangan, regangan plastis, kurva histeresis, dan disipasi energi.

Tabel 4. 5 Hasil perbandingan gaya-gaya dalam tiap varian RBS

Tipe RBS	Perpindahan	Disipasi Energi	Distribusi Regangan	Distribusi Tegangan
	Mm	N.mm	(%)	Mpa
Radius Cut	8,459	62232911.69	13,57	230
Straight Cut	8,397	71408266.60	15,18	225

Hasil analisis perpindahan, model *straight cut* menunjukkan nilai sebesar 8,397 mm, yang lebih kecil dibandingkan dengan model *radius cut* sebesar 8,459 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa model *straight cut* memiliki tingkat kekakuan yang lebih tinggi serta kemampuan yang lebih baik dalam mengendalikan deformasi struktur. Temuan ini sejalan dengan hasil analisis disipasi energi, dimana model *straight cut* menunjukkan kapasitas yang lebih besar dibandingkan *radius cut*, yang mencerminkan kemampuan penyerapan energi gempa yang lebih efektif selama pembebanan siklik. Dengan demikian, model *straight cut* menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam merespons deformasi dan energi akibat pembebanan gempa siklik.

Hasil distribusi tegangan Von Mises pada kedua model menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada daerah pengurangan penampang balok. Berdasarkan hasil analisis elemen hingga terhadap sambungan RBS tipe *radius cut* dan *straight cut* di bawah pembebanan gempa siklik, diperoleh beberapa perbedaan perilaku struktur yang signifikan. Dari aspek tegangan Von Mises stress, model *radius cut* menunjukkan

nilai yang lebih tinggi yaitu sebesar 230 MPa dibandingkan *straight cut* sebesar 225 MPa, yang mengindikasikan bahwa radius cut lebih cepat mendekati kondisi leleh.

Hasil distribusi regangan plastis ekuivalen (PEEQ) menunjukkan model *straight cut* menghasilkan nilai yang lebih besar yaitu 15,18%, sedangkan radius cut sebesar 13,57%. Nilai regangan pada *straight cut* telah mendekati bahkan memasuki batas regangan koyak baja struktur (15–20%), sehingga menunjukkan potensi kerusakan material yang lebih tinggi. Sebaliknya, radius cut masih berada dalam batas aman sehingga perilaku deformasi lebih terkendali.

Kurva histeresis menunjukkan bahwa kedua model mampu menahan pembebanan siklik hingga perpindahan maksimum yang diberikan. Model radius cut menunjukkan respons yang lebih sempit, sedangkan model *straight cut* menghasilkan loop histeresis yang lebih lebar, yang menunjukkan kemampuan disipasi energi yang lebih besar selama pembebanan berulang.

Perhitungan disipasi energi menunjukkan bahwa model *radius cut* sebesar 62.232.911,69 N·mm, sedangkan *straight cut* sebesar 71.408.266,60 N·mm. Nilai yang lebih besar pada *straight cut* menunjukkan kemampuan penyerapan energi yang lebih baik selama pembebanan gempa siklik

hasil analisis kurva histeresis, terlihat bahwa kedua model menunjukkan kemampuan dalam menahan pembebanan siklik melalui pembentukan loop histeresis. Model *straight cut* menghasilkan luasan kurva yang lebih besar, yang mengindikasikan kemampuan disipasi energi yang lebih tinggi. Namun demikian, kurva histeresis pada model ini cenderung menunjukkan penurunan kestabilan dan indikasi degradasi kekakuan seiring bertambahnya siklus pembebanan. Sebaliknya, model radius cut memperlihatkan bentuk kurva histeresis yang lebih stabil, konsisten, dan tidak mengalami penyempitan yang signifikan pada setiap siklus. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi energi yang terjadi lebih merata serta kemampuan struktur dalam mempertahankan kekakuan relatif lebih baik selama pembebanan berulang. Dengan demikian, meskipun model *straight cut* unggul dalam hal besarnya disipasi energi, model radius cut menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam hal kestabilan perilaku histeresis dan ketahanan terhadap degradasi, sehingga dinilai lebih optimal dalam menahan pembebanan gempa siklik secara berkelanjutan.

