

**ANALISIS KAPASITAS STRUKTUR JEMBATAN RANGKA TIPE
K-TRUSS DENGAN MUTU BAJA TIDAK SERAGAM DALAM
MENAHAN BEBAN GEMPA DUA ARAH DAN TIGA ARAH**

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AZKA FARDANY IBADY

NIM. 145060107111023

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KAPASITAS STRUKTUR JEMBATAN RANGKA TIPE *K-TRUSS* DENGAN MUTU BAJA TIDAK SERAGAM DALAM MENAHAN BEBAN GEMPA DUA ARAH DAN TIGA ARAH

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AZKA FARDANY IBADY

NIM. 145060107111023

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 4 Juni 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ming Narto W., ST, MT, M.Sc
NIP. 201102 840705 1 001

Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, MT, M.Sc
NIP. 201102 841203 2 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac.)
NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI :

Analisis Kapasitas Struktur Jembatan Rangka Tipe *K-Truss* Dengan Mutu Baja Tidak Seragam Dalam Menahan Beban Gempa Dua Arah Dan Tiga Arah

Nama Mahasiswa : Azka Fardany Ibady

NIM : 145060107111023

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Struktur

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Ming Narto W., ST, MT, M.Sc

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, MT, M.Sc

Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Lilya Susanti, ST, MT

Tanggal Ujian : 16 Mei 2018

SK Penguji : 979 / UN 10. F07 / KP / 2018

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran sebagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiasi, saya bersedia skripsi ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 8 Juni 2018

Azka Fardany Ibady

NIM. 145060107111023

RIWAYAT HIDUP

Azka Fardany Ibady, lahir di Probolinggo, 8 November 1995, anak ketiga dari Ayah Noorhudha Muchsin dan Ibu Dewi Soraya. Mulai memasuki bangku sekolah di Madrasah Ibtidaiyah Jenderal Sudirman Malang sejak tahun 2002 dan lulus pada tahun 2008. Kemudian melanjutkan pendidikan di Madrasah Tsanawiyah Negeri 1 Malang dan lulus pada tahun 2011. Selanjutnya melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 9 Malang dan lulus pada tahun 2014. Kemudian mengenyam bangku perkuliahan hingga lulus S1 (Strata 1) pada tahun 2018 dari Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

Selama kuliah aktif berpartisipasi dalam kegiatan organisasi kampus. Aktif sebagai anggota PROBIN Teknik Sipil Universitas Brawijaya 2015, anggota Himpunan Mahasiswa Sipil Teknik Sipil Universitas Brawijaya periode 2015/2016, anggota Divisi Desain dan Dokumentasi dari Departemen Informasi dan Publikasi Teknik Sipil Universitas Brawijaya periode 2016/2017, Ketua Divisi Struktur dari Departemen Informasi dan Publikasi periode 2017/2018, Kabid Korlap Civil Camp Teknik Sipil Universitas Brawijaya 2015/2016, Kabid Humas PROBINMABA Teknik Sipil Universitas Brawijaya 2016/2017, Asisten Tugas Besar Hidrologi Teknik Sipil Universitas Brawijaya 2016, Asisten Laporan Teknik Lalu Lintas Teknik Sipil Universitas Brawijaya 2017, serta berbagai kepanitiaan yang diselenggarakan di Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya, dan juga mewakili jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang sebagai Finalis dalam Kompetisi Jembatan Indonesia Kategori Jembatan Pejalan Kaki Canai Dingin 2017.

Malang, Mei 2018

Penulis

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkat rahmat, hidayah dan karunia yang telah dilimpahkan penulis berhasil menyelesaikan skripsi dengan judul ***“Analisis Kapasitas Struktur Jembatan Rangka Tipe K-Truss Dengan Mutu Baja Tidak Seragam Dalam Menahan Beban Gempa Dua Arah Dan Tiga Arah”***.

Penulisan skripsi ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis dengan senang hati menyampaikan terima kasih kepada :

1. Allah SWT sumber segala hikmat, berkah, karunia, tenaga dan pikiran.
2. Ayah Noorhudha Muchsin dan Ibu Dewi Soraya yang selalu memberikan dukungan moral, materi, terlebih lagi doa yang selalu dipanjatkan serta motivasi yang kuat untuk menyelesaikan studi kuliah dan skripsi.
3. Kedua Saudara saya Rizaldy Irfan Nuzwary dan Vierdha Nahdiaty Zuraidha yang selalu memberi doa, dukungan dan semangat dalam penulisan skripsi.
4. Dr. Eng. Alwafi Pujiraharjo, ST, MT dan Dr. Eng. Eva Arifi, ST, MT selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
5. Dr. Eng. Ming Narto W., ST, MT, M.Sc selaku dosen pembimbing 1 yang telah memberikan arahan, masukan dan bimbingan dalam penyusunan skripsi.
6. Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, MT, M.Sc selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan arahan, masukan dan bimbingan dalam penyusunan skripsi.
7. Dr. Eng. Lilya Susanti, ST, MT selaku dosen penguji yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan dalam penyusunan skripsi.
8. Dr. Eng. Ming Narto W., ST, MT, M.Sc selaku dosen penasehat akademik yang telah memberikan segala dukungan, bantuan, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan masa studi dari awal perkuliahan hingga akhir perkuliahan.
9. Rekan tim penelitian dan skripsi (ABAQUS Ceria), Muhammad Iqbal, Sonnia Syafirra, dan Isnana Puspitasari yang telah bekerja sama dan berjuang bersama dalam menyelesaikan skripsi.
10. Adella Dwi Naura Zahiya selaku pacar yang selalu memberi semangat dan membantu dalam segala hal mengenai perkuliahan hingga dalam menyelesaikan skripsi ini.

11. Sonnia Syafirra yang telah berjuang bersama dalam menyelesaikan laporan KKN-P, Studio Perancangan I dan Studio Perancangan II serta membantu dalam segala hal mengenai perkuliahan.
12. Seluruh anggota Himpunan Mahasiswa Sipil (HMS) terutama anggota Departemen Infokasi periode 2017-2018 dan Keluarga Besar Mahasiswa Sipil (KBMS) yang telah mengajarkan arti dari kerjasama.
13. Rekan sekaligus keluarga selama KJI XIII dan KBGI IX (Tim ABIMANYU) Albertus Eky Yulian, Ngakan Made Nabil, Ryan Radya Dessanda, dan Rizky Apriastini yang selalu memberikan bantuan, perhatian serta semangat selama berkompetisi membawa nama harum jurusan hingga menyelesaikan skripsi ini.
14. Teman- teman selama masa perkuliahan Faisal Abda, Muhammad Alif Farrasi, Wahid Darmawan, Ainul Mustafid, Farouk Angga, Besar Wira Dharma, Arinda Rahma, Thiya Fiantika, Lola Kumala, Wikha Fitria, Rora Istidamatul dan teman- teman KBMS lainnya, serta seluruh mahasiswa Teknik Sipil Universitas Brawijaya angkatan 2014 yang telah membantu dan memberikan dukungan selama penulis menjalani masa perkuliahan.
15. Teman- teman selama masa SMA hingga perkuliahan Alfian Satriyadi, Meidista Eka Putri, Retno Wulandari, Danastry Intan yang membantu dan memberikan dukungan selama penulis menjalani masa perkuliahan hingga menyelesaikan skripsi ini.
16. Dan semua pihak yang belum disebutkan namanya yang telah memberikan bantuan moral maupun materiil dalam pengerjaan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh sebab itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan untuk penelitian lanjutan di masa mendatang. Akhir kata, semoga skripsi ini bisa memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan sipil.

Malang, Mei 2018

Penyusun,
Azka Fardany Ibady

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
RINGKASAN	xv
SUMMARY.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Maksud dan Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Material Baja.....	5
2.1.1 Umum.....	5
2.1.2 Sifat Mekanik Baja.....	5
2.2 Jembatan	9
2.2.1 Umum.....	9
2.2.2 Bagian Struktur Jembatan	9
2.2.3 Pembebanan Pada Struktur Jembatan	11
2.2.3.1 Beban Mati	11
2.2.3.2 Beban Hidup.....	13
2.2.3.3 Beban Lalu Lintas	13
2.2.3.4 Beban Angin.....	16
2.2.3.5 Beban Gempa	17
2.2.4 Jembatan Rangka (<i>Truss Bridge</i>).....	17
2.3 Gempa Bumi	20
2.3.1 Umum.....	20
2.3.2 Penyebab Gempa Bumi.....	22
2.3.3 Ukuran Kekuatan Gempa.....	24
2.3.4 Pengaruh Gempa Bumi Terhadap Struktur Jembatan.....	27

2.4 Analisis Nilai Eigen	31
2.5 Analisis Dinamis	32
2.5.1 Umum.....	32
2.5.2 Prinsip <i>Time History Analysis</i>	32
2.6 <i>Software ABAQUS Student Edition</i>	33
BAB III METODE PENELITIAN	37
3.1 Data Jembatan.....	37
3.1.1 Data Umum Jembatan	37
3.1.2 Data Teknis Jembatan	37
3.2 Analisis Nilai Eigen	41
3.3 Analisis Dinamis.....	41
3.4 Metode Penelitian	42
3.5 Pemodelan dengan <i>Software ABAQUS Student Edition</i>	44
3.6 Analisis Hasil Penelitian.....	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Pemodelan Struktur Jembatan Rangka <i>K-Truss</i> K.H. Ahmad Fattah.....	49
4.1.1 Gambaran Umum	49
4.1.2 Spesifikasi Material Jembatan	50
4.2 Hasil Simulasi Numerik Jembatan Rangka <i>K-Truss</i> K.H. Ahmad Fattah	51
4.2.1 Hasil Simulasi Dinamis Jembatan Rangka <i>K-Truss</i> K.H. Ahmad Fattah	53
4.3 Respon Struktur terhadap Beban Gempa Dua Arah	53
4.3.1 Batang Dekat Tumpuan Sendi	55
4.3.2 Batang Dekat Tumpuan Rol	57
4.3.3 Batang Segmen Tengah Bagian Atas	60
4.3.4 Batang Segmen Tengah Bagian Bawah.....	62
4.3.5 Perbandingan Tegangan dan Regangan antar Batang yang Ditinjau.....	64
4.4 Respon Struktur Terhadap Beban Gempa Tiga Arah	67
4.4.1 Batang Dekat Tumpuan Sendi	68
4.4.2 Batang Dekat Tumpuan Rol	70
4.4.3 Batang Segmen Tengah Bagian Atas	73
4.4.4 Batang Segmen Tengah Bagian Bawah.....	75
4.4.5 Perbandingan Tegangan dan Regangan antar Batang yang Ditinjau.....	77
4.5 Perbandingan Respon Struktur Jembatan antara beban Gempa Dua Arah dan Tiga Arah	79

4.6 Perbandingan Respon Struktur Jembatan dengan Mutu Seragam dan Tidak Seragam	81
4.6.1 Batang Dekat Tumpuan Sendi	82
4.6.2 Batang Dekat Tumpuan Rol	83
4.6.3 Batang Segmen Tengah Atas	83
4.6.4 Batang Segmen Tengah Bawah	85
BAB V PENUTUP.....	87
5.1 Kesimpulan	87
5.2 Saran	88
DAFTAR PUSTAKA	

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Properti Mekanik Beberapa Bahan Material Konstruksi.....	6
Tabel 2.2	Sifat Mekanik Baja Struktural.....	9
Tabel 2.3	Faktor Beban untuk Berat Sendiri.....	12
Tabel 2.4	Berat Isi Bahan-bahan Bangunan untuk Beban Mati.....	12
Tabel 2.5	Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan.....	13
Tabel 2.6	Faktor Beban akibat Beban Lajur “D”.....	13
Tabel 2.7	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana.....	14
Tabel 2.8	Faktor Beban akibat Pembebanan Truk “T”.....	15
Tabel 2.9	Faktor Beban akibat Beban Angin.....	16
Tabel 2.10	Koefisien Ceret C_w	17
Tabel 2.11	Koefisien Ceret C_w	17
Tabel 2.12	<i>Magnitude</i> dan Kelas Kekuatan Gempa.....	25
Tabel 2.13	Keterangan Skala MMI (<i>Modified Mercalli Intensity Scale</i>).....	26
Tabel 2.14	Skala MMI (<i>Modified Mercalli Intensity Scale</i>).....	27
Tabel 2.15	<i>Typical Housner type and current Japanese damping values</i>	31
Tabel 3.1	Dimensi Profil Baja Model Jembatan.....	38
Tabel 3.2	Spesifikasi Material pada Model Jembatan Rangka Tipe K-Truss.....	39
Tabel 3.3	Data dari 10 titik pada baja mutu BJ-41 yang dimasukkan ke dalam software ABAQUS <i>Student Edition</i>	40
Tabel 3.4	Data dari 10 titik pada baja mutu BJ-37 yang dimasukkan ke dalam software ABAQUS <i>Student Edition</i>	41
Tabel 4.1	Spesifikasi Material Jembatan Rangka K.H. Ahmad Fattah.....	50
Tabel 4.2	Hasil Analisis Eigen pada Struktur Jembatan Rangka K.H. Ahmad Fattah.....	51
Tabel 4.3	Nilai Modulus Elastisitas Pada Siklus Pertama akibat Beban Gempa Dua Arah.....	65
Tabel 4.4	Rekapitulasi Selisih Nilai Regangan Tiap Batang akibat Beban Gempa Dua Arah.....	66

Tabel 4.5	Nilai Modulus Elastisitas Pada Siklus Pertama akibat Beban Gempa Tiga Arah.....	78
Tabel 4.6	Rekapitulasi Selisih Nilai Regangan Tiap Batang Akibat Beban Gempa Tiga Arah.....	79

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Kurva hubungan tegangan-regangan tipikal.....	5
Gambar 2.2	Benda Uji Material Baja.....	6
Gambar 2.3	Kurva Hubungan Tegangan (f) dan Regangan (ϵ).....	7
Gambar 2.4	Bagian-Bagian Konstruksi Jembatan.....	10
Gambar 2.5	Intensitas beban lajur “D”.....	14
Gambar 2.6	Grafik besar BTR dengan bentang struktur.....	15
Gambar 2.7	Beban lajur “D”.....	15
Gambar 2.8	Susunan Beban Angin.....	16
Gambar 2.9	Komponen-Komponen Jembatan Rangka.....	18
Gambar 2.10	Jenis-jenis <i>cross-section</i> rangka baja.....	18
Gambar 2.11	Jembatan rangka tipe <i>Deck Truss</i>	18
Gambar 2.12	Jembatan rangka tipe <i>Pony Truss</i>	19
Gambar 2.13	Jembatan rangka tipe <i>Through Truss</i>	19
Gambar 2.14	Tipe-Tipe Jembatan Rangka.....	19
Gambar 2.15	Struktur Lapisan Bumi.....	23
Gambar 2.16	Jenis Pergerakan Lempeng.....	23
Gambar 2.17	Posisi Perbatasan Lempeng Pada Peta Dunia.....	23
Gambar 2.18	Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampau 10% dalam 50 tahun.....	29
Gambar 2.19	Peta percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampau 10% dalam 50 tahun.....	29
Gambar 2.20	Peta respons spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampau 10% dalam 50 tahun.....	29
Gambar 2.21	Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampau 7% dalam 75 tahun.....	30
Gambar 2.22	Peta respons spektra percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampau 7% dalam 75 tahun.....	30
Gambar 2.23	Peta respons spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampau 7% dalam 75 tahun.....	30
Gambar 2.24	Rekaman gempa El Centro di California.....	32

Gambar 2.25	Diagram Aliran Proses <i>Running</i>	34
Gambar 3.1	Jembatan Rangka Baja K.H. Ahmad Fattah.....	37
Gambar 3.2	Layout jembatan pada software ABAQUS.....	38
Gambar 3.3	Ketidakteraturan penggunaan mutu baja pada jembatan <i>K-Truss</i>	38
Gambar 3.4	Hubungan tegangan-regangan tipikal.....	39
Gambar 3.5	Hubungan tegangan-regangan mutu baja BJ-37.....	40
Gambar 3.6	Rekaman gempa El Centro di California, (a) Gempa arah earth-west, (b) Gempa arah north-south, dan (c) Gempa arah up-down.....	42
Gambar 3.7	Diagram alir penelitian.....	43
Gambar 3.8	Hasil <i>input</i> koordinat-koordinat setiap titik pada jembatan <i>K-Truss</i>	44
Gambar 3.9	Penggabungan koordinat-koordinat membentuk jembatan <i>K-Truss</i>	44
Gambar 3.10	<i>Input</i> mutu material baja yang digunakan.....	45
Gambar 3.11	<i>Input</i> dimensi profil baja yang digunakan.....	46
Gambar 3.12	Perintah <i>input boundary condition</i>	46
Gambar 4.1	Layout Jembatan <i>K.H. Ahmad Fattah</i> tampak 3D.....	49
Gambar 4.2	Layout Jembatan <i>K.H. Ahmad Fattah</i> tampak 2D.....	49
Gambar 4.3	Elemen rangka jembatan yang diasumsikan menggunakan mutu BJ-37....	50
Gambar 4.4	Elemen rangka jembatan yang diasumsikan menggunakan mutu BJ-41....	50
Gambar 4.5	Bentuk mode 1 jembatan rangka k-truss K.H. Ahmad Fattah.....	52
Gambar 4.6	Bentuk mode 10 jembatan rangka k-truss K.H. Ahmad Fattah.....	52
Gambar 4.7	Distribusi tegangan aksial akibat beban gempa dua arah.....	54
Gambar 4.8	Distribusi regangan aksial akibat beban gempa dua arah.....	54
Gambar 4.9	Deformasi akibat beban gempa dua arah.....	54
Gambar 4.10	Sisi kanan dan sisi kiri jembatan.....	55
Gambar 4.11	pembagian 4 bagian pada jembatan.....	55
Gambar 4.12	Kurva regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah.....	56
Gambar 4.13	Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah.....	56
Gambar 4.14	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah.....	57
Gambar 4.15	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah.....	57

Gambar 4.16	Kurva regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah.....	58
Gambar 4.17	Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah.....	58
Gambar 4.18	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah.....	59
Gambar 4.19	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah.....	59
Gambar 4.20	Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah.....	60
Gambar 4.21	Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah.....	60
Gambar 4.22	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah.....	61
Gambar 4.23	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang dekat tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah.....	61
Gambar 4.24	Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah.....	62
Gambar 4.25	Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah.....	62
Gambar 4.26	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah.....	63
Gambar 4.27	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah.....	63
Gambar 4.28	Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama akibat beban gempa dua arah.....	64
Gambar 4.29	Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau akibat beban gempa dua arah.....	66
Gambar 4.30	Distribusi tegangan aksial akibat beban gempa tiga arah.....	67
Gambar 4.31	Distribusi regangan aksial akibat beban gempa tiga arah.....	68
Gambar 4.32	Deformasi akibat beban gempa tiga arah.....	68
Gambar 4.33	Kurva regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah.....	69
Gambar 4.34	Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa	

	tiga arah.....	69
Gambar 4.35	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah.....	70
Gambar 4.36	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah.....	70
Gambar 4.37	Kurva regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah.....	71
Gambar 4.38	Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah.....	71
Gambar 4.39	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah.....	72
Gambar 4.40	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah.....	72
Gambar 4.41	Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah.....	73
Gambar 4.42	Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah.....	73
Gambar 4.43	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah.....	74
Gambar 4.44	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah.....	74
Gambar 4.45	Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah.....	75
Gambar 4.46	Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah.....	75
Gambar 4.47	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah.....	76
Gambar 4.48	Kurva <i>displacement</i> (U1) pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah.....	76
Gambar 4.49	Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama akibat beban gempa tiga arah.....	77
Gambar 4.50	Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau akibat beban gempa tiga arah.....	79

Gambar 4.51	Grafik perbandingan hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah dan tiga arah.....	80
Gambar 4.52	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang sendi dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah.....	82
Gambar 4.53	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang rol dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah.....	83
Gambar 4.54	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah atas dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah....	84
Gambar 4.55	Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bawah dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah....	85

Halaman ini sengaja dikosongkan

RINGKASAN

Azka Fardany Ibadny, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei, 2018, *Analisis Kapasitas Struktur Jembatan Rangka Tipe K-Truss Dengan Mutu Baja Tidak Seragam Dalam Menahan Beban Gempa Dua Arah dan Tiga Arah*, Dosen pembimbing : Dr. Eng. Ming Narto W., ST, MT, M.Sc dan Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, MT, M.Sc.