Berdasarkan hasil analisis, kedua model RBS mampu mempertahankan mekanisme plastis pada balok tanpa menyebabkan kegagalan pada kolom, sehingga konsep *strong column-weak beam* terpenuhi. Dengan mempertimbangkan seluruh parameter tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun *straight cut* unggul dalam hal disipasi energi dan deformasi, model radius cut secara keseluruhan memberikan kinerja yang lebih baik terhadap pembebanan gempa siklik karena mampu memberikan keseimbangan antara daktilitas, kekuatan, kekakuan dan keamanan struktur serta menghindari potensi keruntuhan dini akibat regangan berlebih pada sambungan.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis numerik sambungan balok–kolom tipe Reduced Beam Section (RBS) dengan variasi model radius cut dan straight cut terhadap pembebanan siklik, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kedua tipe RBS (*radius cut* dan *straight cut*) mampu menggeser sendi plastis menjauh dari kolom sehingga memenuhi konsep *strong column–weak beam* dan melindungi sambungan dari kerusakan prematur.
2. Bentuk geometri RBS mempengaruhi perilaku sambungan terhadap pembebanan siklik, terutama pada perpindahan, tegangan, regangan, kurva histeresis, dan disipasi energi.
3. Model *straight cut* menunjukkan nilai disipasi energi yang lebih besar, dengan nilai perpindahan yang lebih kecil dibandingkan model *radius cut*, yang mengindikasikan kekakuan struktur yang lebih tinggi serta kemampuan yang lebih baik dalam mengendalikan deformasi.
4. Model *radius cut* menunjukkan nilai tegangan yang lebih tinggi namun masih dalam batas aman, dengan nilai perpindahan yang lebih besar serta regangan yang masih berada di bawah batas regangan koyak baja. Hal ini mengindikasikan bahwa model *radius cut* memiliki tingkat deformasi yang lebih tinggi dengan perilaku yang cenderung lebih duktail.
5. Hasil kurva histeresis menunjukkan bahwa kedua model mampu menahan pembebanan siklik hingga perpindahan maksimum yang diberikan tanpa terjadi kegagalan pada kolom, sehingga mekanisme *strong column–weak beam* masih terpenuhi.
6. Nilai disipasi energi pada model RBS *straight cut* sebesar 71408266.60 N.mm lebih besar dibandingkan model RBS *radius cut* sebesar 62232911.69 N.mm, yang menunjukkan bahwa model *straight cut* memiliki kemampuan penyerapan energi yang lebih tinggi selama pembebanan berulang.
7. Berdasarkan perbandingan seluruh parameter, model RBS *straight cut* menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam hal kekakuan, kontrol perpindahan, tegangan, serta kapasitas disipasi energi. Sementara itu, model *radius cut* menunjukkan keunggulan pada aspek duktalitas, ditunjukkan oleh

nilai regangan yang masih berada di bawah batas regangan koyak serta respons histeresis yang relatif stabil. Dengan demikian, kedua model memiliki kinerja yang baik terhadap pembebanan siklik, namun dengan karakteristik yang berbeda, dimana *straight cut* lebih efektif dalam menahan beban dan menyerap energi, sedangkan *radius cut* lebih aman dalam menghindari potensi kegagalan material.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Untuk aplikasi desain struktur tahan gempa, disarankan menggunakan sambungan RBS tipe *straight cut* karena menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam hal kekakuan, kontrol perpindahan, serta kapasitas disipasi energi dibandingkan dengan *radius cut*. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa nilai regangan pada *straight cut* telah mendekati bahkan sedikit melampaui batas regangan koyak baja, sehingga diperlukan pertimbangan desain lebih lanjut untuk mengendalikan potensi kegagalan material.
2. Penelitian ini masih terbatas pada satu sambungan balok–kolom, sehingga untuk penelitian selanjutnya disarankan:
 - Mengembangkan model menjadi satu portal atau satu bentang penuh
 - Atau mengkaji pengaruh interaksi antar sambungan dalam satu sistem rangka.
3. Variasi geometri RBS seperti:
 - Panjang potongan
 - Kedalaman reduksi flens
 - Dan jarak RBS dari muka kolom perlu diteliti lebih lanjut untuk mendapatkan konfigurasi yang paling optimal.
4. Pengaruh pelat lantai (slab) dan panel zone kolom sebaiknya dimasukkan dalam pemodelan lanjutan, karena komponen tersebut dapat mempengaruhi distribusi momen dan torsi pada sambungan RBS.
5. Validasi dengan pengujian eksperimental sangat dianjurkan agar hasil simulasi FEM dapat dibandingkan dengan perilaku aktual di laboratorium.

6. Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan membandingkan RBS dengan jenis sambungan momen lainnya seperti BFP, WUF-W, atau sambungan dengan cover plate untuk mendapatkan gambaran performa yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adan, S. M., Gumpertz, S., & Malley, J. O. (2009). NEHRP Seismic Design Technical Brief No . 2 – Seismic Design of Steel Special Moment Frames : A Guide for Practicing Engineers. *Design*, (2), 245–252.
<http://nehrp.gov/pdf/nistgcr8-917-1.pdf>
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications (ANSI/AISC 358-16)*. Chicago, IL: AISC. (2011).
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-16)*. Chicago, IL: AISC. (2016).
www.aisc.org
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)*. Chicago, IL: AISC. (2016).
- Ariani, I., Rangga Aditya, M., Jamal, M., Jurnal,), Pengetahuan, I., & Sipil, T. (n.d.). *JURNAL TEKNOLOGI SIPIL ANALISIS ELEMEN STRUKTUR BALOK DAN KOLOM BETON BERTULANG (STUDI KASUS GEDUNG DEALER HONDA ASTRA KOTA SAMARINDA)*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2020). SNI 7927:2020 Sambungan Terprakualifikasi Untuk Rangka Momen Khusus Dan Menengah Baja Pada Aplikasi Seismik*. Jakarta: BSN. Badan Standar Nasional Indonesia, (2020).
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727:2020 Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. (n.d.).
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2019). *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Jakarta: BSN. (2019).
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2020). *SNI 1729:2020 Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: BSN. Badan Standar Nasional Indonesia, (2020).
- Ball, S. (2011a). Steel non-orthogonal RBS moment connections—a case study. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20, 14–29.
<https://doi.org/10.1002/tal.737>
- Ball, S. (2011b). Steel non-orthogonal RBS moment connections—a case study. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20, 14–29.
<https://doi.org/10.1002/tal.737>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). *Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). Recommended Seismic Design Criteria*

for New Steel Moment-Frame Buildings (FEMA 350). Washington, D.C.: FEMA.

*FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY FEMA 356 / November 2000
PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC
REHABILITATION OF BUILDINGS. (n.d.).*

Fema. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440 FEMA nehrp.*

Imanpour, A., Mirghaderi, R., Keshavarzi, F., & Khafaf, B. (2008). Numerical evaluation of new reduced beam section moment connection. *Proceedings of the 2008 Structures Congress - Structures Congress 2008: Crossing the Borders*, 314. [https://doi.org/10.1061/41016\(314\)67](https://doi.org/10.1061/41016(314)67)

Jones, scott L., FRY, G. T., & ENGELHARDT, M. D. (2000). Reduced Beam Section Welded Steel Moment Frames. *12Wcee*, 1–8.

Ladar, I., & Alexa, P. (2009). *Performance based analysis of RBS steel frames.* <https://doi.org/10.1201/9780203859926.ch25>

Sato, A., Newell, J., & Uang, C.-M. (2007). *Cyclic testing of bolted flange plate steel moment connections for special moment frames.* (June), 137. <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/research-library/cyclic-testing-of-bolted-flange.pdf>