Jembatan adalah jalan yang terletak di atas permukaan air dan atau di atas permukaan tanah yang berfungsi menghubungkan suatu wilayah dengan wilayah yang lain untuk melewati suatu rintangan seperti lembah, sungai, dan sebagainya. Indonesia sendiri membutuhkan jembatan rangka baja yang komprehensif dan kuat, salah satunya adalah tipe *K-truss* yang paling kokoh dibandingkan dengan tipe rangka lain dan masih jarang diterapkan. Jembatan rangka K.H. Fattah yang terletak di Malang merupakan jembatan tipe *K-truss* di Indonesia. Dalam modelisasi struktur jembatan, digunakan jembatan tipe K-Truss K.H. Fattah Malang. Hal ini bertujuan untuk memudahkan peneliti dalam menganalisis jembatan tanpa harus mendesain terlebih dahulu.

Dalam melakukan analisis terhadap suatu jembatan harus direncanakan untuk mampu menahan beban gempa, mengingat Indonesia termasuk negara yang rawan mengalami gempa bumi. Beban gempa sendiri merupakan faktor penting dalam merencanakan struktur dengan pembebanan tak terduga dan sukar diprediksi. Pada umumnya beban gempa hanya dianalisis melalui dua arah saja. Pada penelitian ini, jembatan dianalisis dengan beban gempa dua arah dan tiga arah kemudian peneliti membandingkan pengaruh diantara keduanya. Selain itu pada penelitian ini digunakan mutu yang seragam dan tidak seragam pada material baja. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan hasil pengaruh perbedaan mutu terhadap kapasitas struktur jembatan. Hasil yang didapatkan dari analisis tersebut berupa tegangan dan regangan tiap batang pada struktur jembatan.

Tahap pertama dimulai dengan melakukan pemodelan menggunakan *software ABAQUS Student Edition* menggunakan spesifikasi dimensi dan material yang telah disesuaikan dengan jembatan rangka tipe *K-Truss* K.H. Fattah Malang. Sebelum dilakukan analisis dengan beban gempa, jembatan dianalisis untuk mendapatkan nilai eigen terlebih dahulu. Kemudian jembatan kembali dianalisis dengan memasukkan data beban gempa dan nilai eigen yang didapat. Jembatan dianalisis menggunakan beban gempa dua arah terlebih dahulu dengan mutu seragam dan tidak seragam. Setelah hasil keluar, jembatan kembali dianalisis dengan beban gempa tiga arah yang menggunakan mutu seragam dan tidak seragam. Kemudian keduanya dibandingkan sehingga didapatkan presentase pengaruh beban gempa dua arah dan tiga arah terhadap kapasitas struktur jembatan dengan mutu seragam dan tidak seragam.

Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa analisis struktur jembatan akibat beban gempa dua arah dan tiga arah dengan menggunakan mutu baja seragam dan tidak seragam tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas struktur jembatan, karena dari analisis didapatkan hasil penurunan kapasitas struktur jembatan sebesar 0,000557% dari kapasitas struktur jembatan pada kondisi awal. Hal tersebut menunjukkan bahwa perencanaan jembatan rangka menggunakan pembebanan dua arah sudah cukup memenuhi syarat.

Kata Kunci : struktur jembatan, jembatan rangka tipe *K-Truss*, mutu seragam, mutu tidak seragam, kapasitas struktur

Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Azka Fardany Ibady, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, May 2018, *Structural Capacity Analysis of K-Truss Bridge with Non-Uniform Steel Grade in Carrying Bi-Directional and Tri-Directional Earthquake Loads*. Academic Supervisor : Dr. Eng. Ming Narto W., ST, MT, M.Sc and Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, MT, M.Sc.

Bridge is a road that lies above the surface of the water or above the surface of the ground which serves to connect an area with another region to pass through the barriers such as valleys, rivers, and so on. Indonesia itself needs bridges with a truss that is comprehensive and strong, one of the strongest truss bridge and rarely applied compared to another is K-truss type. K.H. Fattah bridge that located in Malang is one of the bridge with K-truss type in Indonesia. In the modelization structure of the bridge, K-Truss type is applied in K.H Fattah Malang. This aims to facilitate the researchers in analyzing the bridge without having to design it first.

The analysis of truss bridge should be planned to be able to hold the earthquake loads, considering Indonesia is one of the country that classifier to the earthquake. Earthquake load itself is an important factor in planning the structure of the bridge with unexpected and unpredictable loads. In general, the load of the earthquake is only analyzed through the two directions only. In this study, the bridge is analyzed with loads of two-way and three-way earthquake then the researcher compared the influence between the two earthquake loads. Also, in this study, the researcher used the equal quality and the unequal quality of the steel materials. The result of the influence shows some quality difference to the capacity of the bridge structure. The results of this analysis is tension and stretchiness of each bridge stem from the structure of the bridge.

First step begins with modeling the bridge structure using the ABAQUS Student Edition software with the dimensional and material specifications that have been adapted to the K-Truss type truss of K.H Fattah bridge Malang. Before the load of the earthquake is analyzed, the bridge is analyzed to obtain the eigen value first. Then the bridge is analyzed by entering the data of earthquake load and the eigen value obtained. After that, The bridge is analyzed using a two-way earthquake load first with the equal and unequal quality of steel. After the results come out, the bridge is analyzed again with a three-way earthquake load using an equal and unequal quality of steel materials. Then both of the results are compared so that the researcher get the percentage of the effect of two-way and three-way earthquake load on the capacity of the bridge structure with the equal and unequal quality of steel materials.

The results of this study is found that the bridge structure analysis due to two-way and three-way earthquake load using equal and unequal quality of steel materials did not have a significant effect on the capacity of bridge structure, because from the analysis obtained the result of reduction of bridge structure capacity by 0.000557% of the initial conditions. This indicates that trusswork planning using two-way loads is sufficient.

Key terms: *Bridge structure, K-Truss type bridge truss, equal quality, unequal quality, structure capacity*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang telah dikenal sebagai negara kepulauan dan negara maritim terbesar di dunia. Kondisi geografis Indonesia hampir dua pertiganya adalah wilayah perairan, yang antara lain terdiri dari pulau dan perairan. Terdapat banyaknya pulau menyebabkan ketidakmerataan dalam pembangunan sarana dan prasarana fisik. Solusi untuk masalah ketidakmerataan pembangunan sarana dan prasarana fisik adalah membangun jembatan. Definisi jembatan menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan, yang dimaksud dengan “Jembatan” adalah jalan yang terletak di atas permukaan air dan atau di atas permukaan tanah yang berfungsi menghubungkan suatu wilayah dengan wilayah yang lain untuk melewati suatu rintangan seperti lembah, sungai, dan sebagainya.

Salah satu jembatan yang paling mudah ditemui adalah jembatan rangka baja. Konstruksi rangka baja adalah suatu konstruksi yang terdiri dari susunan batang-batang baja yang membentuk kumpulan segitiga, dimana setiap pertemuan beberapa batang disambung pada alat pertemuan/simpul dengan menggunakan alat penyambung, baik baut maupun las. Aspek kemudahan pelaksanaan merupakan salah satu alasan mengapa jembatan tipe ini sangat sering dipakai. Indonesia sendiri membutuhkan jembatan rangka baja yang komprehensif dan kuat, salah satunya adalah tipe K-truss yang paling kokoh dibandingkan dengan tipe rangka lain dan masih jarang diterapkan.

Jembatan tipe ini menggunakan material baja. Diantaranya keuntungan material baja adalah baja memiliki keseragaman dan keawetan yang tinggi, baja memiliki sifat daktilitas yang cukup tinggi, dan mudah dalam penyambungan antar elemen satu dengan lainnya menggunakan alat sambung las atau baut. Dalam perencanaan dan analisis struktur rangka, syarat yang harus dipenuhi adalah kekakuan, kekuatan, dan daktilitas. Kekuatan berhubungan dengan besarnya material dalam menahan gaya yang terjadi, parameternya berupa tegangan *ultimate* dan tegangan leleh. Kekakuan berhubungan dengan besarnya gaya yang dapat menghasilkan deformasi, parameternya berupa Modulus Elastisitas. Sedangkan untuk daktilitas berhubungan dengan besarnya deformasi yang dihasilkan sebelum terjadi keruntuhan pada struktur jembatan.

Selain itu, pembangunan sebuah konstruksi jembatan harus direncanakan untuk mampu menahan beban. Beberapa jenis beban yang sering dijumpai, antara lain beban mati, beban hidup, beban angin dan beban gempa. Beban gempa sendiri merupakan faktor penting dalam merencanakan struktur dengan pembebanan tak terduga atau sukar diprediksi. Terdapat 3 metode dalam pemodelan beban gempa pada jembatan yaitu metode statis, semi dinamis dan metode dinamis (Perencanaan Beban Gempa untuk Jembatan, 2004). Analisis dinamis adalah metode yang paling tepat mengingat Indonesia sendiri memiliki potensi gempa tinggi dengan *magnitude* gempa yang besar. *Time history analysis* atau analisis riwayat waktu merupakan analisis dinamis yang dapat dilakukan dengan memperhatikan pergerakan tanah di sekitar lokasi struktur. Hasil analisis ini berupa beban gempa untuk setiap waktu selama durasi gempa, sehingga diperoleh nilai percepatan gempa itu sendiri.

Pada umumnya analisis gempa yang dilakukan berupa beban gempa dua arah, namun dalam penelitian ini juga menggunakan analisis beban gempa tiga arah agar mendapatkan hasil yang mendekati dengan kondisi sebenarnya. Selain itu, pada pembangunan jembatan rangka dengan skala besar, kecil kemungkinan terjadi ketidakseragaman mutu material karena pekerjaan konstruksi dilakukan dengan standar metode pelaksanaan yang tinggi dan material dengan kualitas yang baik, Namun apabila jembatan dibangun dengan ketidakseragaman mutu dan material yang berkualitas kurang baik hal tersebut harus menjadi pertimbangan oleh kontraktor atau perencana jembatan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruh penggunaan material dengan mutu yang memiliki ketidakseragaman ini terhadap kekuatan jembatan secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan di atas, maka dalam penelitian ini didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penurunan mutu dan modulus elastisitas struktur jembatan rangka tipe *K-Truss* terhadap kapasitas jembatan dalam menahan beban gempa dua arah dan tiga arah?
2. Bagaimana pengaruh penurunan mutu dan modulus elastisitas struktur jembatan rangka tipe *K-Truss* terhadap daktilitas jembatan dalam menahan beban gempa dua arah dan tiga arah?

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dan tujuan dari tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh penurunan mutu dan modulus elastisitas struktur jembatan rangka tipe *K-Truss* terhadap kapasitas jembatan dalam menahan beban gempa dua arah dan tiga arah.
2. Mengetahui pengaruh penurunan mutu dan modulus elastisitas struktur jembatan rangka tipe *K-Truss* terhadap daktilitas jembatan dalam menahan beban gempa dua arah dan tiga arah.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah yang digunakan sebagai berikut:

1. Jembatan yang digunakan adalah jembatan rangka baja tipe *K-Truss*.
2. Jembatan yang dianalisis merupakan struktur rangka utama Jembatan K.H. Ahmad Fattah, Malang.
3. Spesifikasi dimensi jembatan disesuaikan dengan melakukan pendekatan melalui pengukuran di lapangan.
4. Pemodelan struktur jembatan dilakukan dengan menggunakan *software ABAQUS Student Edition*.
5. Mutu material baja BJ-37 yang digunakan disesuaikan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.
6. Mutu material baja BJ-41 yang digunakan disesuaikan dengan SNI 03-1729-2002.
7. Pembebanan yang diperhitungkan adalah beban gempa dua arah dan tiga arah serta berat sendiri jembatan.
8. Menggunakan analisis dinamis non-linear yaitu dengan riwayat waktu (*time-history*) Gempa El Centro di California.
9. Analisis dinamis riwayat waktu (*time history*) dilakukan dengan menggunakan *software ABAQUS Student Edition*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan hasil analisis yang diharapkan agar dapat menjadi sebuah pengetahuan baru serta dapat digunakan
2. Sebagai referensi untuk bahan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh ketidakseragaman mutu dan modulus elastisitas terhadap kapasitas struktur jembatan.

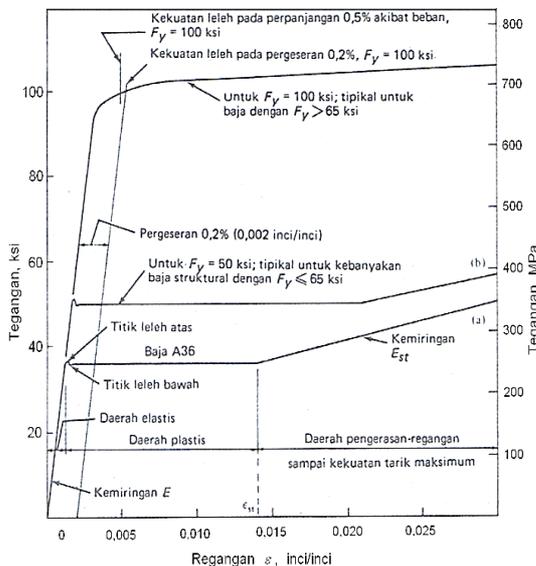
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Baja

2.1.1 Umum

Material baja memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih tinggi dibanding beton. Bila baja diberi gaya tarik secara terus menerus sampai melewati batas elastisnya, baja akan mengalami regangan cukup besar sebelum runtuh. Sifat regangan ini dapat dilihat saat sebuah struktur baja mengalami stress. Biasanya struktur akan meregang terlebih dahulu, ketika gaya telah melewati batas kritis, struktur tersebut akan runtuh. Berbeda dengan beton yang akan langsung runtuh bila gaya melebihi batas kritisnya. Sifat baja yang penting dalam penggunaannya sebagai bahan konstruksi adalah kekuatannya yang tinggi dibandingkan dengan bahan lainnya, yaitu kemampuan untuk berdeformasi secara baik dalam tegangan, dalam regangan maupun dalam kompresi sebelum kegagalan, serta sifat keseragaman yang tinggi.



Gambar 2.1 Kurva tegangan-regangan tipikal

Sumber: Salmon and Johnson, *Steel Structures Design and Behavior*, 4th ed

2.1.2 Sifat Mekanik Baja

Dalam merencanakan sebuah struktur sebaiknya harus memenuhi beberapa syarat, yaitu kekuatan, kekakuan dan daktilitas. Kekuatan dikaitkan dengan besarnya tegangan yang mampu dipikul tanpa rusak, baik berupa deformasi besar (*yielding*) atau *fracture* (terpisah). Tolak ukur dari sebuah kerusakan, baik berupa *yielding* dan *fracture* adalah tegangan leleh

dan tegangan putus. Faktor kekakuan adalah besarnya gaya untuk menghasilkan satu unit deformasi, parameternya berupa modulus elastisitas. Faktor daktilitas terkait dengan besarnya deformasi sebelum keruntuhan (*failure*) terjadi, suatu faktor penting untuk perencanaan struktur dengan pembebanan tak terduga atau sukar diprediksi (gempa atau angin). Properti mekanik beberapa bahan material konstruksi sebagai berikut.

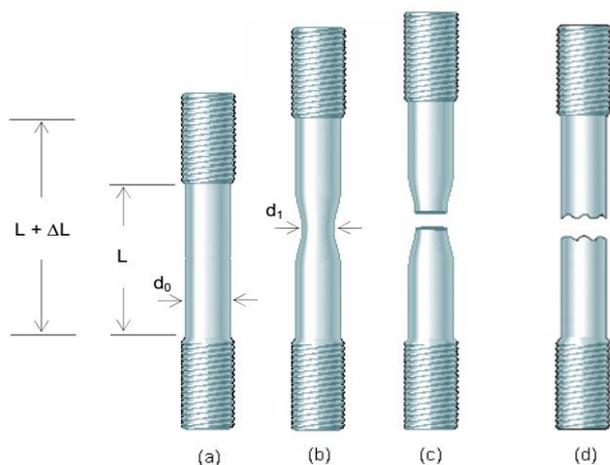
Tabel 2.1

Properti Mekanik Beberapa Bahan Material Konstruksi

Material	Berat Jenis (kg/m ³)	Modulus Elastisitas (MPa)	Kuat (MPa)		Rasio Kuat ÷ BJ (1E+6 * 1/mm)
			Leleh	Putus	
Serat Karbon	1760	150,305	-	5,650	321
Baja A36	7850	200,000	250	400-550	5.1-7
Baja A992	7850	200,000	345	450	5.7
Alumunium	2723	68,947	180	200	7.3
Besi Cor	7000	190,000	-	200	2.8
Bambu	400	18,575	-	60*	15
Kayu	640	11,000	-	40*	6.25
Beton	2200	21,000-33,000	-	20-50	0.9-2.3

Sumber: Rittironk dan Elnieiri (2008)

Untuk dapat mengetahui perilaku suatu struktur baja, maka perlu pemahaman mengenai sifat mekanik dari baja. Model pengujian yang paling tepat untuk mendapatkan sifat mekanik dari material baja adalah dengan melakukan uji tarik terhadap benda uji. Hal ini dikarenakan, uji tekan tidak dapat memberikan data yang akurat terhadap sifat mekanik material baja. Uji tekan tidak dapat dilakukan pada benda uji atau material baja dikarenakan adanya potensi benda uji mengalami tekuk dan mengakibatkan ketidakstabilan dari benda uji tersebut. Selain itu, perhitungan tegangan yang terjadi di dalam benda uji lebih mudah dilakukan untuk uji tarik daripada uji tekan.



Gambar 2.2 Benda uji material baja (b dan c) bersifat liat (*ductile*), (d) bersifat rapuh/getas (*brittle*)

Tegangan (f) merupakan perbandingan antara gaya luar yang bekerja dengan luas penampang pada benda tersebut atau dapat didefinisikan dengan gaya per satuan luas. Tegangan sendiri dibagi menjadi dua, yaitu *engineering stress* dan *true stress*.

1. *Engineering Stress* adalah tegangan hasil pengukuran intensitas gaya reaksi yang dibagi dengan luas permukaan benda aslinya.

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (2-1)$$

Dimana :

σ_{eng} = *Engineering stress* (MPa)

F = Gaya (N)

A_0 = Luas permukaan awal (mm²)

2. *True Stress* adalah Tegangan hasil pengukuran intensitas gaya reaksi yang dibagi dengan luas permukaan sebenarnya (*actual*).

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana :

σ = *True stress* (MPa)

F = Gaya (N)

A = Luas permukaan sebenarnya (mm²)

Regangan (ϵ) adalah perubahan bentuk per satuan panjang pada suatu batang. Regangan juga dibagi menjadi dua yaitu *engineering strain* dan *true strain*.

1. *Engineering Strain* adalah regangan yang dihitung menurut dimensi benda aslinya (panjang awal).

$$\epsilon_{eng} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2-3)$$

Dimana :

ϵ_{eng} = *Engineering strain*.

Δl = Perubahan panjang (m)

l_0 = Panjang mula-mula (m)

l = Panjang setelah diberi gaya (m)

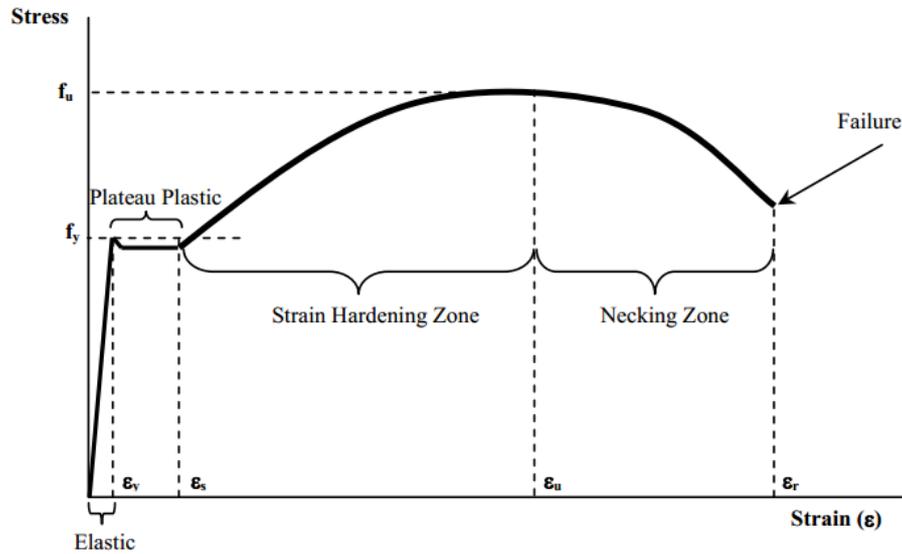
2. *True Strain* adalah Regangan yang dihitung pada kondisi dimensi benda saat itu (sebenarnya).

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \dots\dots\dots (2-4)$$

Dimana :

ϵ = *True strain*

Gambar 2.3 dibawah ini merupakan hasil uji tarik dari benda uji material baja yang dilakukan hingga mengalami putus.



Gambar 2.3 Kurva hubungan tegangan (f) dan regangan (ϵ)

Sumber: Agus Setiawan (2013)

Dari **Gambar 2.3**, dapat kita lihat bahwa terdapat 4 zona perilaku yaitu:

1. Zona elastik , zona awal regangan, tegangan bersifat proporsional, kemiringan linier yang ada merupakan modulus young E yang disebut juga sebagai modulus elastisitas. Zona ini berakhir dengan ditandai tercapainya kelelahan material (f_y).
2. Zona plastik, pada zona ini hanya terjadi peningkatan nilai regangan, namun tidak mengalami peningkatan nilai tegangan. Zona ini berbentuk garis datar (*flat plateau*).
3. Zona *strain hardening*, pada zona ini secara bertahap nilai tegangan meningkat hingga mencapai ultimit (f_u).
4. Zona *necking*, pada zona ini nilai regangan bertambah dan nilai tegangan cenderung menurun dan diakhiri dengan kegagalan fraktur.

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, sifat-sifat mekanik dari material baja dalam merencanakan struktur baja yaitu:

1. Modulus Elastisitas, E = 200.000 MPa
2. Modulus Geser, G = 80.000 MPa
3. Rasio Poisson = 0,30
4. Koefisien Muai Panjang, α = $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Sedangkan berdasarkan tegangan leleh dan tegangan putus, SNI 03-1729-2002 mengklasifikasikan mutu dari material baja menjadi lima kelas mutu sebagai berikut.

Tabel 2.2
Sifat Mekanik Baja Struktural

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

Sumber: SNI 03-1729-2002

Nilai daktilitas dari berbagai material baja berbeda-beda. Baja mutu tinggi mempunyai nilai daktilitas yang lebih rendah dibandingkan misalnya mutu BJ 37. Beberapa baja mutu tinggi bahkan mempunyai nilai daktilitas mendekati satu atau dengan kata lain hampir tidak ada bagian yang mendatar pada kurva tegangan-regangan. Untuk baja mutu tinggi ini juga tidak menunjukkan nilai tegangan leleh (f_y) yang jelas, sehingga nilai tegangan leleh dari baja mutu tinggi didefinisikan sebagai besarnya tegangan yang dapat menimbulkan regangan permanen sebesar 0,2%. Rendahnya daktilitas juga membuat material baja menjadi lebih sensitif akibat adanya tegangan sisa yang terjadi selama proses pembuatan baja tersebut.

2.2 Jembatan

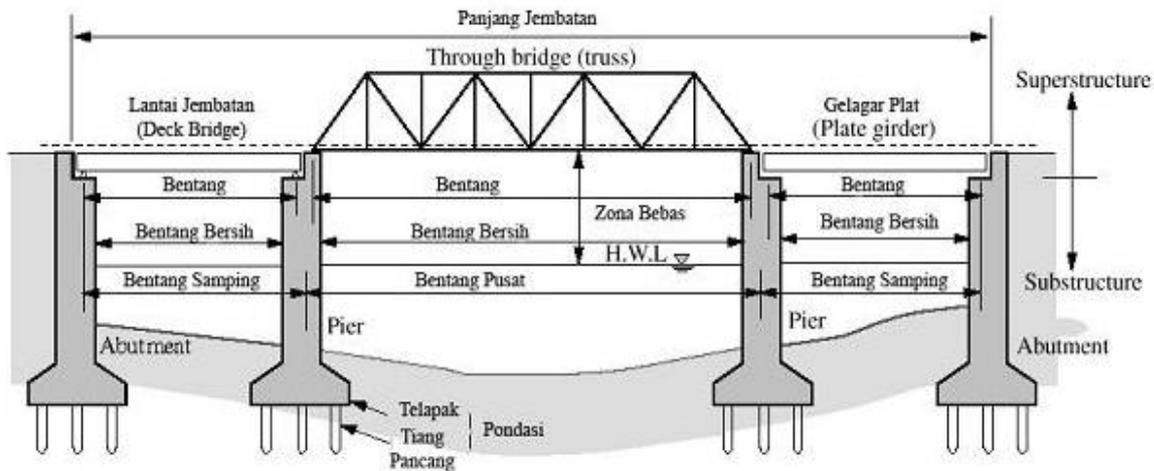
2.2.1 Umum

Menurut Struyck dan Van Der Veen (1984), jembatan merupakan suatu konstruksi yang dibangun untuk meneruskan jalan melewati suatu rintangan yang berada lebih rendah. Rintangan tersebut dapat berupa sungai, danau, saluran irigasi, rawa, jurang, lembah serta jalur lalu lintas biasa. Sementara itu menurut Supriyadi dan Muntohar (2007), jembatan adalah suatu bangunan yang memungkinkan suatu jalan menyilang sungai/ saluran air, lembah atau menyilang jalan lain yang tidak sama tinggi permukannya. Peranan jembatan tidak hanya sebagai infrastruktur penghubung suatu wilayah. Namun pada dasarnya jembatan juga mempunyai tujuan dan fungsi dalam berbagai bidang, baik dalam bidang ekonomi, sosial budaya, geografi dan kependudukan, politik dan HANKAM. Oleh karena itu, jembatan memiliki peranan yang sangat penting dalam aktifitas bermasyarakat, berbangsa dan bernegara dalam berbagai bidang.

2.2.2 Bagian Struktur Jembatan

Menurut Siswanto (1993), secara umum bentuk dan bagian-bagian suatu struktur jembatan dapat dibagi dalam empat bagian utama, yaitu : struktur atas, struktur bawah, jalan pendekat, dan bangunan pengaman. Bangunan atas (*upper structure*) adalah konstruksi yang berhubungan langsung dengan beban-beban lalu lintas yang bekerja. Sedangkan, bangunan

bawah (*sub structure*) adalah konstruksi yang menerima beban-beban dari bangunan atas dan meneruskannya ke lapisan pendukung (tanah keras) di bawahnya.



Gambar 2.4 Bagian-bagian konstruksi jembatan

Sumber: Chen dan Duan (2000)

1. Struktur Bangunan Atas Jembatan (*Upper/ Super-Structure*)

Menurut Pranowo (2007) Struktur atas atau adalah bagian dari struktur jembatan yang berfungsi untuk menahan beban-beban lalu lintas kendaraan, orang, barang maupun berat sendiri konstruksi jembatan. Kemudian seluruh beban yang ditampung oleh bangunan atas akan disalurkan menuju bagian bawah. Bagian-bagian yang termasuk dalam bangunan atas (*upper structure*) pada jembatan umumnya meliputi:

- a. Trotoar:
 - Sandaran dan tiang sandaran
 - Peninggian trotoar (*Kerb*)
 - Slab lantai trotoar
- b. Slab lantai kendaraan
- c. Gelagar (*Girder*)
- d. Balok diafragma
- e. Ikatan pengaku (ikatan angin, ikatan melintang)
- f. Tumpuan (*Bearing*)

2. Struktur Bangunan Bawah Jembatan (*Sub Structure*)

Menurut Departemen Pekerjaan Umum (modul Pengantar Dan prinsip-Prinsip Perencanaan Bangunan Bawah / Pondasi Jembatan, 1998) Bangunan bawah berfungsi untuk memikul beban-beban yang diberikan bangunan atas kemudian disalurkan ke pondasi dan dari pondasi diteruskan ke tanah keras di bawahnya. Bangunan bawah ini biasanya terbagi 2 yaitu kepala jembatan (*abutment*) dan pilar (*pier*). Dalam

merencanakan sebuah jembatan, bangunan bawah harus mendapat perhatian lebih. Hal ini dikarenakan, bangunan bawah merupakan penyalur semua beban yang bekerja pada jembatan termasuk gaya akibat pengaruh beban gempa. Bagian-bagian yang termasuk dalam bangunan bawah (*sub structure*) pada jembatan umumnya meliputi:

- a. Kepala / Pangkal Jembatan (*abutment*)
 - Dinding belakang (*Back Wall*)
 - Dinding Penahan (*Breast Wall*)
 - Dinding Sayap (*Wing Wall*)
 - Oprit, plat injak (*Approach Slab*)
 - Tumpuan (*Bearing*)
- b. Pilar (*pier*)
 - Kepala pilar (*Pier Head*)
 - Pilar (*Pier*), yang berupa dinding, kolom, atau portal
 - Tumpuan (*Bearing*)

2.2.3 Pembebanan Pada Struktur Jembatan

Analisis pembebanan dalam perhitungan struktur jembatan pada Tugas Akhir ini seluruh ketentuan dan besaran pembebanannya disesuaikan dengan Peraturan Pembebanan Jembatan SNI T-02-2005. Peraturan ini membahas masalah beban dan aksi-aksi lainnya yang akan digunakan dalam perencanaan pembebanan jembatan jalan raya yang termasuk juga pejalan kaki. Dalam analisis pembebanan aksi-aksi beban perpindahan dan pengaruh lain dikelompokkan dalam:

- a. Beban Mati
- b. Beban Hidup
- c. Beban Lalu Lintas
- d. Beban Angin
- e. Beban Gempa

2.2.3.1 Beban Mati

Beban mati adalah beban tetap yang berasal dari berat sendiri jembatan atau bagian jembatan yang ditinjau, termasuk segala unsur tambahan yang dianggap merupakan satu kesatuan dengannya (RSNI T-02-2005). Beban mati yang diperhitungkan dalam perencanaan sebuah konstruksi jembatan merupakan beban dengan jangka waktu tetap dari

semua berat bagian-bagian struktur jembatan dan elemen non struktur yang membebani masing-masing bagian struktur yang dihitung.

Tabel 2.3
Faktor Beban untuk Berat Sendiri

Jangka Waktu	Faktor Beban			
	K	K		
		Biasa	Terkurangi	
Tetap	Baja, alumunium	1,0	1,1	0,9
	Baja pra cetak	1,0	1,2	0,85
	Beton dicor di tempat	1,0	1,3	0,75
	Kayu	1,0	1,4	0,7

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Berat masing-masing bagian struktur dan elemen non struktur dihitung sebesar berat per satuan volume bagian struktur dan elemen non struktur yang ditetapkan dalam SNI-T-02-2005 dikalikan dengan besar volume yang membebani, semua beban mati harus dikalikan dengan faktor beban (R_i) masing-masing seperti yang terdapat dalam ketentuan SNI T-02-2005.

Tabel 2.4
Berat Isi Bahan-bahan Bangunan untuk Beban Mati

No.	Bahan	Berat/Satuan Isi (kN/m^3)	Kerapatan Massa (kg/m^3)
1.	Campuran alumunium	26,7	2720
2.	Lapisan permukaan beraspal	22	2240
3.	Besi tuang	71	7200
4.	Timbunan tanah dipadatkan	17,2	1760
5.	Kerikil dipadatkan	18,8-22,7	1920-2320
6.	Aspal beton	22	2240
7.	Beton ringan	12,25-19,6	1250-2000
8.	Beton	22-25	2240-2560
9.	Beton prategang	25-26	2560-2640
10.	Beton bertulang	23,5-25,5	2400-2600
11.	Timbal	111	11400
12.	Lempung lepas	12,5	1280
13.	Batu pasangan	23,5	2400
14.	Neoprin	11,3	1150
15.	Pasir kering	15,7-17,2	1600-1760
16.	Pasir basah	18-18,8	1840-1920
17.	Pasir lunak	17,2	1760
18.	Baja	77	7850
19.	Kayu (ringan)	7,8	800
20.	Kayu (keras)	11	1120
21.	Air murni	9,8	1000
22.	Air garam	10	1025
23.	Besi tempa	75,5	7680

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Tidak hanya beban mati yang berupa berat sendiri jembatan saja yang perlu diperhitungkan, beban mati tambahan atau beban utilitas juga perlu diperhitungkan. Beban

mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen non struktural dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan (RSNI T-02-2005).

Beban mati tambahan tidak berlaku untuk tanah yang bekerja pada jembatan. Faktor beban yang digunakan untuk tanah yang bekerja pada jembatan diperhitungkan sebagai tekanan tanah pada arah vertikal.

Tabel 2.5
Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan

Jangka Waktu	Faktor Beban			
	K	K		
		Biasa	Terkurangi	
Tetap	Keadaan umum	1,0 (1)	2,0	0,7
	Keadaan khusus	1,0	1,4	0,80

Catatan (1) Faktor beban daya layan 1,3 digunakan untuk berat utilitas.

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

2.2.3.2 Beban Hidup

Beban hidup adalah beban bergerak yang diperhitungkan besar beban dari pengaruh lalu-lintas yang melewati jembatan, termasuk pejalan kaki yang melintas jembatan tersebut.

2.2.3.3 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas adalah semua beban hidup baik dari arah vertikal dan arah horizontal. Beban lalu lintas diakibatkan oleh adanya aksi kendaraan pada jembatan. Hal ini berhubungan dengan pengaruh dinamis tetapi tidak termasuk akibat tumbukan (RSNI T-02-2005). Beban lalu lintas dalam merencanakan jembatan terdiri dari beban lajur "D" dan beban truk "T".

Tabel 2.6
Faktor Beban Akibat Beban Lajur "D"

Jangka Waktu	Faktor Beban	
	K	K
Transien	1,0	1,0

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

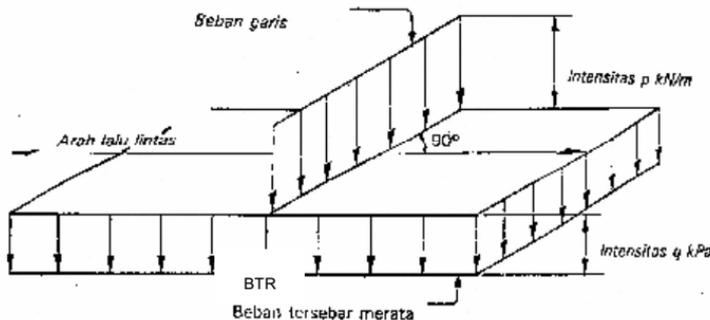
Beban lajur "D" bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan. Adanya beban lajur "D" menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu kendaraan beriringan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur "D" yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri. Beban "D" didasarkan pada karakteristik jembatan yang memiliki lajur lalu lintas rencana dimana jumlah maksimum lajur lalu lintas untuk berbagai lebar lalu lintas telah ditentukan.

Tabel 2.7
Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana

Tipe Jembatan (1)	Lebar Jalur Kendaraan (2) (m)	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (n _i)
Satu Lajur	4,0-5,0	1
Dua Arah, Tanpa Median	5,5-8,25	2 (3)
	11,3-15,0	4
	8,25-11,25	3
Banyak Arah	11,3-15,0	4
	15,1-18,75	5
	18,8-22,5	6
Catatan (1)	Untuk jembatan tipe lain, jumlah lajur lalu lintas rencana harus ditentukan oleh instansi yang berwenang.	
Catatan (2)	Lebar jalur kendaraan adalah jarak minimum antara kerb atau rintangan untuk satu arah atau jarak antara kerb/rintangan/median dengan median untuk banyak arah.	
Catatan (3)	Lebar minimum yang aman untuk dua lajur kendaraan adalah 6 meter. Lebar jembatan antara 5 meter – 6 meter harus dihindari oleh karena hal ini akan memberikan kesan kepada pengemudi seolah-olah memungkinkan untuk menyiap.	

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Beban lajur “D” terdiri dari beban tersebar merata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT), seperti tampak pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.5 Intensitas beban lajur “D”

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Beban terbagi rata (BTR) mempunyai intensitas q kPa, dimana besarnya q tergantung pada panjang total yang dibebani L . Ketentuannya sebagai berikut:

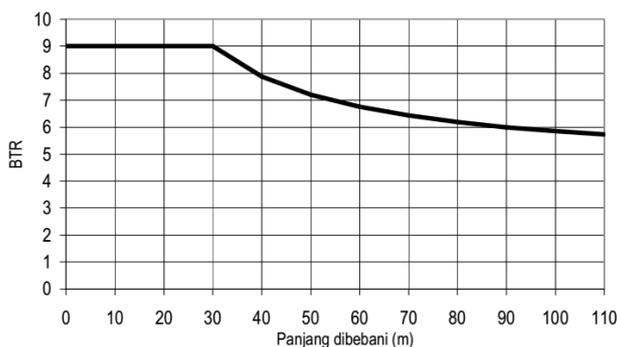
- Bila $L \leq 30$ m; $q = 9$ kPa
- Bila $L > 30$ m; $q = 9 (0,5 + (15/L))$ kPa

Dimana:

q adalah intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan.

L adalah panjang total jembatan yang dibebani.

Panjang yang dibebani L adalah panjang total BTR yang bekerja pada jembatan. BTR harus dipecah menjadi panjang-panjang tertentu untuk mendapatkan pengaruh maksimum pada jembatan menerus atau bangunan khusus.



Gambar 2.6 Grafik besar BTR dengan bentang struktur
Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Beban garis (BGT) dengan intensitas P kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensitas P adalah 49,0 kN/m. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi dalam arah melintang jembatan pada bentang lainnya.

Penyebaran beban "D" harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga akan menimbulkan momen maksimum. Penyusunan komponen-komponen BTR dan BGT dari beban "D" pada arah melintang harus sama.

Sedangkan, beban "T" adalah satu kendaraan berat dengan 3 as yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap as terdiri dari dua bidang kontak pembebanan, inilah yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat.