LAMPIRAN

A1. Data Geometri dan Dimensi Model

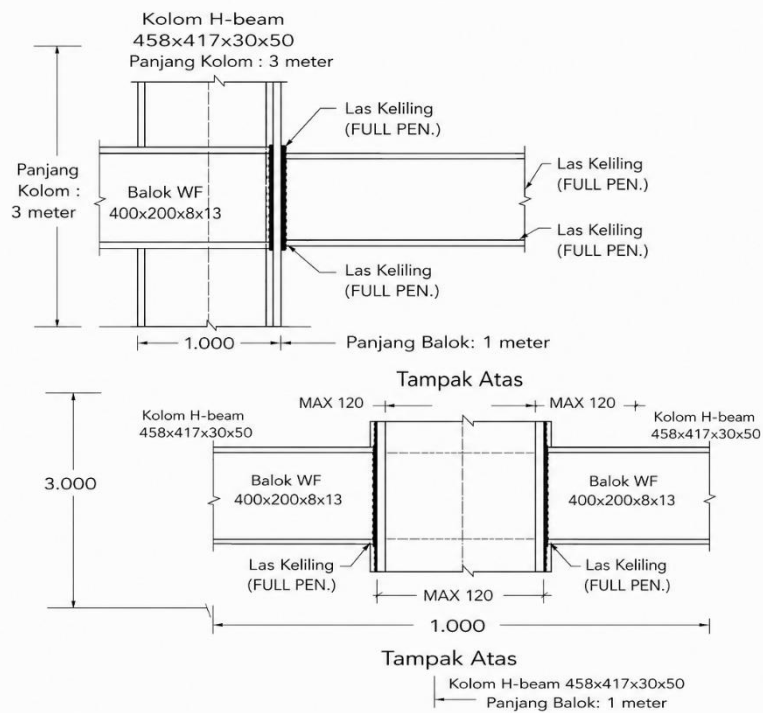
Lampiran ini menyajikan data geometri dan dimensi balok, kolom, serta konfigurasi Reduced Beam Section (RBS) tipe radius cut dan straight cut yang digunakan dalam pemodelan.

Tabel L. 1 Dimensi Balok

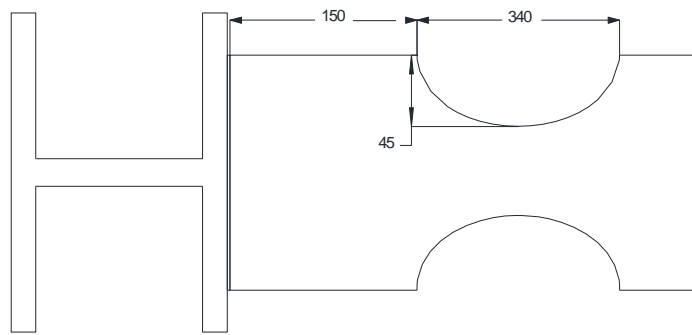
Parameter	Nilai
Profil	WF 400×200×8×13
Panjang balok	1000 mm

Tabel L. 2 Dimensi Kolom

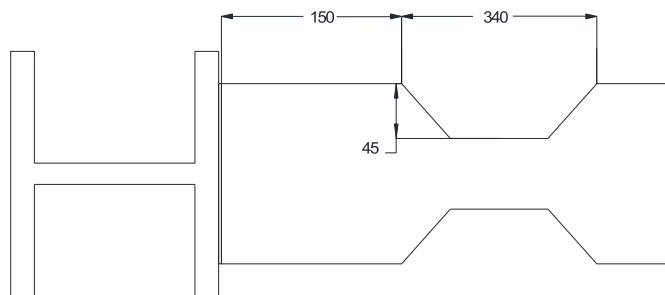
Parameter	Nilai
Profil	H-Beam 458×417×30×50
Tinggi kolom	3000 mm



Gambar L. 1 Geometri balok dan kolom



Gambar L. 2 Detail RBS radius cut



Gambar L. 3 Detail RBS straight cut

A.2 Properti Material Baja BJ 41

Lampiran ini memuat properti material baja BJ 41 yang digunakan dalam analisis elemen hingga

Tabel L. 3 Properti Material

Parameter Material	Nilai
Modulus Elastisitas, E	210000 MPa
Rasio Poisson, ν	0,3
Tegangan Leleh, f_y	250 MPa
Tegangan Ultimit, f_u	562,5 MPa
Regangan leleh	0,15
Beban Aksial	-41000 N
Hardening	Kinematik

Tabel L. 4 Properti Material Damage Initiation

No	Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
1	0.15	0.33	0

Tabel L. 5 Properti Material Damage Evolution

No	Displacement at failure	Satuan
1	5	Mm

A.3 Data Mesh dan Jenis Elemen

Lampiran ini menyajikan informasi mesh dan tipe elemen yang digunakan pada pemodelan.