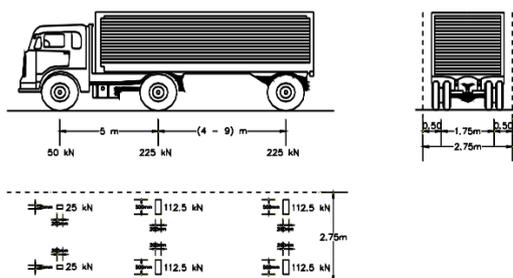
Tabel 2.8

Faktor Beban Akibat Pembebanan Truk "T"

Jangka Waktu	Faktor Beban	
	K_S ; T_T ;	K_U ; T_T ;
Transien	1,0	1,8

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Pembebanan truk "T" terdiri dari kendaraan truk semi-trailer yang mempunyai susunan dan berat as seperti terlihat dalam Gambar 2.11. Berat dari masing-masing as disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 as tersebut bisa diubah-ubah antara 4,0 m sampai 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.



Gambar 2.7 Beban lajur "D"

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

2.2.3.4 Beban Angin

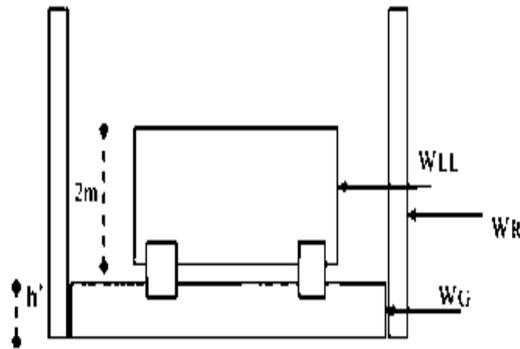
Beban angin adalah beban yang diperhitungkan pada gelagar induk, merupakan tekanan dari tiupan angin yang bekerja tegak lurus terhadap bidang struktur dan bidang lalu lintas sepanjang bentang jembatan.

Tabel 2.9
Faktor Beban Akibat Beban Angin

Jangka Waktu	Faktor Beban	
	$K_S; EW;$	$K_U; EW;$
Transien	1,0	1,2

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Luas ekuivalen diambil sebagai luas pada bidang pengaruh dari pada jembatan dalam elevasi proyeksi tegak lurus. Untuk jembatan rangka batang diambil 30% dari luas yang dibatasi unsur rangka terluar. Akibat dari beban angin, bagian struktur jembatan akan menerima susunan beban seperti Gambar 2.9.



Gambar 2.8 Susunan beban angin
Dimana:

- W_{LL} : Beban angin pada bidang kendaraan seluas $(2m \cdot L)$.
- W_R : Beban angin pada bidang gelagar rangka seluas 30% bidang rangka.
- W_G : Beban angin pada bidang kendaraan seluas $(h' \cdot L)$.
- L : Panjang total jembatan.

Beban angin pada jembatan, harus dianggap bekerja secara merata pada seluruh bangunan atas. Apabila suatu kendaraan sedang berada diatas jembatan, beban garis merata tambahan arah horisontal harus diterapkan pada permukaan lantai seperti diberikan dengan rumus:

$$T_{EW} = 0,0012 C_w (V_w)^2 A_b \text{ (kN)} \dots\dots\dots(2-5)$$

dengan:

$$C_w = 1.2 \dots\dots\dots(2-6)$$

Tabel 2.10
Koefisien Ceret C_w

Tipe Jembatan		C_w
Bangunan atas masif: (1), (2)		
b/d = 1.0		2.10 (3)
b/d = 2.0		1.50 (3)
b/d \geq 6.0		1.25 (3)
Bangunan atas rangka		1.2
Catatan (1)	b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar sandaran. d = tinggi bangunan atas, termasuk tinggi badan sandaran yang masif.	
Catatan (2)	Untuk harga antara dari b/d bisa di interpolasi linear.	
Catatan (3)	Apabila bangunan atas mempunyai superelevasi, C_w harus dinaikkan sebesar 3% untuk setiap derajat superelevasi. Dengan menaikkan maksimum 2,5%.	

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

Tabel 2.11
Koefisien Ceret C_w

Keadaan Batas	Lokasi	
	Sampai 5 km dari pantai	> 5 km dari pantai
Daya Layan	30 m/s	25 m/s
Ultimit	35 m/s	30 m/s

Sumber: RSNI T-02-2005 (2005)

2.2.3.5 Beban Gempa

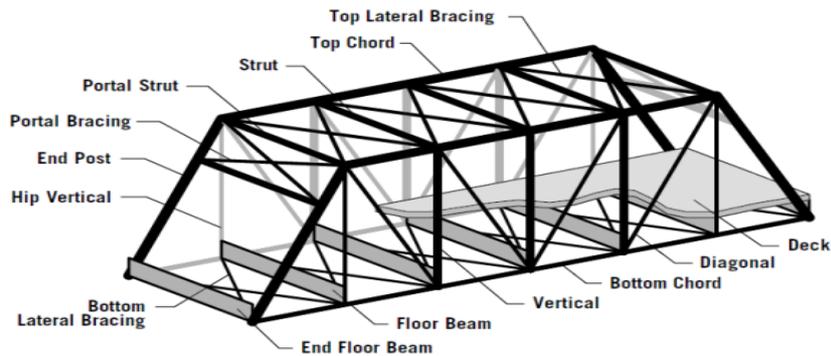
Beban gempa merupakan faktor penting yang harus diperhitungkan dalam merencanakan struktur jembatan. Hal ini dikarenakan, beban gempa merupakan pembebanan pada struktur jembatan yang sifatnya tak terduga atau sukar diprediksi. Pengaruh gempa bumi pada jembatan dihitung senilai dengan pengaruh suatu gaya horizontal pada konstruksi yang ditinjau dan perlu ditinjau pula gaya-gaya lain yang berpengaruh seperti gaya gesek pada perletakan, tekanan hidro-dinamik akibat gempa, tekanan tanah akibat gempa dan gaya angkat apabila pondasi yang direncanakan merupakan pondasi terapung/pondasi langsung (Supriyadi, dkk., 2007).

Pengaruh gempa pada struktur sederhana masih dapat disimulasi oleh suatu beban statik ekuivalen. Untuk struktur jembatan besar dengan tingkat kerumitan yang tinggi, penentuan besar beban pengaruh gempa harus dilakukan dengan analisa dinamis yang lengkap seperti yang ditetapkan dalam perencanaan beban gempa untuk jembatan (Pd.T.04.2004.B).

2.2.4 Jembatan Rangka (*Truss Bridge*)

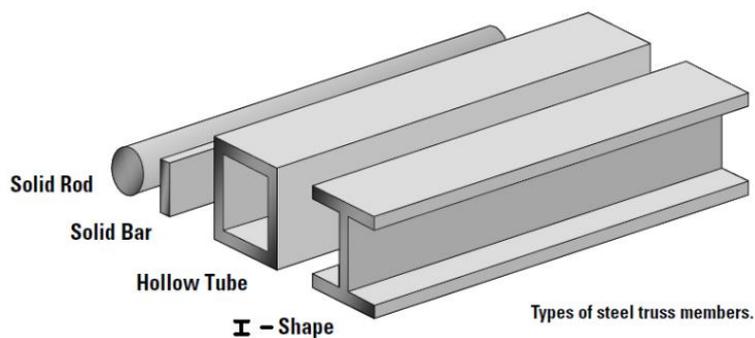
Rangka (*truss*) merupakan struktur kokoh yang tersusun atas member-member baja yang dihubungkan menjadi suatu ikatan. Member adalah gabungan dari beberapa elemen

yang telah disambung menggunakan baut atau las. Pada umumnya, member-member tersebut disusun bertumpukan menjadi bentuk segitiga. Berikut ini adalah komponen-komponen dari jembatan rangka, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2.9 Komponen-komponen jembatan rangka
Sumber: Ressler (2001)

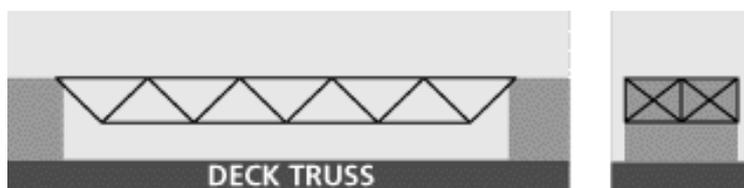
Rangka jembatan memiliki banyak variasi bentuk *cross-section*, dapat dilihat pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2.10 Jenis-jenis *cross-section* rangka baja
Sumber: Ressler (2001)

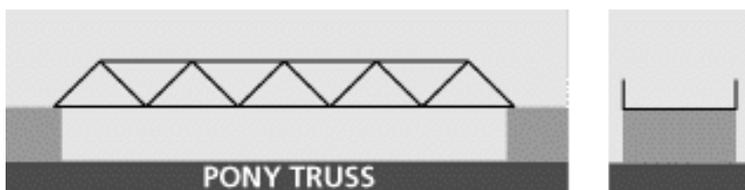
Berdasarkan lokasi *deck* dan *top chord*, jembatan rangka terbagi atas tiga kategori, yaitu *through truss*, *pony truss*, dan *deck truss*.

1. *Deck Truss*, ciri-ciri yang dapat terlihat pada tipe ini adalah Rangka baja yang berada pada bagian bawah, sehingga lalu lintas kendaraan berada di atas struktur rangka utama.



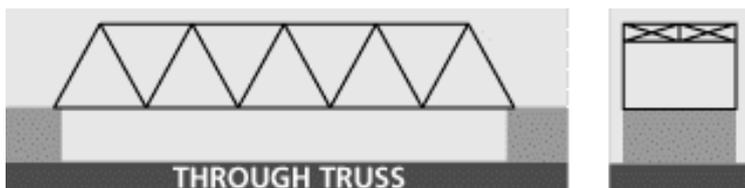
Gambar 2.11 Jembatan rangka tipe *Deck Truss*

2. *Pony Truss*, ciri-ciri dari tipe ini adalah biasanya tidak terdapat penambatan melintang pada bagian dan lalu lintas kendaraan berada di tengah struktur utama.



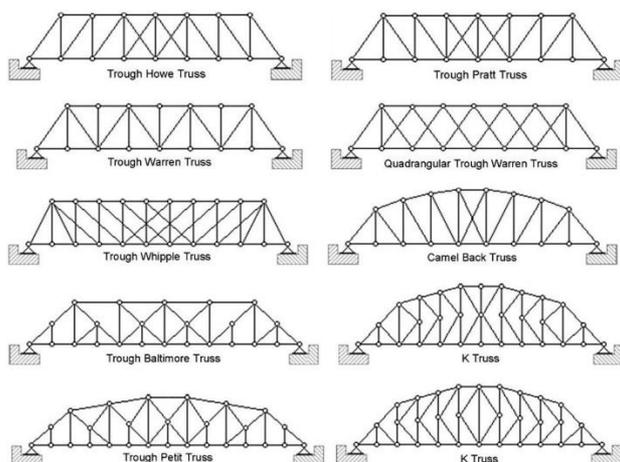
Gambar 2.12 Jembatan rangka tipe *Pony Truss*

3. *Through Truss*, ciri-ciri dari tipe ini adalah lalu lintas kendaraan melalui bagian atas struktur utama (seperti jembatan rangka pada umumnya) dengan penambatan melintang pada bagian atas dan bawah.



Gambar 2.13 Jembatan rangka tipe *Through Truss*

Jembatan rangka baja biasanya digunakan untuk bentang 20 m sampai 375 m. Ada banyak tipe jembatan rangka yang dapat digunakan diantaranya sebagai berikut, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.14 Tipe-tipe jembatan rangka

Sumber: Modul 1 Pengenalan Jembatan Rangka Baja, Ir. Thamrin Nasution (2018)

Dari masing-masing jenis rangka tersebut, memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam penulisan skripsi ini difokuskan untuk membahas jembatan tipe “*K-Truss*” dan jembatan tipe “*Warren-Truss*”. berikut ini adalah beberapa perbandingan penggunaan tipe-tipe struktur jembatan rangka “*K-Truss*” dan “*Warren-Truss*” yang sering dijumpai pada konstruksi jembatan:

1. Jembatan Rangka Baja tipe “*K-Truss*”

Jembatan tipe ini merupakan jembatan yang banyak digunakan di Indonesia dikarenakan struktur jembatan yang sangat kokoh dan mempunyai resiko tekuk yang

sedikit. Jembatan ini dinamakan tipe *K-Truss* dikarenakan memiliki elemen web berbentuk “K” dengan panjang elemen web yang pendek.

Selain kokoh dan mempunyai resiko tekuk yang sedikit keunggulan dari jembatan rangka batang tipe *K-Truss* ini adalah mampu mengurangi tekanan pada member atau batang vertikal serta dapat mengurangi penggunaan material baja dan biaya konstruksi jika didesain dengan efisien.

Kelemahan dari jembatan rangka batang tipe ini adalah sedikit rumit dalam pelaksanaan konstruksi jembatannya. Selain itu, meningkatnya volume baja karena ada member rangka tambahan menyebabkan tipe ini mempunyai berat struktur yang cukup berat.

2. Jembatan Rangka Baja tipe “*Warren-Truss*”

Jembatan rangka batang tipe *warren* dipatenkan oleh *James Warren* dan *Willooughby Theobald Monzani* di Britania Raya pada tahun 1848. Jembatan tipe ini tidak memiliki batang vertikal pada konfigurasi rangkanya, melainkan bentuk segitiga sama sisi atau sama kaki. Struktur rangka yang digunakan terdiri dari batang horizontal atas, batang horizontal bawah dan batang diagonal. Untuk batang horizontal atas mengalami gaya tekan dan batang horizontal bawah mengalami gaya tarik. Sedangkan, batang diagonalnya sebagian mengalami gaya tekan dan sebagiannya lagi mengalami gaya tarik.

Keunggulan dari jembatan rangka batang tipe *warren-truss* ini adalah baik apabila digunakan untuk struktur jembatan dengan bentang panjang. Selain itu desain yang cukup sederhana pada struktur rangkanya membuat jembatan tipe ini memiliki berat yang relatif lebih ringan dan juga penyaluran beban yang merata antar member-member rangka bajanya. Kelemahan dari jembatan rangka batang tipe *warren* ini adalah jembatan ini tidak bisa bekerja dengan baik jika beban yang diberikan terpusat dan biaya konstruksi yang cukup banyak dikarenakan penambahan rangka.

2.3 Gempa Bumi

2.3.1 Umum

Gempa bumi adalah getaran atau guncangan yang terjadi di permukaan bumi (Schodek, 1999). Gempa bumi terjadi akibat pelepasan energi dari dalam bumi secara tiba-tiba. Pelepasan energi tersebut dipancarkan ke segala arah dalam bentuk gelombang yang merambat melalui tanah dan mengakibatkan permukaan bumi dan struktur bangunan maupun jembatan di atasnya menjadi bergetar. Getaran ini menimbulkan gaya-gaya pada

struktur bangunan maupun jembatan karena setiap struktur cenderung mempunyai gaya untuk mempertahankan dirinya dari gerakan.

Sebagian besar wilayah di Indonesia merupakan wilayah dengan tingkat kerawanan yang tinggi terhadap gempa. Hal ini dapat dilihat dari seringnya bencana akibat gempa yang terjadi dalam beberapa tahun terakhir di Indonesia. Dampak dari terjadinya gempa tersebut adalah rusaknya berbagai sarana dan prasarana penting, salah satunya jembatan. Dengan kondisi geografis yang seperti ini, perlu dilakukan perencanaan / pelaksanaan suatu sistem struktur yang tahan gempa pada setiap konstruksi jembatan yang akan didirikan di wilayah Indonesia, khususnya wilayah dengan resiko gempa menengah hingga tinggi. Hal ini perlu dilakukan guna meminimalisir dampak gempa terhadap struktur jembatan. Secara garis besar gempa bumi dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis, yaitu:

1. Gempa Bumi Vulkanik

Gempa bumi vulkanik disebabkan oleh aktivitas magma yang terjadi di dalam perut bumi. Umumnya gempa bumi vulkanik ini sering terjadi pada gunung berapi yang masih aktif. Semakin tinggi tingkat aktifitas gunung berapi akan menyebabkan timbulnya letusan dan juga terjadinya gempa bumi.

2. Gempa Bumi Tektonik

Gempa bumi tektonik disebabkan oleh aktivitas pergerakan lempeng pelat tektonik, yaitu bergesernya lempeng-lempeng tektonik secara tiba-tiba sehingga menyebabkan gelombang seismik menyebar dan merambat melalui lapisan kulit bumi atau kerak bumi. Gempa bumi tektonik yang dahsyat dapat mengakibatkan kerusakan struktur bangunan dan dapat diikuti dengan bencana lain seperti tsunami.

3. Gempa Bumi Runtuhan

Gempa bumi runtuhan umumnya disebabkan oleh keruntuhan, baik di atas maupun di bawah permukaan tanah. Gempa bumi ini biasanya terjadi pada daerah kapur ataupun daerah pertambangan. Namun gempa bumi ini jarang terjadi dan bersifat lokal.

4. Gempa Bumi Buatan

Gempa bumi buatan disebabkan oleh aktivitas yang dilakukan oleh manusia seperti contoh peledakan bom nuklir yang memiliki daya ledak besar.

Dari keempat klasifikasi gempa bumi di atas, gempa bumi yang paling sering terjadi terutama di Indonesia adalah gempa bumi tektonik. Menurut Bambang Budiono dkk (2011), secara spesifik gempa bumi tektonik dapat diartikan sebagai peristiwa pelepasan energi gelombang seismik secara tiba-tiba yang disebabkan oleh adanya deformasi lempeng tektonik yang ada di kerak bumi.

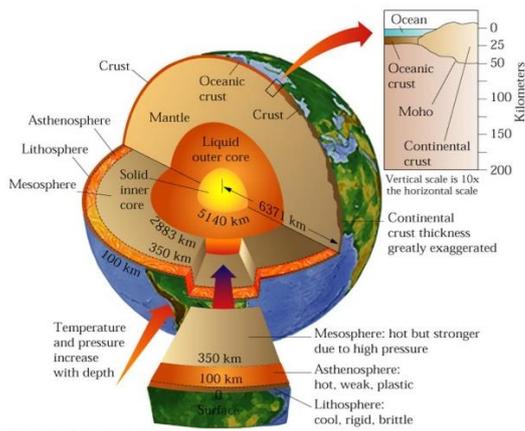
2.3.2 Penyebab Gempa Bumi

Teori yang memuat penyebab terjadinya gempa bumi sangat banyak. Beberapa para ahli dalam bencana terutama bencana yang diakibatkan oleh gempa bumi berpendapat, bahwa penyebab terjadinya gempa bumi adalah sebagai berikut:

1. Gua-gua besar yang berada di bawah tanah mengalami keruntuhan secara tiba-tiba. Namun, pada kenyataannya hal tersebut jarang tidak pernah terjadi.
2. Meteor yang menumbuk atau menabrak permukaan bumi. Dalam tata surya kita terdapat banyak meteor yang mengelilingi orbit bumi. Meteor tersebut dapat jatuh ke atmosfer bumi kapan saja. Dampak dari jatuhnya meteor jika sampai pada permukaan bumi akan mengakibatkan timbulnya getaran pada bumi. Getaran ini yang disebut gempa jatuhan. Namun, kejadian ini sangat jarang terjadi dan tidak terlalu berdampak besar atau dalam skala gempa lokal.
3. Letusan gunung berapi akibat adanya aktivitas magma yang terjadi di dalam perut bumi sebelum gunung berapi meletus. Gempa bumi akibat letusan gunung berapi ini disebut gempa bumi vulkanik.
4. Gempa tektonik yang terjadi akibat pergerakan lempeng tektonik bumi secara tiba-tiba. Pada umumnya, gempa tektonik berkekuatan lebih dari 5 skala Richter.