Tabel L. 6 Data Mesh

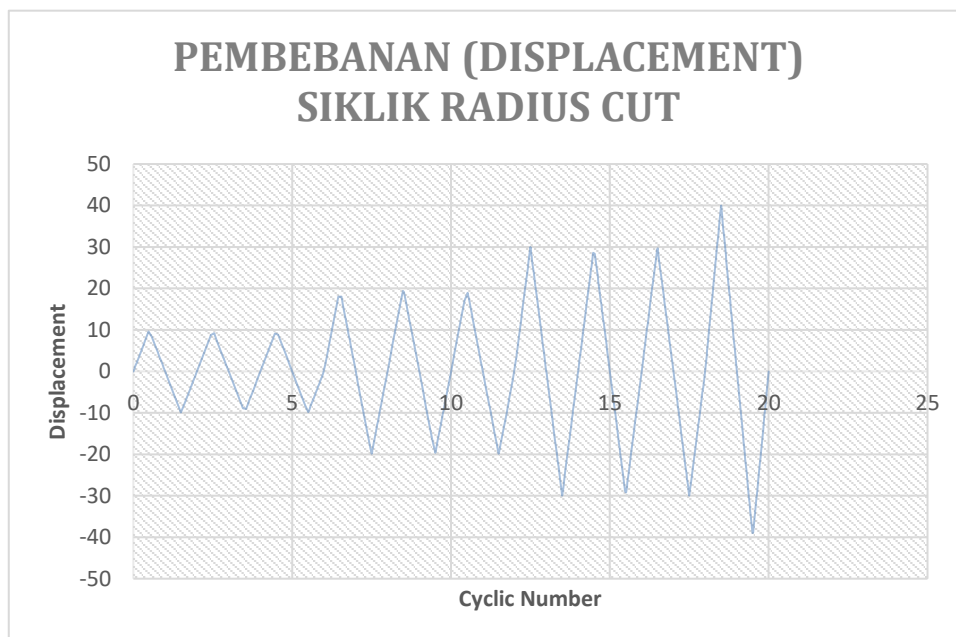
Bagian Model	Radius Cut (Ukuran Mesh)	Straight Cut (Ukuran Mesh)
Balok	50 mm	50 mm
Kolom	45 mm	45 mm
Stiffner	18 mm	18 mm
Tipe Elemen	C3D8R	

A.4 Riwayat Pembebanan Siklik

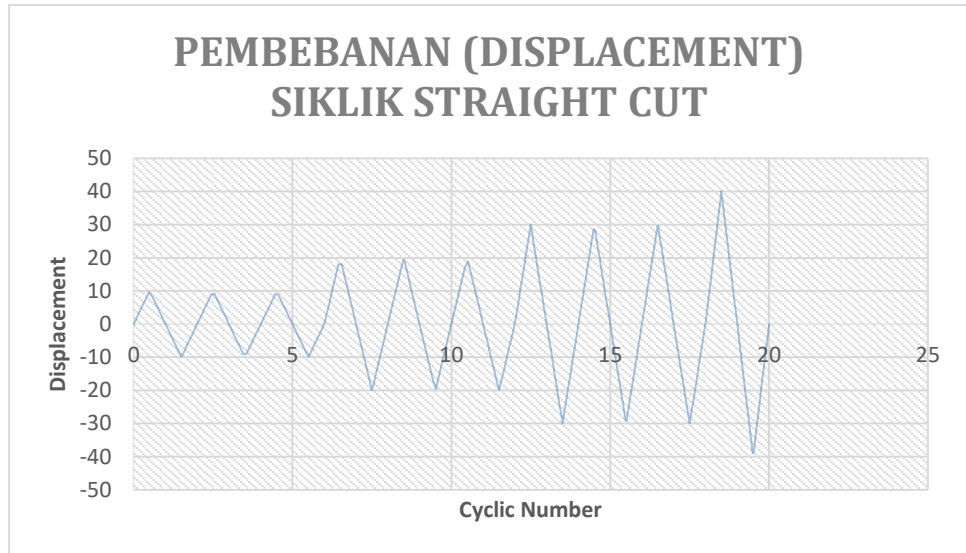
Lampiran ini berisi data pembebanan siklik berbasis displacement control.