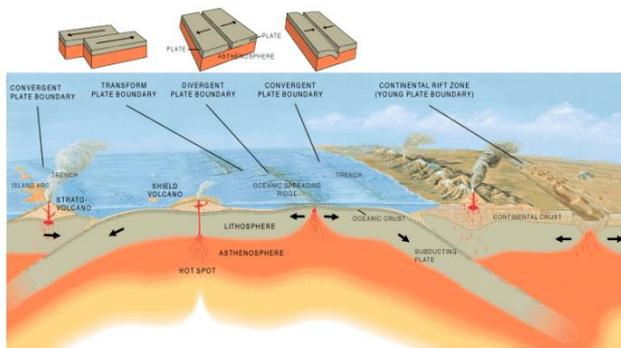
Menurut teori lempeng tektonik, kerak bumi terdiri dari beberapa bagian yang terdiri dari pelat-pelat tektonik (Lempeng *Lithosphere*) yang dapat merupakan bagian *oceanic* atau *continental* (benua). Pelat tektonik ini terapung di atas lapisan *Asthenosphere* serta membentuk tiga jalur gempa di perbatasannya. Lempeng-lempeng tersebut bergerak dengan arah dan kecepatan berbeda relatif satu dengan yang lain dan menimbulkan regangan elastis. Pergerakan lempeng ini disebabkan oleh arus konveksi.

Lapisan atas bumi terdiri dari *Lithosfer* dan *Asthenosfer*. *Lithosfer* mempunyai densitas yang lebih besar, mudah patah, dan bersifat kaku. *Asthenosfer* mempunyai densitas yang lebih kecil dibandingkan lithosfer, bersuhu tinggi dan kental. Akibat gerakan bumi yang berputar secara terus-menerus menimbulkan arus pada *Asthenosfer* yang memiliki suhu tinggi. Arus inilah yang disebut arus konveksi yang bergerak dari tekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah. Gerakan *Asthenosfer* tersebut akan menggerakkan *Lithosfer* yang mengapung di atasnya, akibatnya *Lithosfer* yang berupa lempeng-lempeng akan bergerak. Struktur lapisan bumi dapat dilihat pada Gambar 2.12.

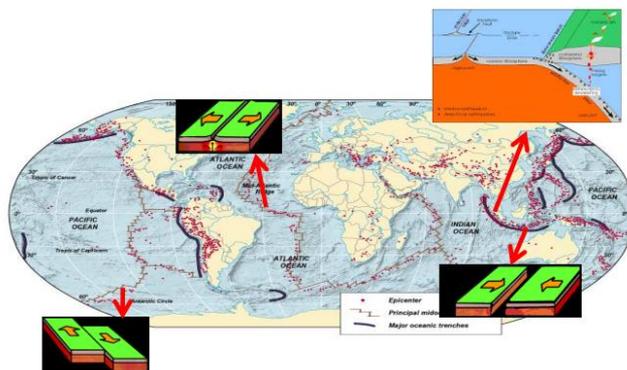


Gambar 2.15 Struktur lapisan bumi
Sumber: John Wiley and Sons (1999)

Ada tiga jenis pergerakan satu lempeng tektonik relatif terhadap lempeng lainnya, yaitu ketika kedua lempeng saling menjauhi (*Spreading*), saling mendekati (*Collision*) dan saling geser (*Transform*).



Gambar 2.16 Jenis pergerakan lempeng
Sumber: USGS (2001)



Gambar 2.17 Posisi perbatasan lempeng pada peta dunia
Sumber: BMKG (2015)

Ketika dua buah lempeng bertumbukan maka daerah batas diantara kedua lempeng akan terjadi tegangan (*Stress*) yang besar. Tegangan tersebut akan terjadi terus-menerus sehingga melampaui kekuatan kulit bumi. Hal itu akan mengakibatkan terjadinya patahan pada kulit bumi di daerah yang terlemah. Kulit bumi yang patah tersebut akan melepaskan energi untuk

kembali ke dalam keadaan semula. Peristiwa pelepasan energi inilah yang disebut gempa bumi tektonik.

Indonesia merupakan salah satu wilayah yang aktif terhadap gempa bumi, karena terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dan satu lempeng tektonik kecil. Ketiga lempeng tektonik itu adalah lempeng tektonik Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik serta lempeng kecil Filipina. Lempeng Indo-Australia bergerak dibawah lempeng Eurasia, demikian pula lempeng Pasifik bergerak kearah barat. Pertemuan lempeng tektonik Indo-Australia dan Eurasia merupakan sumber gempa dangkal dan bergerak kearah utara sehingga di bagian darat ke utara di sekitar Jawa – Nusa tenggara merupakan sumber gempa menengah dan dalam.

2.3.3 Ukuran Kekuatan Gempa

Skala yang sering digunakan untuk mengukur kekuatan gempa adalah skala *Richter* (*Richter Magnitude Scale*) atau skala MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*). Skala *Richter* sendiri mengukur *magnitude* gempa berdasarkan amplitudo yang terjadi, sehingga hasil yang didapatkan lebih objektif. Sedangkan, pada skala MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*) mengukur intensitas gempa berdasarkan efeknya terhadap manusia atau bangunan sehingga lebih bersifat subjektif.

1. *Magnitude*

Magnitude (*M*) merupakan suatu besaran untuk menggambarkan besarnya regangan energi yang dilepaskan pada waktu terjadinya gempa. *Magnitude* menunjukkan pebandingan amplitudo (*A*) pada jarak 100 km dari epicenter dengan amplitudo standar $A_0 = 0,001$ mm dalam skala logaritma. Adapun rumus umum untuk mencari *magnitude* yang dikemukakan oleh *Richter* sebagai berikut.

$$M = \log_{10} \frac{A}{A_0} \dots\dots\dots (2-7)$$

Sedangkan, energi *E* yang dilepaskan oleh gempa berskala *M Richter* adalah:

$$\log_{10} E = 11,8 + 1,5M \dots\dots\dots (2-8)$$

Dimana *E* adalah total energy dan *M* adalah *magnitude*.

Berikut ini adalah tabel tingkatan *magnitude* dan kekuatan gempa, pengaruhnya, serta perkiraan berapa jumlah gempa yang terjadi setiap tahunnya. Namun, hanya gempa-gempa yang mempunyai nilai *magnitude* ($M \geq 5$) yang perlu ditinjau dalam perencanaan struktur.

Tabel 2.12
Magnitude dan Kelas Kekuatan Gempa

Magnitude Gempa	Kelas Kekuatan Gempa	Pengaruh Gempa	Perkiraan Kejadian per Tahun
< 2,5	<i>Minor Earthquake</i>	Umumnya tidak dirasakan, tetapi dapat direkam oleh seismograf.	900.000
2,5 s/d 4,9	<i>Light Earthquake</i>	Dapat dirasakan, tetapi hanya menyebabkan kerusakan kecil.	30.000
5 s/d 5,9	<i>Moderate Earthquake</i>	Menyebabkan kerusakan pada bangunan dan struktur-struktur yang lain.	500
6 s/d 6,9	<i>Strong Earthquake</i>	Kemungkinan dapat menyebabkan kerusakan besar, pada daerah dengan populasi tinggi.	100
7 s/d 7,9	<i>Major Earthquake</i>	Menimbulkan kerusakan yang serius.	20
≥ 8,0	<i>Great Earthquake</i>	Dapat menghancurkan leburkan daerah yang dekat dengan pusat gempa.	Satu setiap 5-10 tahun.

Sumber: Chen (2000)

Magnitude gempa yang umumnya dipakai, terdiri atas:

a. *Local Magnitude* (M_L).

Magnitudo gempa berkaitan dengan pelepasan energi yang terjadi saat gempa bumi. Kemudian Richter (1935), memberikan notasi M sebagai simbol magnitudo gempa yang kemudian dikenal sebagai M skala *Richter* (M *Richter Scales*). Jika gempa yang diukur sifatnya lokal maka magnitudo gempa diberi notasi M_L .

b. *Surface Magnitude* (M_s)

Menurut Kramer (1996), *Local Magnitude* tidak dapat membedakan pengaruh jenis gelombang. Pada lokasi yang jauh dari *epicenter*, *body waves* akan melemah sehingga getaran tanah lebih didominasi oleh *surface waves*.

c. *Body Magnitude* (M_B).

Perhitungan *body magnitude* didasarkan pada gelombang *P-wave*. Magnitudo gempa M_B digunakan apabila gempa yang terjadi relatif dalam. Ketika kondisi gelombang permukaan *surface waves* melemah, sebaliknya gelombang *P-wave* menjadi dominan.

d. *Moment Magnitude* (M_w).

Gempa yang diukur pada beberapa lokasi akan mendapatkan hasil magnitudo gempa yang berbeda. Menurut Kramer (1996), pengukuran gempa dengan parameter gerakan tanah menjadi kurang maksimal pada gempa yang besar jika dibandingkan dengan gempa yang lebih kecil. Hal ini pada umumnya disebut dengan *earthquake magnitude saturation*. *Saturation* merupakan kondisi dimana perhitungan magnitudo menjadi kurang teliti, sehingga perlu mencari parameter lain untuk menentukan magnitudo gempa. Parameter yang dapat digunakan adalah akibat langsung yang disebabkan oleh gempa yaitu geometri dan

konfigurasi patahan. Dengan demikian, untuk gempa yang skalanya lebih besar maka perhitungannya tidak lagi memakai *wave amplitude* akan tetapi menggunakan besaran *energy released*.

2. Intensitas

Intensitas merupakan parameter pengukuran daya rusak pada gempa pada suatu daerah tertentu. Skala gempa intensitas ini umumnya diperoleh dari klasifikasi skala kerusakan berdasarkan kesepakatan antar kelompok pengamat gempa. Biasanya, skala intensitas gempa yang digunakan adalah MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*). Skala MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*) ini bersifat subjektif, dimana pengamatan mengenai kerusakan yang diakibatkan oleh gempa setiap orang mempunyai pendapat yang berbeda. Tabel tingkatan kekuatan gempa dengan menggunakan skala MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*) sebagai berikut.

Tabel 2.13
Keterangan Skala MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*)

Skala Intensitas	Keterangan
I	Tidak terasa orang, hanya tercatat oleh pencatat yang peka.
II	Getaran terasa oleh orang yang sedang istirahat, terutama yang berada di lantai dan di atasnya.
III	Benda-benda yang tergantung bergoyang, bergetar ringan.
IV	Getaran seperti truk lewat. Jendela, pintu dan barang pecah belah bergemerincing.
V	Getaran terasa oleh orang di luar gedung, orang tidur terbangun, benda-benda tidak stabil di atas meja terguling atau jatuh, pintu bergerak menutup dan membuka.
VI	Getaran terasa oleh semua orang, banyak orang takut dan keluar rumah, berjalan kaki sulit, kaca jendela pecah, meja dan kursi bergerak.
VII	Sulit berdiri, getaran terasa oleh pengendara motor dan mobil, genteng di atap terlepas.
VIII	Pengemudi mobil terganggu, tembok bangunan retak.
IX	Semua orang panik, tembok bangunan mengalami kerusakan berat, pipa-pipa dalam tanah putus.
X	Sebagian konstruksi portal dan temboknya rusak beserta pondasinya, tanggul dan bendungan rusak berat, rel kereta api bengkok sedikit, banyak terjadi tanah longsor.
XI	Rel kereta api rusak berat, pipa-pipa dalam tanah rusak.
XII	Terjadi kerusakan total, bangunan-bangunan mengalami kerusakan, barang-barang terlempar ke udara.

Sumber: Chen (2000)

Apabila dibandingkan antara skala *Richter* dan skala MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*), maka diperoleh hubungan sebagai berikut.

Tabel 2.14
Skala MMI (*Modified Mercalli Intensity Scale*)

<i>Magnitude</i> (<i>Richter</i>)	Intensitas (MMI)	Pengaruh-pengaruh Tipikal
≤ 2	I-II	Pada umumnya tidak terasa.
3	III	Terasa di dalam rumah, tidak ada kerusakan.
4	IV-V	Terasa oleh banyak orang, barang-barang bergerak, tidak ada kerusakan struktural.
5	VI-VII	Terjadi beberapa kerusakan struktural, seperti retak-retak pada dinding.
6	VII-VIII	Kerusakan menengah, seperti hancurnya dinding.
7	IX-X	Kerusakan besar, seperti runtuhnya bangunan.
≥ 8	XI-XII	Rusak total atau hamper hancur total.

Sumber: Chen (2000)

2.3.4 Pengaruh Gempa Bumi Terhadap Struktur Jembatan

Gempa bumi mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap sebuah struktur jembatan. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan yang akurat dalam perencanaan sebuah struktur jembatan tahan gempa agar dapat memenuhi keamanan dan kenyamanan bagi pengguna jembatan. Menurut Moehle dan Oberhard dalam Chen (2000), kerusakan gempa pada jembatan bias jadi memiliki akibat yang besar. Kerusakan ini bisa diklasifikasikan menjadi dua kelas, yaitu:

1. *Primary Damage.*

Penyebab utama dari kerusakan ini adalah pergerakan atau adanya deformasi pada tanah. Tidak hanya itu saja, kerusakan ini dapat menyebabkan terjadinya *collapse* pada jembatan.

2. *Secondary Damage.*

Penyebab utama dari kerusakan ini adalah deformasi yang merupakan hasil dari kegagalan struktur pada jembatan. Selain itu, kerusakan ini juga disebabkan oleh redistribusi dari aksi internal untuk struktur yang tidak didesain.

Sedangkan berdasarkan RSNI2-2833-201X, jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh/ *collapse*. Namun, dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa dengan kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun.

Selama terjadi gempa terdapat satu atau lebih puncak gerakan, dimana puncak ini adalah efek maksimum dari gempa tersebut. Beban gempa diambil sebagai gaya horizontal yang ditentukan berdasarkan perkalian antara koefisien respons elastik (C_{sm}) dengan berat struktur ekuivalen yang kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi respons (R) dengan rumus sebagai berikut:

$$E_Q = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t \dots\dots\dots (2-9)$$

Dimana:

E_Q adalah gaya gempa horizontal statis (kN).

C_{sm} adalah koefisien respons gempa elastik pada mode getar ke-m.

R adalah faktor modifikasi respons.

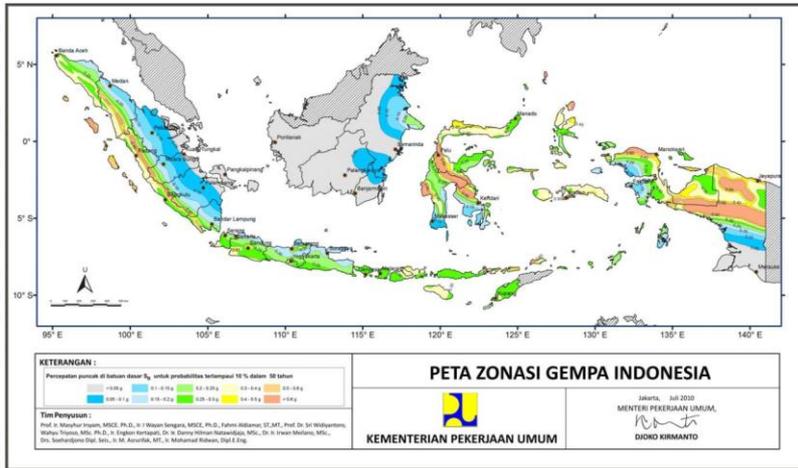
W_t adalah berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai.

Koefisien respons elastik (C_{sm}) diperoleh dari peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan (Gambar 2.14 hingga Gambar 2.19) sesuai dengan daerah gempa dan periode ulang gempa rencana. Koefisien percepatan yang diperoleh berdasarkan peta gempa dikalikan dengan faktor amplifikasi yang sesuai dengan kondisi tanah sampai kedalaman 30 m di bawah struktur jembatan.

Tetapi peraturan ini hanya berlaku untuk jembatan konvensional. Pemilik pekerjaan harus menentukan dan menyetujui peraturan yang sesuai untuk jembatan non konvensional. Selain itu, peraturan ini tidak perlu digunakan untuk struktur bawah tanah. Pengaruh gempa terhadap gorong-gorong persegi dan bangunan bawah tanah tidak perlu diperhitungkan, kecuali struktur tersebut melewati patahan aktif. Pengaruh ketidakstabilan kondisi tanah, misalnya likuifaksi, longsor, dan perpindahan patahan terhadap fungsi jembatan harus diperhitungkan.

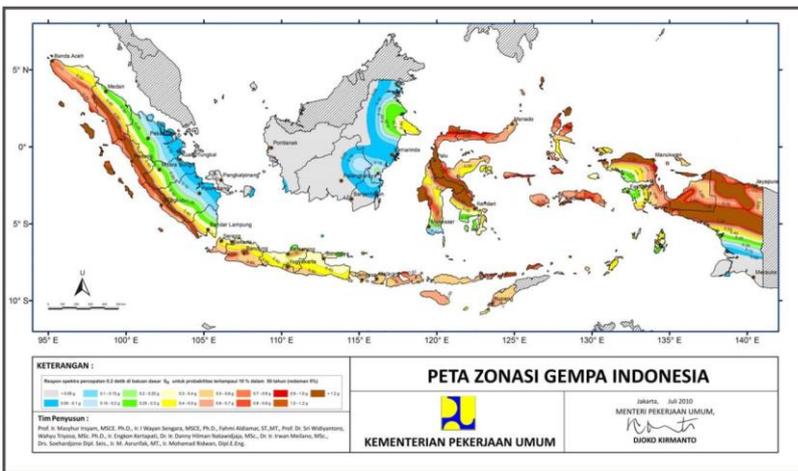
Pada intinya, sebuah konstruksi tahan gempa harus didesain memiliki konfigurasi yang tepat dan teratur. Hal ini dikarenakan, perilaku dari struktur tersebut mudah untuk dianalisis dan disipasi energi inelastik dapat dipertimbangkan pada jumlah besar dari komponen leleh yang teridentifikasi. Dari pengalaman sebelumnya menunjukkan bahwa jembatan kemungkinan besar mudah rusak jika deformasi terjadi pada elemen *brittle*, konfigurasi struktur yang kompleks atau *bridge lacks redundancy*.

Berikut ini merupakan koefisien respons elastik (C_{sm}) yang diperoleh dari peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan sesuai dengan daerah gempa dan periode ulang gempa rencana.



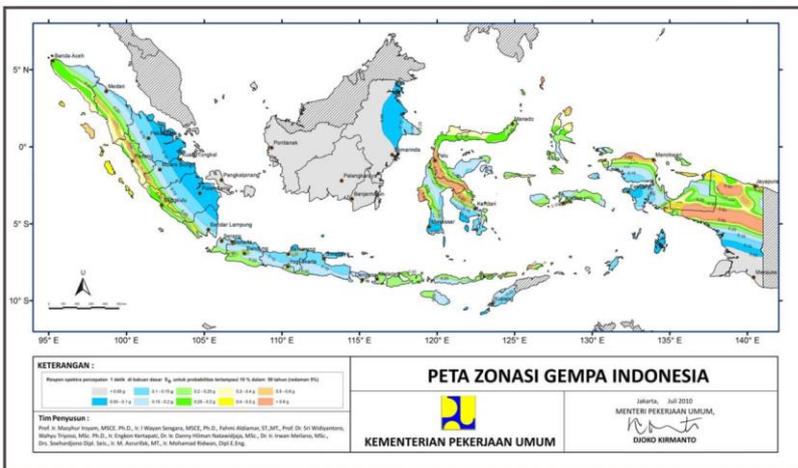
Gambar 2.18 Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun

Sumber: RSNi2-2833-201X



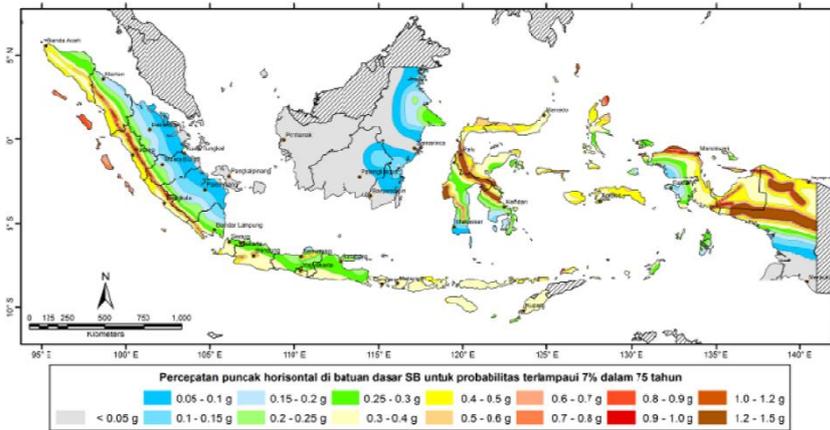
Gambar 2.19 Peta percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun

Sumber: RSNi2-2833-201X



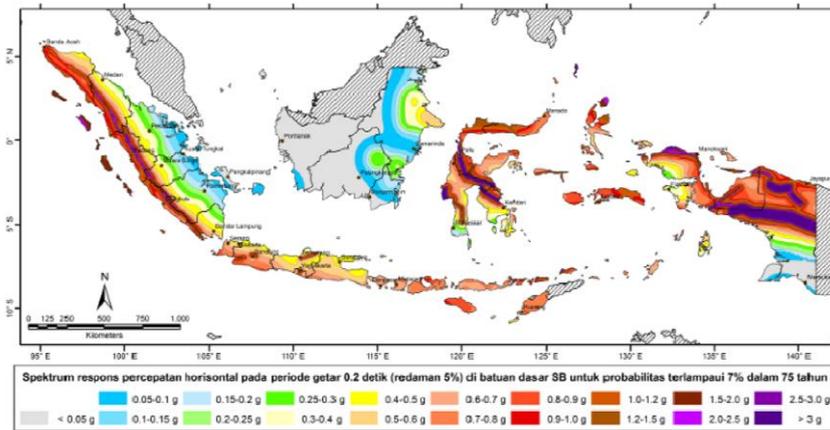
Gambar 2.20 Peta respons spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun

Sumber: RSNi2-2833-201X



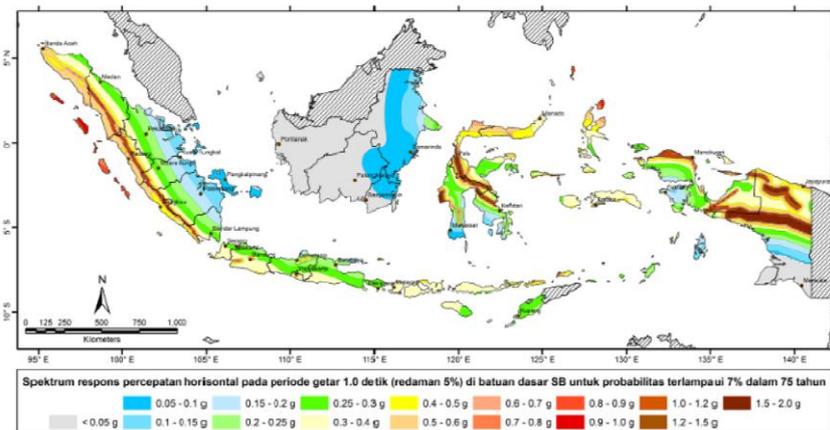
Gambar 2.21 Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

Sumber: RSNi2-2833-201X



Gambar 2.22 Peta respons spektra percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

Sumber: RSNi2-2833-201X



Gambar 2.23 Peta respons spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

Sumber: RSNi2-2833-201X

2.4 Analisis Nilai Eigen

Sebelum melakukan analisis dinamis perlu dilakukan analisa nilai eigen value. Analisa nilai eigen menghasilkan bentuk ragam getaran bebas tanpa redaman dan frekuensi dari sistem. Dari ragam getaran tersebut dapat dilihat perilaku suatu struktur ketika mengalami gaya gempa. Kemudian setiap mode yang dominan dianalisis untuk mengetahui karakteristik dinamis utama pada struktur tersebut. Dimana persamaan gerak keseimbangan dinamis:

$$[M] \ddot{u}(t) + [C] \dot{u}(t) + [K] u(t) = P(t) \dots \dots \dots (2-10)$$

Dimana [M], [C], [K] berturut –turut adalah matriks yang lebih kompleks.

Nilai-nilai *Eigen* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$[K - \omega^2 M] \phi = 0 \dots \dots \dots (2-11)$$

Analisa nilai eigen bertujuan untuk mengetahui nilai *damping ratio* untuk input analisis dinamis struktur. Untuk perhitungan koefisien α dan β yang akan dipakai pada analisis dinamis adalah sebagai berikut:

Adapun beberapa parameter yang mempengaruhi respon dinamik struktur, antara lain:

1. Periode getar

Periode getar adalah waktu yang diperlukan struktur untuk melakukan satu siklus getaran harmonic sederhana dalam satu mode getarnya. Hubungan antara periode getar dan frekuensi alami ω_n dan frekuensi alami cyclic f_n adalah sebagai berikut:

$$T = \frac{1}{f} \dots \dots \dots (2-12)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \dots \dots \dots (2-13)$$

2. Mode getar

3. Redaman

Menurut Chopra (1995), redaman merupakan proses dimana getaran bebas berkurang amplitudonya. Pada redaman, energi dari system yang bergetar terdisipasi melalui berbagai macam mekanisme. Newmark dan Hall (1982) menentukan rekomendasi nilai rasio redaman untuk beberapa tipe dan kondisi struktur.

Tabel 2.15
Typical Housner type and current Japanese damping values

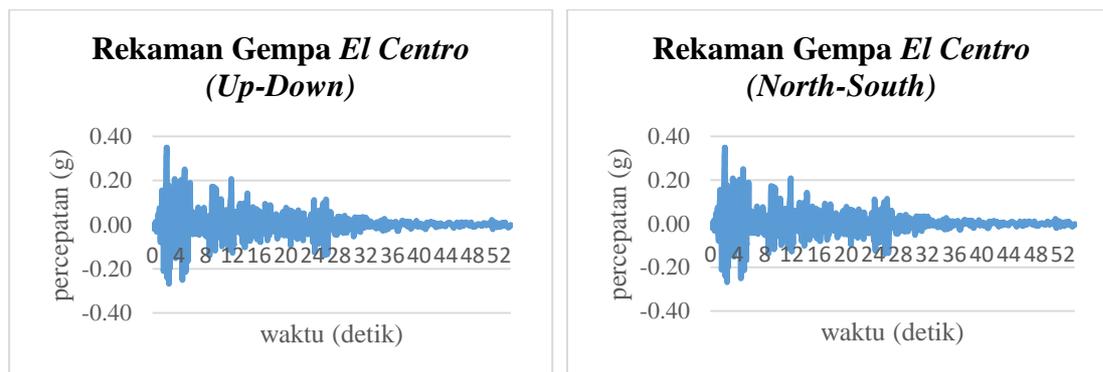
		Percent
1.	Piping	0.5
2.	Welded steel	1.0
3	Structural steel building frames	2.0
4.	Prestressed concrete	2.0
5.	Reinforced concrete	5.0

Sumber: Structural Damping Values As a Function of Dynamic response Stress and deformation Levels (1980)

2.5 Analisis Dinamis

2.5.1 Umum

Untuk memperhitungkan pengaruh gaya lateral akibat gempa terhadap struktur bangunan biasanya didekati dengan dua pendekatan, yaitu analisa statik ekuivalen dan analisis dinamis (respon spektra atau *time history*). Analisis statik ekuivalen merupakan metode analisis struktur dengan getaran gempa yang dimodelkan sebagai beban-beban horizontal statik yang bekerja pada pusat-pusat massa bangunan, sedangkan analisis dinamis merupakan suatu metode analisis struktur dengan getaran gempa yang dimodelkan sebagai beban dinamis, yaitu beban yang arah dan besarnya berubah setiap waktu. Salah satu analisis dinamis yang biasa dilakukan adalah *time history analysis* (analisis riwayat waktu). *Time history analysis* sangat cocok digunakan untuk menganalisis struktur yang tidak beraturan terhadap pengaruh gempa rencana. Pada analisis ini struktur yang di desain diberi percepatan pada permukaan tanah sesuai rekaman percepatan terhadap waktu dari data *time history*. Kemudian percepatan ini dapat diamati respon strukturnya. Gambar di bawah ini merupakan contoh rekaman gempa.



Gambar 2.24 Rekaman gempa El Centro di California
Sumber: El Centro (1979)

2.5.2 Prinsip *Time History Analysis*

Analisis dinamis diperlukan sebagai verifikasi, bila kinerja struktur terhadap gempa tidak diwakili sepenuhnya oleh prosedur-prosedur perhitungan statis dan semi dinamis. Berdasarkan SNI 2833:2008 mengenai Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan, bahwa analisis dinamis perlu dipertimbangkan untuk tipe jembatan dengan kinerja rumit sebagai berikut:

1. Bentang utama melebihi 200 m.
2. Jembatan fleksibel dengan periode panjang yang melebihi 1,5 detik.
3. Jembatan dengan pilar tinggi yang melebihi 30 m.

4. Jembatan pelengkung dengan lantai di atas, struktur kabel (*cable-stayed*), jembatan gantung, jembatan yang menggunakan isolasi dasar.

Cara yang digunakan untuk analisis dinamis adalah cara respon spektra berdasarkan analisis riwayat waktu dan analisis moda, serta cara integral langsung yang menggunakan rumus pergerakan equation of motion. Untuk analisis riwayat waktu diperlukan data gempa besar tipikal yang umumnya terjadi di luar lokasi jembatan. Gerakan gempa masukan berupa gelombang akselerasi dengan amplitudo yang dimodifikasi berdasarkan wilayah frekuensi (frequency zone) sehingga sesuai akselerasi standar respon spektra. Gempa tipikal harus dipilih berdasarkan kondisi tanah dan topografi yang serupa dengan lokasi jembatan, sehingga dapat dilakukan modifikasi amplitudo. Gempa masukan di permukaan tanah anggapan dimodifikasi dengan rumus berikut:

$$S = c_D S_0 \dots\dots\dots(2-14)$$

Dimana:

S adalah Akselerasi gempa masukan (g);

c_D adalah Faktor modifikasi nilai redaman terhadap standar 5% sesuai konstanta redaman moda h_i ;

S_0 adalah Akselerasi wilayah gempa dari respon spektra (g).

$$c_D = \frac{1,5}{40 h_i + 1} + 0,5 \dots\dots\dots(2-15)$$

Dimana:

h_i adalah konstanta redaman moda

Bila analisis dinamis menunjukkan hasil yang jauh lebih kecil dari analisis statis, maka perencanaan seismik umumnya didasarkan pada hasil analisis statis.

2.6 Software ABAQUS Student Edition

Software ABAQUS Student Edition menyediakan program yang dapat memodelkan benda yang akan dianalisis. Seperti kebanyakan program komputer yang tersedia di pasaran, ABAQUS mempunyai fasilitas CAD/CAM/CAE yang bisa difungsikan sebagai program analisis elastis dan plastis. Keunggulan *ABAQUS Student Edition* dibanding dengan program lain sejenis adalah lengkapnya menu yang tersedia pada *part module*. Selain itu kita juga bisa melakukan *test* dengan memasukkan data secara manual di dalam *input file*. Pengembangan bahasa program dalam *ABAQUS Student Edition* memungkinkan para desainer lebih mudah dalam memilih metode yang digunakan dalam melakukan proses simulasi dan analisis (*ABAQUS Student Edition User manual*, 2003).

Kemungkinan terjadi kegagalan dan kesalahan selama proses *running* dari *input file* yang sudah dimasukkan biasanya disebabkan karena kesalahan dalam meng-*input* data pada *module ABAQUS Student Edition*. Analisis *ABAQUS Student Edition* secara lengkap terdiri dari tiga tahap, yaitu: *preprocessing*, simulasi, dan *postprocessing*.

1. Proses Awal (*Preprocessing*)

Bagian ini merupakan langkah awal untuk menentukan model yang akan dilakukan analisis. Pemodelan part dilakukan dalam software *ABAQUS Student Edition* dengan memasukkan geometri yang telah kita ketahui sebelumnya. Dalam menggambarkan model, dapat menggunakan koordinat sistem yang akan dibuat. Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu harus memeriksa semua keyword dan parameter yang digunakan agar tidak terjadi kesalahan. Selain itu, urutan dalam memasukkan data harus diperhatikan dengan benar serta tidak lupa memastikan satuan yang digunakan dalam input data.

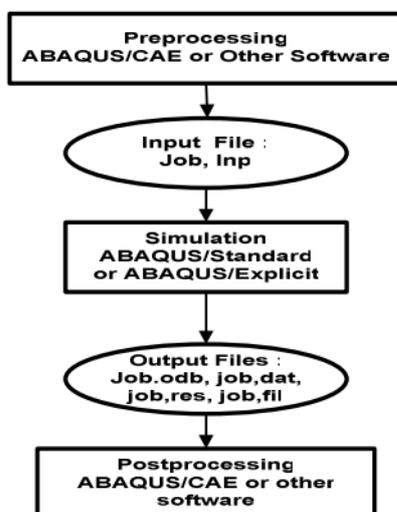
2. Simulasi (*Simulation*)

Simulasi yang biasanya dijalankan sebagai pengantar proses merupakan tahap dimana program *ABAQUS Student Edition* memulai proses untuk melakukan pemecahan masalah numerik yang diidentifikasi dalam model.

3. Proses Akhir (*Postprocessing*)

Pada proses ini dapat diambil kesimpulan dari hasil simulasi yang sudah selesai berupa perpindahan, gaya atau variable lainnya yang sudah dilakukan perhitungan. Hasil akhir biasanya dibuat dalam suatu laporan atau sebuah catatan.

Apabila dibentuk menjadi sebuah diagram alir, maka analisis dalam *ABAQUS Student Edition* sebagai berikut:



Gambar 2.25 Diagram aliran proses *running*
Sumber: ABAQUS Analysis User's Manual 6.9

Dengan mengikuti alur berfikir dari diagram diatas kita bisa mengatasi persoalan dengan cepat dan tepat. Sebagai program untuk desain dan analisis numerik ABAQUS *Student Edition* mampu bekerja pada daerah plastis dan elastis dengan tampilan grafik yang berupa diagram *linier-non linier* yang lengkap.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan model berupa jembatan rangka baja dengan skala yang dimodelkan secara keseluruhan menggunakan *software* ABAQUS *Student Edition*. Pemodelan menggunakan software ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tegangan dan regangan pada jembatan *K-Truss* akibat beban sendiri dan beban gempa tiga arah. Analisis dilakukan untuk mengetahui bagaimana kapasitas maksimum jembatan terhadap beban gempa yang diberikan dengan menggunakan analisis dinamis metode riwayat waktu (*time history*).

3.1 Data Jembatan

3.1.1 Data Umum Jembatan

Data umum jembatan yang menjadi objek dalam analisis adalah:

Nama : Jembatan K.H. Ahmad Fattah

Lokasi : Malang

Fungsi : Jalan Raya



Gambar 3.1 Jembatan Rangka Baja K.H. Ahmad Fattah
Sumber: malangflash.com

3.1.2 Data Teknis Jembatan

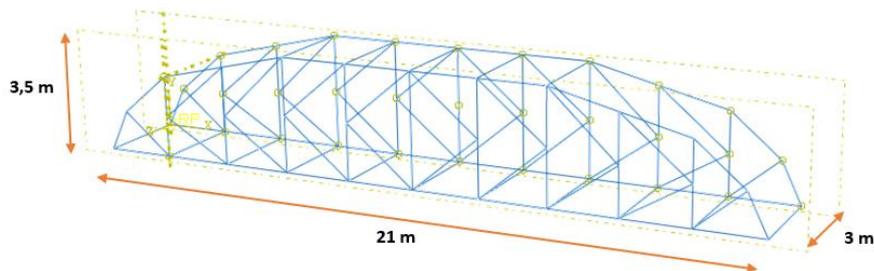
Jembatan rangka yang menjadi fokus penelitian ini adalah:

Tipe : Jembatan Rangka Batang

Panjang bentang : 21 meter

Lebar : 3 m
 Tinggi : 3,5 m
 Material : Baja
 Tumpuan : Sendi – Rol

Detail gambar perencanaan jembatan dilakukan melalui proses pendekatan yang disesuaikan dengan kondisi di lapangan.



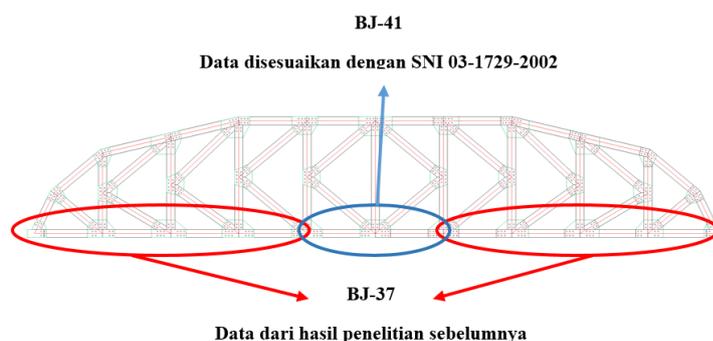
Gambar 3.2 Layout jembatan pada software ABAQUS Student Edition

Tabel 3.1

Dimensi Profil Baja Model Jembatan

Bagian Struktur	Jenis Profil
Rangka utama atas	WF 250.250.9.14
Gelagar Melintang	WF 350.175.7.11

Dimensi dan profil baja yang digunakan mengadopsi dari desain jembatan rangka eksisting yang ada, yaitu Jembatan K.H. Ahmad Fattah. Analisis dilakukan dengan menggunakan desain mutu material struktur baja yang tidak seragam. Pada empat bentang-bentang dari ujung sisi kanan dan kiri rangka utama jembatan menggunakan baja dengan mutu dan modulus elastisitas BJ-37. Dimana tegangan leleh (f_y), tegangan ultimate (f_u) dan modulus elastisitas tersebut diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ahmad Agus Salim. Sementara itu, dua bentang tengah rangka utama jembatan menggunakan baja dengan mutu dan modulus elastisitas BJ-41 yang disesuaikan dengan SNI 03-1729-2002.



Gambar 3.3 Ketidakterseragaman penggunaan mutu baja pada jembatan K-Truss

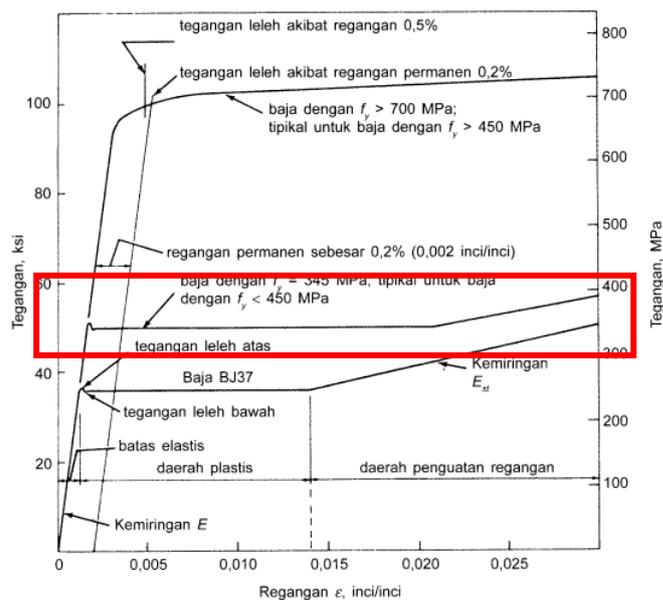
Pada material baja BJ-41, sifat-sifat mekanik baja dengan mutu tersebut mengacu pada SNI 03-1729-2002. Modulus elastisitas (E) yang digunakan juga disesuaikan dengan ketentuan yaitu sebesar 200000 MPa, begitu juga dengan nilai *poisson rasio* yang digunakan yaitu 0,30. Apabila ditablekan sebagai berikut :

Tabel 3.2

Spesifikasi Material pada Model Jembatan Rangka Tipe K-Truss

Spesifikasi	Mutu BJ-37	Mutu BJ-41
Modulus Elastisitas (Pa)	199582000000	200000000000
Rasio Poisson	0.3	0.3
True Stress (Pa)	Tabel 3.4	Tabel 3.3
True Strain (Pa)	Tabel 3.4	Tabel 3.3
Density (kg/m ³)	7850	7850

Hubungan tegangan – regangan digambarkan pada **gambar 3.4**, kemudian diambil 10 titik yang terhitung setelah baja mengalami leleh sebagai nilai dari tegangan dan regangan yang dimasukkan ke dalam *software ABAQUS Student Edition*.