Tabel L. 7 Riwayat pembebanan siklik dan Drift Ratio

Tipe Sambungan	Displacement Maksimum (mm)	Drift Maksimum (%)
Radius Cut	40	4 %
Straight Cut	40	4 %



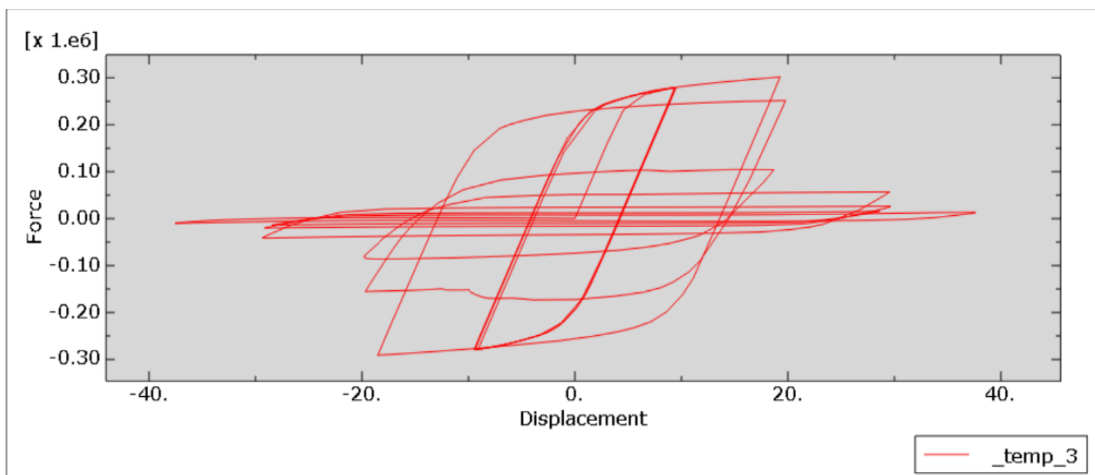
Gambar L. 4 Pembebanan Displacement Siklik Radius Cut



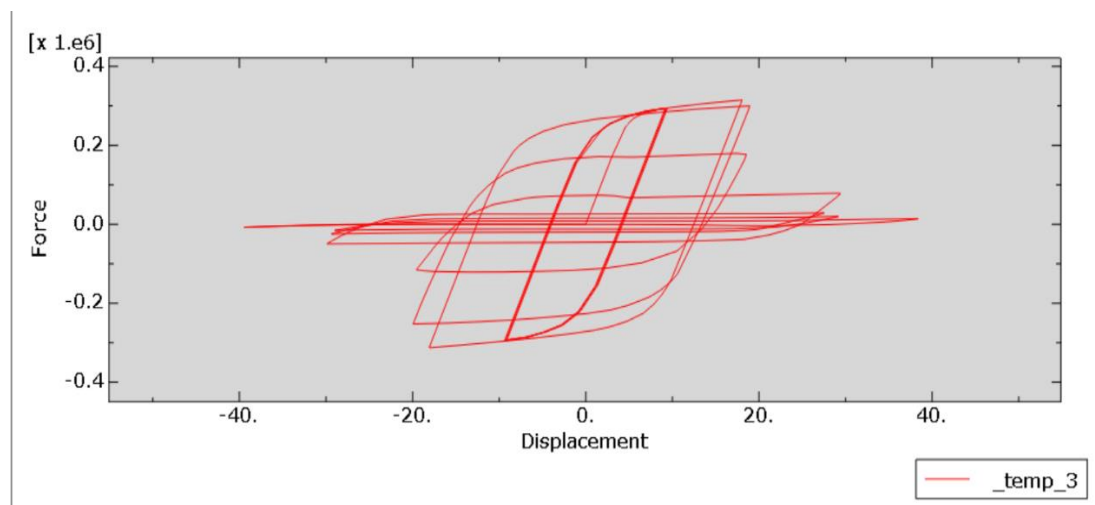
Gambar L. 5 Pembebanan Displacement Siklik Straight Cut

A.5 Kurva Histeresis

Lampiran ini berisi kurva histeresis yang diperoleh dari hasil hubungan gaya–perpindahan akibat pembebanan siklik pada struktur.



Gambar L. 6 kurva histeresis Radius Cut



Gambar L. 7 kurva histeresis Straight Cut

A.6 Perhitungan Disipasi Energi

Lampiran ini berisi hasil perhitungan disipasi energi berdasarkan data gaya–perpindahan.

Tabel L. 8 Energi Total Disipasi Energi

Model RBS	Energi Total (N·mm)
Radius Cut	62232911.69
Straight Cut	71408266.60

A.7 Perencanaan Sambungan RBS

- (1) Tentukan lokasi dan konfigurasi sendi plastis

$$0,5 b_{bf} = 0,5 \times 200 = 100 \text{ mm} \leq a \leq 0,75 b_{bf} = 0,75 \times 254 = 150 \text{ mm}$$

→ ambil $a = 150 \text{ mm}$

$$0,65 d_b = 0,65 \times 400 = 260 \text{ mm} \leq b \leq 0,85 d_b = 0,85 \times 400 = 340 \text{ mm}$$

→ ambil $b = 340 \text{ mm}$

$0,1 b_{bf} \leq c \leq 0,25 b_{bf}$, dengan coakan 45% pada sayap balok:

$$c = 0,45 (b_{bf} / 2) = 45 \text{ mm} \rightarrow \text{ambil } c = 45 \text{ mm}, c = 0,22 b_{bf} < 0,25 b_{bf}$$

- Tentukan jari jari dari coakan pada sayap balok → $R = \frac{4c^2 + b^2}{8c}$

$$R = (4 \times 45^2 + 400^2) / (8 \times 45) = 466.9444 \text{ mm}$$

- Tentukan jarak dari as kolom ke sambungan RBS

$$S_h = d_c/2 + a + b/2 = 400/2 + 150 + 400/2 = 520 \text{ mm}$$

-Tentukan jarak antar sendi plastis

$$\text{pada balok } L = \text{bentang balok} = 3000 \text{ mm}$$

$$L' = \text{jarak antar sendi plastis} = L - 2 S_h = 3000 - 2 \times 520 \text{ mm} = 1960 \text{ mm}$$

- (2) Tentukan modulus plastis di sambungan RBS (*ANSI/AISC 358 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, 2011 equation 5.8-4.*)

$$Z_e = Z_{bx} - 2 c t_{bf} (d_b - t_{bf}) = 1170 \times 10^3 - 2 \times 45 \times 13 (400 - 13) = 717210 \text{ mm}^3$$

- (3) Tentukan momen maksimum yang mungkin terjadi pada sambungan RBS

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_e \quad C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2$$

$$R_y = 1,1 \quad \text{dan} \quad C_{pr} = (250 + 410)/(2 \times 250) = 1,32 > 1,2$$

$$M_{pr} = 1,32 \times 1,5 \times 250 \times 717210 \times 10^{-6} = 260.3472 \text{ kN.m}$$

(4) Hitung gaya geser pada masing-masing pusat sambungan RBS

$$V_{pr} = 2M_{pr} / L' = 2 \times 260,35 \times 10^3 / 1960 = 265,66 \text{ kN}$$

$$V_{RBS} = \frac{2MPR}{L'} + \frac{WL'}{2} = 980,3$$

$$V'_{RBS} = \frac{2MPR}{L'} - \frac{WL'}{2} = -979,7$$

(5) Tentukan momen maksimum yang mungkin terjadi pada muka kolom

$$M_f = M_{pr} + V_{RBS}(a + b/2) \quad \longrightarrow \quad \text{ANSI/AISC 358-05, equation 5.8-6}$$

$$M_f = 260,34723 + 69,5965(150 + 340/2) \times 10^3 = 22,271140 \text{ kN.m} \quad \longrightarrow \quad \text{menentukan}$$

$$M_f = -1428,04 + (-560,2)(150 + 500/2) \times 10^3 = 22,270620 \text{ kN.m}$$

(6) Hitung momen plastis pada balok (ANSI/AISC 358-05, equation 5.8-7)

$$M_{pe} = Z_{bx} \cdot R_y \cdot F_{yb} = 8170 \times 10^3 \times 1,5 \times 250 \times 10^{-6} = 3063,75 \text{ kN.m}$$