Gambar 3.4 Hubungan tegangan-regangan tipikal

Sumber: Salmon & Johnson, Steel Structures Design and Behavior, 4th ed

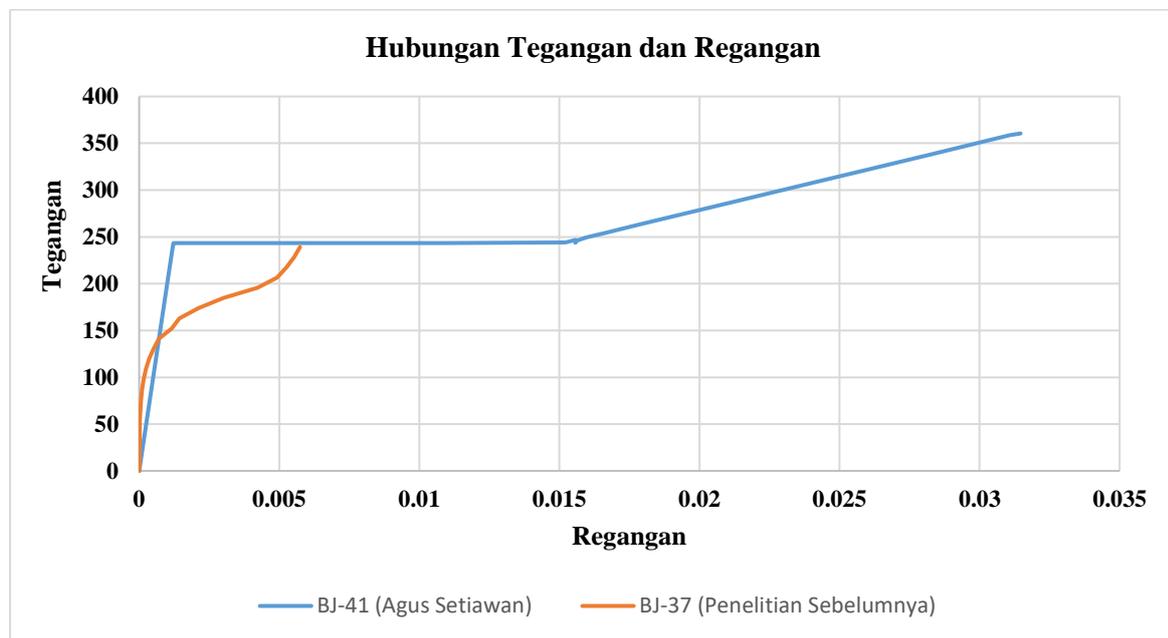
Di bawah ini merupakan tabel data dari 10 titik yang didapatkan pada grafik tegangan dan regangan pada Gambar 3.4, untuk dimasukkan ke dalam *software ABAQUS Student Edition*.

Tabel 3.3

Data dari 10 titik pada baja mutu BJ-41 yang dimasukkan ke dalam software ABAQUS Student Edition

Regangan	Tegangan	True Strain	True Stress
0,0019	342	0	342
0,005	342	0,0031	343,0602
0,01	342	0,0081	344,7702
0,015	342	0,0130	346,4802
0,02	342	0,0179	348,1902
0,0206	342	0,0185	348,3954
0,0228	358,3	0,0207	365,7885
0,025	362,5	0,0228	370,8738
0,0275	375	0,0253	384,6000
0,03	391,7	0,0277	402,7068

Sementara itu pada material baja BJ-37, sifat-sifat mekanik baja dengan mutu tersebut mengacu pada hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ahmad Agus Salim. Hasil penelitian tersebut didapatkan hubungan tegangan-regangan mutu baja BJ-37 sebagai berikut:



Gambar 3.5 Hubungan tegangan-regangan mutu baja BJ-37

Tabel di bawah ini merupakan data dari 10 titik yang akan dimasukkan ke dalam software ABAQUS Student Edition:

Tabel 3.4
Data dari 10 titik pada baja mutu BJ-37 yang dimasukkan ke dalam software ABAQUS Student Edition

Regangan	Tegangan	True Strain	True Stress
0,00017	141,304	0	141,404
0,00116	152,174	0,00115	152,35
0,00144	163,044	0,00144	163,278
0,00211	173,913	0,00211	174,28
0,00301	184,783	0,00211	185,338
0,00422	195,652	0,00422	196,479
0,00492	206,522	0,00491	207,539
0,00526	217,391	0,00524	218,534
0,00553	228,261	0,00552	229,524
0,00574	239,13	0,00573	240,503

3.2 Analisis Nilai Eigen

Analisa nilai eigen dilakukan untuk mengetahui nilai *damping ratio* (α dan β) untuk input analisis dinamis struktur. Dalam analisis ini, jembatan terlebih dahulu dibagi menjadi 10 bagian. Kemudian dilakukan analisa nilai eigen sehingga mendapatkan dua nilai *mode shape* terbesar. Setelah itu diperlukan perhitungan frekuensi alami untuk mengetahui karakteristik dinamis yang utama pada struktur tersebut. Kemudian terlihat bagaimana perilaku dominan struktur jembatan rangka yang dimodelkan. Kemudian melakukan perhitungan koefisien α dan β dengan menggunakan rumus sebagai berikut ini:

$$\alpha = \xi \cdot 2 \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \dots\dots\dots (3-2)$$

Dimana untuk frame baja digunakan $\xi = 2\%$

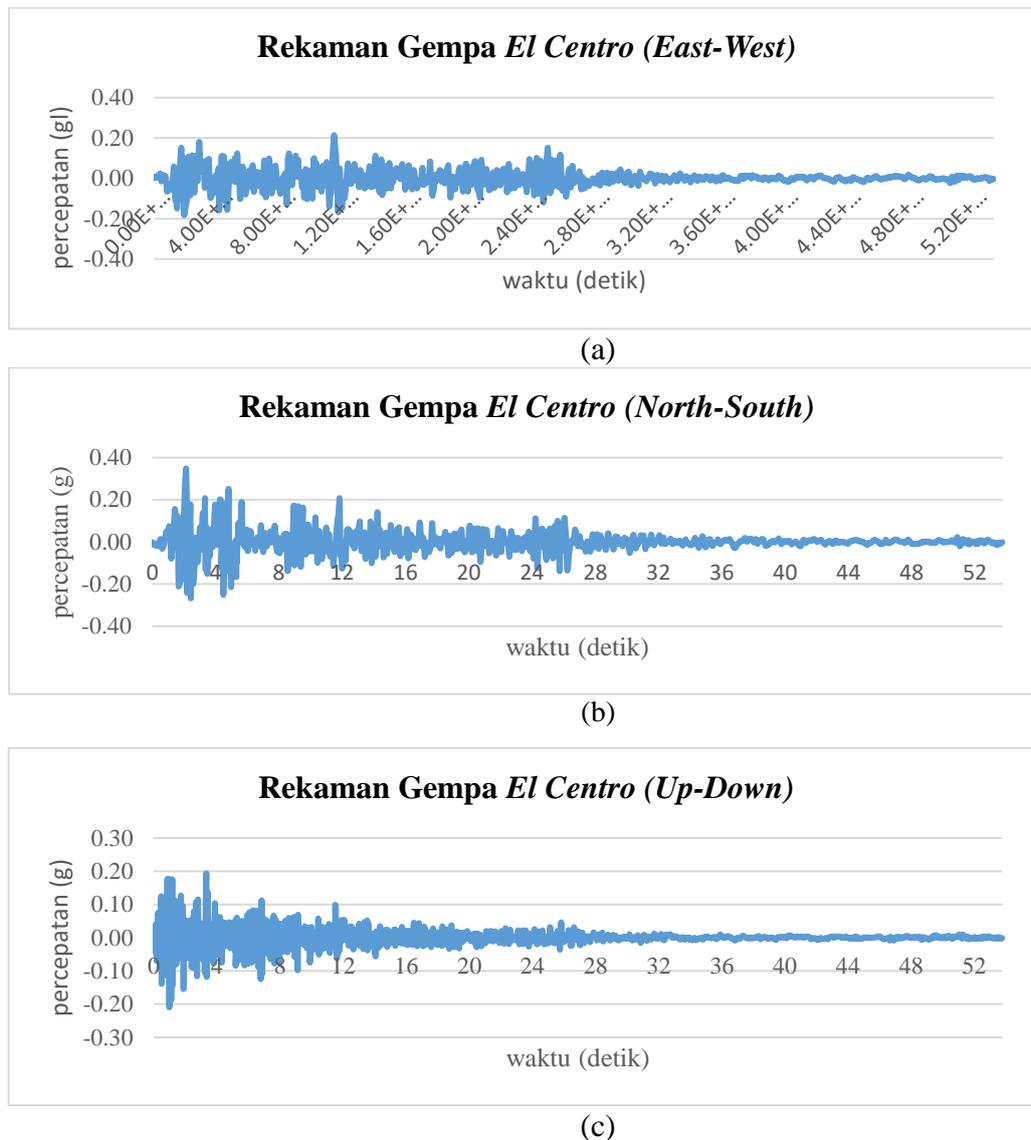
Selanjutnya dapat dilakukan analisis dinamis jembatan rangka *K-Truss* dengan menggunakan metode *time history*.

3.3 Analisis dinamis

Analisis dinamis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah *time history analysis* (analisis riwayat waktu) dengan menggunakan *software ABAQUS Student Edition*. Analisis dan modelisasi struktur dilakukan secara dua dan tiga dimensi pada model Jembatan. Konfigurasi jembatan rangka dan dimensi tiap bentang rangka jembatan yang digunakan diambil dari jembatan rangka yang telah ada yaitu Jembatan K.H. Ahmad Fattah.

Pada analisis ini, digunakan data gempa yang berupa percepatan dan waktu. Data gempa didapatkan dari data gempa El Centro pada tahun 1979 dan Taft pada tahun 1952 di

California. **Gambar 3.6** di bawah ini merupakan rekaman gempa yang digunakan di penelitian ini.



Gambar 3.6 Rekaman gempa *El Centro* di California, (a) Gempa arah *east-west*, (b) Gempa arah *north-south*, dan (c) Gempa arah *up-down*
 Sumber: *El Centro* (1979)

3.4 Metode Penelitian

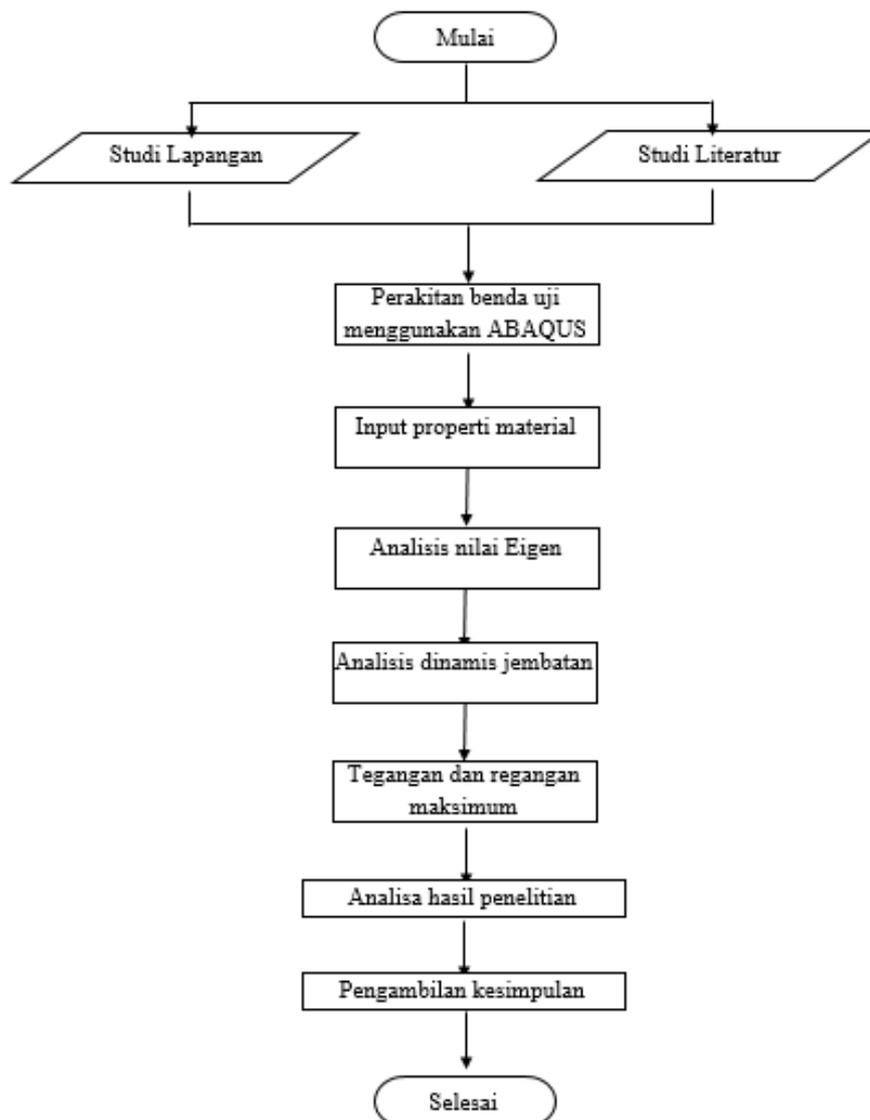
Langkah-langkah penelitian kali ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menentukan topik yang digunakan untuk penelitian.
2. Studi lapangan dan literatur.

Dalam hal ini penulis melakukan studi lapangan dan literatur sebagai dasar teori untuk menganalisis permasalahan. Selain itu, studi lapangan juga digunakan sebagai pemodelan struktur jembatan yang kemudian dianalisis lebih lanjut pada *software ABAQUS Student Edition*.

3. Melakukan penggambaran model jembatan rangka ke dalam *software* ABAQUS *Student Edition*.
4. Memasukkan input data property material ke dalam *software* ABAQUS *Student Edition*.
5. Melakukan analisis nilai eigen
6. Melakukan analisis dinamis jembatan sehingga didapatkan nilai tegangan dan regangan maksimum.
7. Melakukan analisa penelitian.
8. Menyimpulkan hasil analisa penelitian
9. Selesai

Diagram alir penelitian yang menjelaskan tentang prosedur dan tahapan penelitian disajikan pada **Gambar 3.7**.



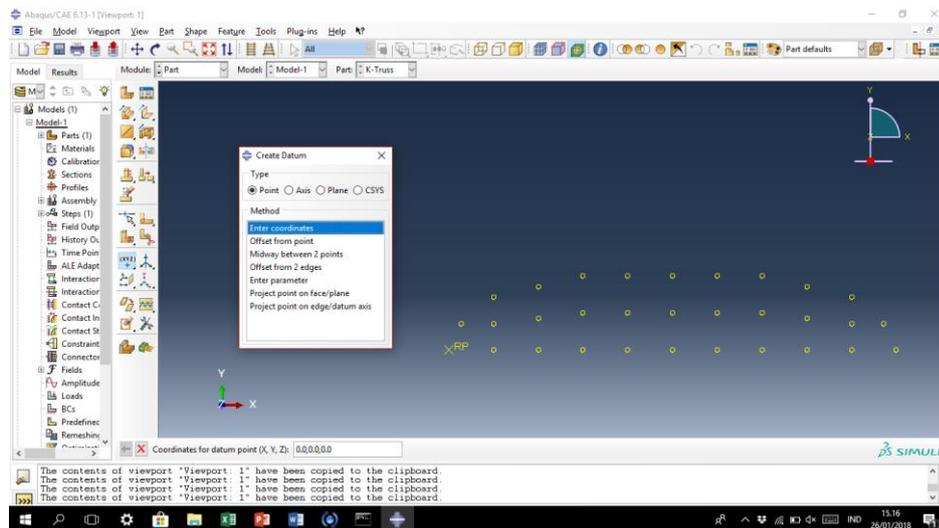
Gambar 3.7 Diagram alir penelitian

3.5 Pemodelan dengan *Software ABAQUS Student Edition*

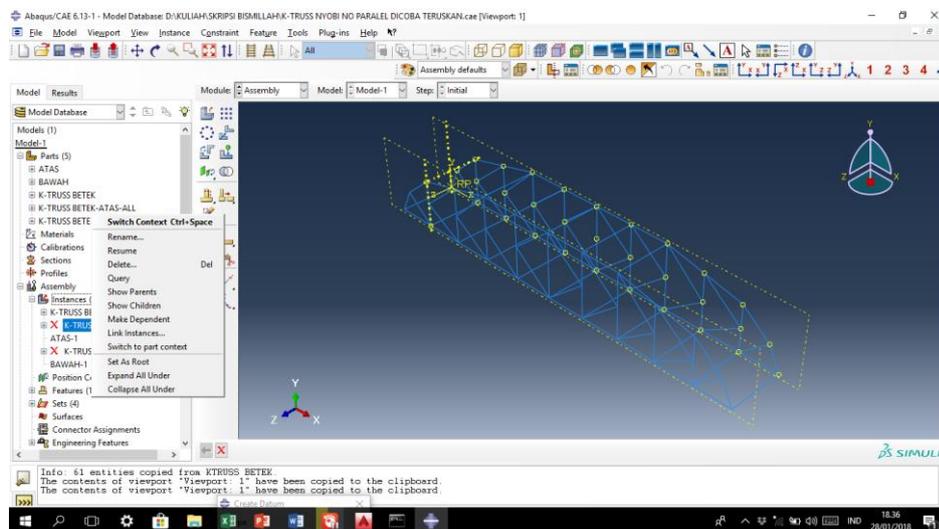
Berikut ini adalah cara-cara dalam menggambarkan model benda uji berupa jembatan rangka baja dengan menggunakan *software ABAQUS Student Edition*. Langkah-langkah pemodelan dengan *ABAQUS Student Edition* adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan Benda Uji (*Create Part*)

Langkah pertama sebelum memodelkan benda uji ke dalam *ABAQUS Student Edition*, terlebih dahulu menentukan sistem satuan yang akan digunakan. Hal ini dilakukan karena dalam memasukkan data pada *ABAQUS Student Edition* diperlukan satuan yang konsisten dan spesifik. Setelah sistem satuan ditentukan, barulah benda uji dimodelkan dengan membuat koordinat-koordinat. Kemudian setelah koordinat-koordinat tersebut terbentuk, digabungkan hingga terbentuk jembatan rangka yang akan digunakan dalam penelitian (*K-Truss*).