(7) Periksa M_f tidak melebihi $\phi_d \cdot M_{pe}$ (ANSI/AISC 358-05, equation 5.8-8)

$$M_f / (\phi_d \cdot M_{pe}) = 22,270620 / (1,0 \times 3063,75) = 0,00618 < 1 \quad \text{ok}$$

(8) Tentukan kuat geser dari balok

$$V_u = V_{RBS} = 358,14 \text{ kN} \quad (\text{ANSI/AISC 358-05, equation 5.8-9})$$

Web in shears \longrightarrow *ANSI/AISC 341- 16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings Supersedes the Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, 2016, Table I-8-1:*

$$d_b/t_{bw} < 2,24 \sqrt{E/F_y} \longrightarrow 400/10 = 50 < 2,24 \sqrt{(200000/250)} = 1792 \quad \text{ok}$$

ANSI/AISC-360-16 Specification for Structural Steel Buildings Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings Dated and All Previous Versions Approved by the Committee on Specifications, 2016 G2-1 and G2-2.,

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_v C_t = 1,0$$

$$V_n = 0,6 \times 250 \times 2992 \times 1 \times 1 \times 10^{-3} = 403,92 \text{ kN} > V_u = 358,14 \text{ kN}$$

Jadi balok mampu menahan geser akibat beban-beban yang bekerja.

(9) Periksa kebutuhan pelat menerus (*ANSI/AISC 358-05, section 2.4.4*)

$$t_{cf} \geq 0.4 \sqrt{1.8 b_{bf} t_{bf} \frac{F_{yb} R_{yb}}{F_{yc} R_{yc}}}$$

$$\geq 0.4 \sqrt{1.8 \times 200 \times 13 \times ((250 \times 1.5) / (250 \times 1.5))} = 27,36421 \text{ mm}$$

$$t_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{6}$$

$$\geq 200 / 6 = 33,333 \text{ mm}$$

$$t_{cf} = 33,333 \text{ mm}$$

jadi perlu pelat menerus. Luas bidang kontak dari pelat menerus ke sayap kolom dihitung sebagai berikut:

$$A_{pb} = W_{pb-flange} t_{cont-pl}$$

$$W_{pb-flange} = b_{cont-pl} - ("k1_{col}" + 0.25in.)$$

$$b_{cont-pl} = (b_{cf} - t_{cw}) / 2 = (417 - 13) / 2 = 193,5 \text{ mm}$$

$$W_{pb-flange} = 193,5 - (22 + 6) = 165,5 \text{ mm}$$

Dari *ANSI/AISC 360 - J7*:

$$0.9(1.8)F_y A_{pb} \geq \left(\frac{Mf}{d_b - t_{bf}} \right)$$

$$A_{pb} \geq (22271140 \times 10^3) / (400 - 13) / (0,9 \times 1,8 \times 250) = 142094,2 \text{ mm}^2$$

$$t_{cont-pl} \geq A_{pb} / W_{pb-flange} = 142094,2 / 165,5 = 858,5755 \text{ mm}$$

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA DIRI PESERTA

Nama lengkap : Rafli Akbari
Tempat/tanggal lahir : Tanjung Morawa, 08 April 2001
Jenis kelamin : Laki- Laki
Alamat : Jln. Stall Dsn III B Gg.
Meranti No.166 Kec. Tanjung
Morawa, Sumatera Utara
Agama : Islam
Nama orang tua
Ayah : Sugino
Ibu : Siti Aisah
No. telp : 085261761842
Email : rafliakbari20@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

SD Negeri 101883 Psr 13 Limau Manis	Tahun Lulus 2013
SMP Swasta Bersubsidi Jl. Pasar Baru No.5 Tanjung Morawa A	Tahun Lulus 2016
SMA Negeri 2 Tanjung Morawa	Tahun Lulus 2019
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara	2020 - Selesai