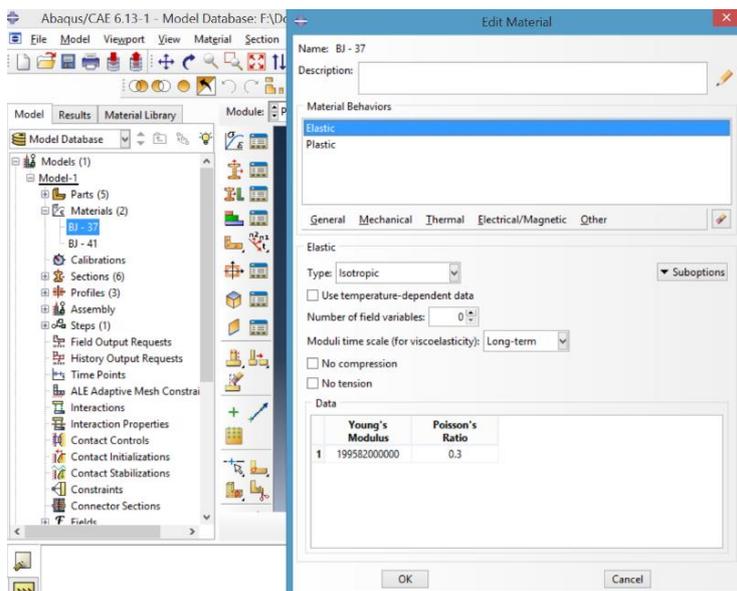
Gambar 3.8 Hasil input koordinat-koordinat setiap titik pada jembatan *K-Truss*



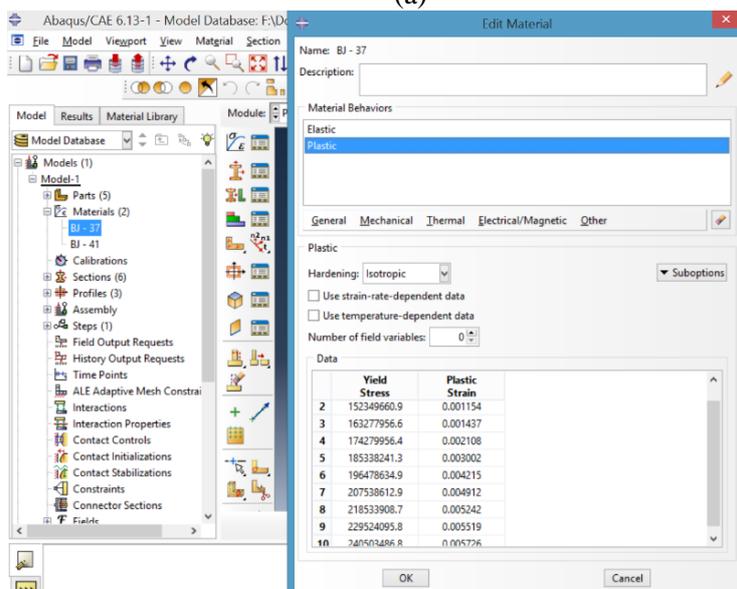
Gambar 3.9 Penggabungan koordinat-koordinat membentuk jembatan *K-Truss*

2. Memasukkan Data (*Input Property*)

Langkah berikut ini jembatan rangka yang telah terbentuk dimasukkan data berupa material, profil dan *section assignment*. Pada bagian material, dimasukkan mutu baja yang digunakan beserta nilai tegangan-regangan yang sesuai dengan mutu baja tersebut. Setelah itu memasukkan (*input*) nilai modulus elastisitas dan *poisson rasio*. Sedangkan, pada bagian profil dimasukkan dimensi profil baja yang digunakan. Kemudian *create section*, disesuaikan dengan mutu baja dan profil yang digunakan pada tiap-tiap elemen jembatan rangka. Selanjutnya *section* yang telah dibuat tersebut, dimasukkan (*input*) pada tiap-tiap bagian jembatan rangka yang sebelumnya telah dibuat pada *section* pada menu *model tree*.

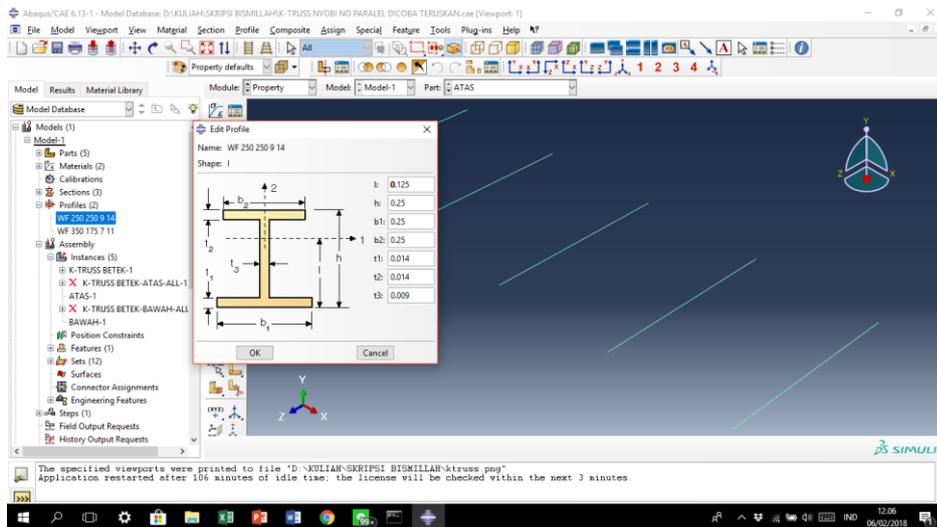


(a)



(b)

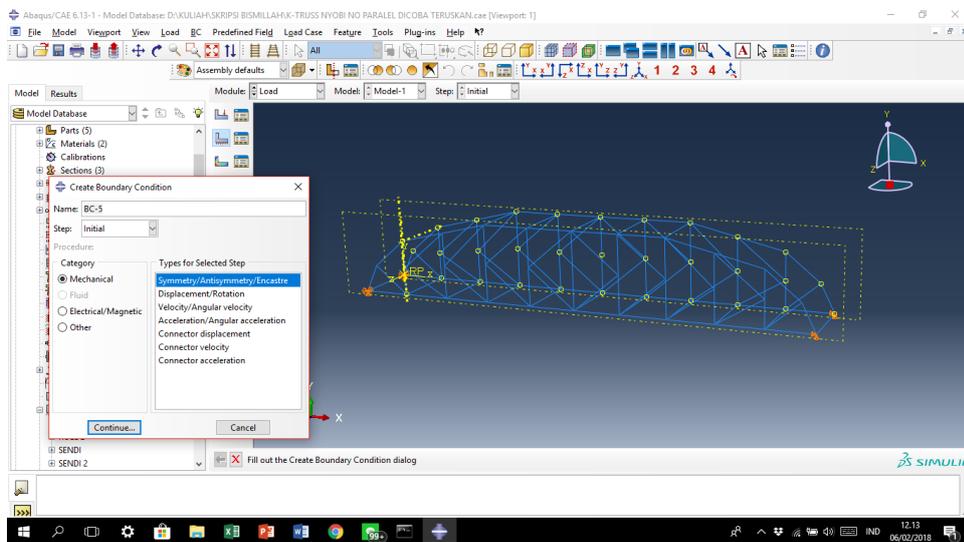
Gambar 3.10 Input mutu material baja yang digunakan



Gambar 3.11 Input dimensi profil baja yang digunakan

3. Input Tumpuan (*Boundary Condition*)

Pada langkah ini ditentukan tumpuan yang digunakan untuk menganalisis benda uji. Total *boundary condition* yang digunakan berjumlah 4 yaitu 2 sendi dan 2 rol. Sendi menggunakan *symmetry/antisymmetry/encastre* dan rol menggunakan *displacement rotation*.



Gambar 3.12 Perintah input boundary condition

4. Assembly

Langkah *assembly* merupakan modul untuk menggabungkan part-part menjadi satu bentuk atau model.

5. Meshing

Pada langkah ini rangka yang telah dibuat kemudian dibagi menjadi beberapa *node* dan elemen. Jumlah *mesh* yang diberikan pada benda uji ditentukan sesuai dengan hasil yang ingin didapatkan.

6. Analisis Nilai Eigen

Selanjutnya, pada analisis eigen akan didapatkan frekuensi natural (f) yang merupakan bahan untuk mencari nilai $alpha$ (α) dan $beta$ (β). Setelah didapatkan $alpha$ (α) dan $beta$ (β), kemudian $alpha$ (α) dan $beta$ (β) tersebut dianalisis dengan data *time history* yang telah didapatkan sehingga menghasilkan beban gempa yang kemudian akan diinput di dalam ABAQUS *Student Edition*.

7. Memasukkan Beban Berat Struktur dan Beban Gempa pada ABAQUS *Student Edition*

8. Menentukan *Output*

Pada tahap ini hasil yang diinginkan ditentukan sendiri. Dalam penelitian ini output yang ingin ditampilkan berupa tegangan, regangan, reaksi tumpuan dan perpindahan.

9. *Running*

Setelah menentukan *output* yang ingin ditampilkan, langkah selanjutnya adalah menjalankan atau memproses hingga output yang dikeluarkan sudah sesuai.

10. Menganalisa *Output*

3.6 Analisis Hasil Penelitian

Setelah didapatkan output yang diinginkan dari abaqus, langkah selanjutnya adalah menganalisa hasil penelitian tersebut. Output yang didapatkan yaitu tegangan, regangan, reaksi tumpuan dan perpindahan. Setelah itu dianalisis hasil output tersebut dan didapatkan hasil maksimum dari tiap-tiap output. Sehingga dapat diketahui kinerja model struktur jembatan rangka yang diuji.

Halaman ini sengaja dikosongkan

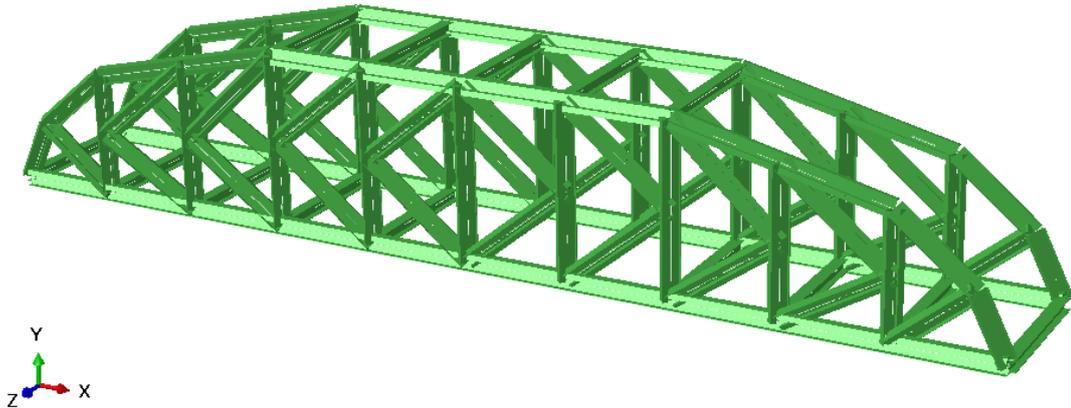
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur Jembatan Rangka *K-Truss* K.H. Ahmad Fattah

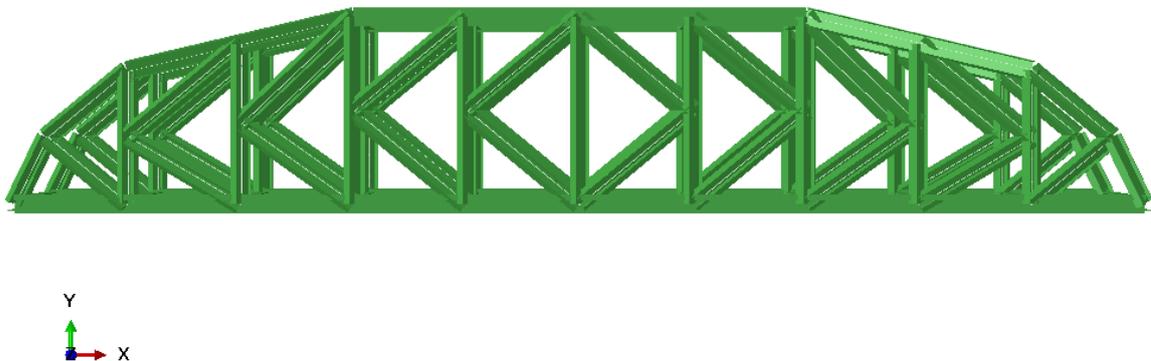
Model struktur jembatan yang akan dianalisis menggunakan model jembatan rangka eksisting yang ada di kota Malang, yaitu Jembatan K.H. Ahmad Fattah yang merupakan jenis jembatan rangka baja tipe *K-Truss*. Peneliti melakukan pemodelan sendiri terhadap dimensi maupun material struktur serta karakteristik lain jembatan berdasarkan data umum dan teknis jembatan yang diperoleh dengan cara survey secara langsung di lapangan. Pemodelan jembatan dilakukan menggunakan program *ABAQUS Student Edition*.

4.1.1 Gambaran Umum

Jembatan yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai total panjang bentang 21 meter dengan lebar 3 meter dan tinggi 3,5 meter. Untuk tumpuan yang digunakan adalah sendi-rol. Berikut merupakan *layout* Jembatan K.H. Ahmad Fattah.



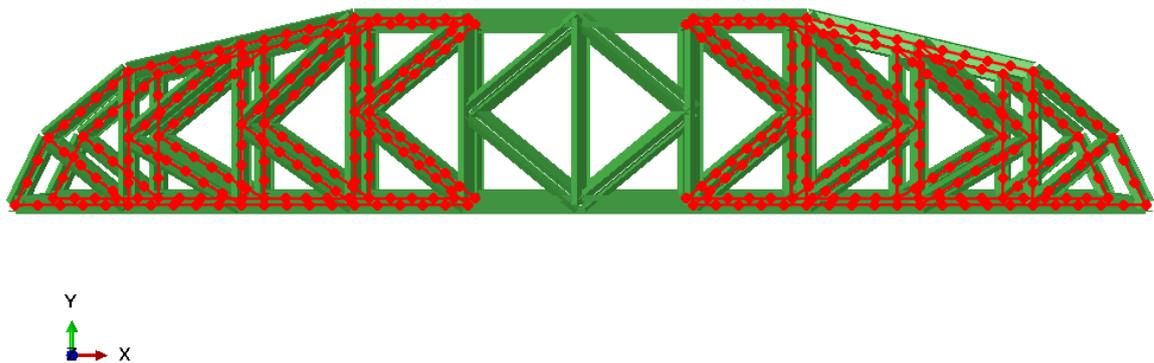
Gambar 4.1 Layout Jembatan K.H. Ahmad Fattah tampak 3D



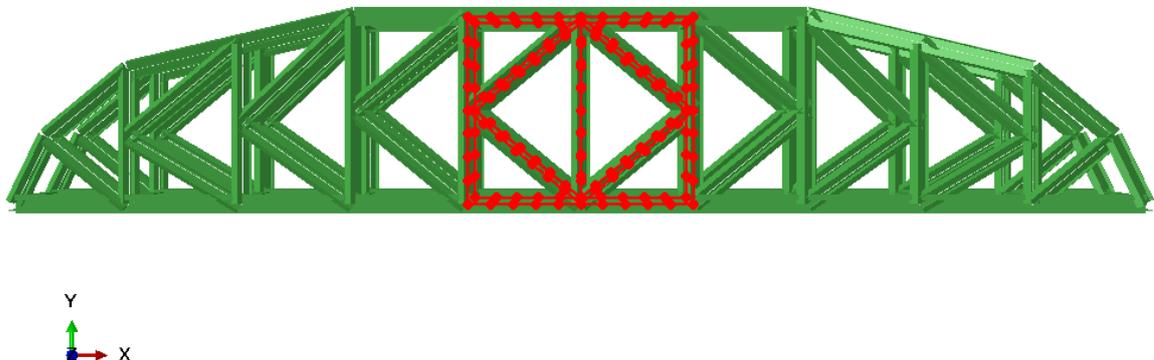
Gambar 4.2 Layout Jembatan K.H. Ahmad Fattah tampak 2D

4.1.2 Spesifikasi Material Jembatan

Jenis Material yang digunakan pada struktur jembatan ini adalah baja, kecuali plat lantai kendaraan yang terbuat dari beton. Namun dalam penelitian ini hanya difokuskan pada rangka dari jembatan saja. Rangka utama struktur jembatan ini menggunakan baja profil WF 250.250.9.14 sedangkan untuk gelagar melintang atas dan bawah menggunakan baja profil WF 350.175.7.11. Dalam penelitian ini diasumsikan dengan mutu baja yang tidak seragam yaitu 4 segmen rangka dari ujung kiri dan kanan jembatan menggunakan mutu BJ-37 dan 2 segmen rangka di tengah bentang jembatan menggunakan mutu BJ-41. Berikut merupakan gambar rangka jembatan yang diasumsikan menggunakan mutu BJ-37 dan BJ-41.



Gambar 4.3 Elemen rangka jembatan yang diasumsikan menggunakan mutu BJ-37



Gambar 4.4 Elemen rangka jembatan yang diasumsikan menggunakan mutu BJ-41

Apabila ditabelkan spesifikasi dari material jembatan rangka K.H. Ahmad Fattah adalah sebagai berikut :

Tabel 4.1

Spesifikasi Material Jembatan Rangka K.H. Ahmad Fattah

Spesifikasi	Baja Mutu BJ-37	Baja Mutu BJ-41
Modulus Elastisitas (Pa)	199582000000	200000000000
Rasio Poisson	0.3	0.3
True Stress (Pa)	Tabel 3.2	Tabel 3.2
True Strain (Pa)	Tabel 3.2	Tabel 3.2
Density (kg/m ³)	7850	7850

4.2 Hasil Simulasi Numerik Jembatan Rangka *K-Truss* K.H. Ahmad Fattah

Simulasi numerik pemodelan jembatan rangka baja dilakukan menggunakan software ABAQUS *Student Edition*. Software ini digunakan karena kinerjanya yang lebih baik dibandingkan dengan software-software lain yang sejenis. Disamping itu hasil data output yang didapatkan juga lebih detail bila dikerjakan menggunakan software ABAQUS *Student Edition*. Masing-masing batang dalam jembatan dibagi menjadi lima elemen agar memperoleh hasil yang akurat.

Sebelum melakukan simulasi dinamis menggunakan metode *time history*, sebelumnya dilakukan analisa nilai Eigen yang bertujuan mengetahui nilai *damping ratio* untuk analisis dinamis struktur. Terdapat 10 *mode shape*, dimana diambil periode alami dan rasio massa efektif yang paling dominan untuk kemudian dianalisis agar didapat karakteristik dinamis utama pada struktur tersebut. Rasio massa efektif maksimum pada sumbu X, Y, dan Z akan berpengaruh terhadap posisi dari periode alami struktur.

Hasil perhitungan analisis nilai Eigen dapat dilihat dalam **Tabel 4.2** Pada tabel ini terdapat frekuensi alami, periode alami serta rasio massa efektif. Dari tabel tersebut diambil *mode shape* yang paling dominan, dimana pada struktur jembatan ini *mode shape* yang paling dominan adalah *mode shape* 1 dan 10. Diambil 10 *mode shape* karena dari hasil analisis telah didapat bahwa pada 10 *mode shape* rasio massa efektif telah mencapai 90-100%. Dapat dilihat bahwa perilaku dominan struktur jembatan rangka yang dimodelkan pada mode pertama terjadi pada arah Z, seperti terlihat pada **Gambar 4.5** Sedangkan mode sepuluh terjadi pada arah X dan Y, yang secara jelas terlihat pada **Gambar 4.6**.

Tabel 4.2

Hasil Analisis Eigen pada Struktur Jembatan Rangka K.H. Ahmad Fattah

Mode	Frekuensi			Rasio Massa Efektif (%)		
	f (Hz)	$\omega = 2\pi f$ (rad/sec)	T (sec)	X	Y	Z
1	0.325	2.041	3.078	0.01	0.00	88.55
2	1.062	6.673	0.942	0.00	0.00	6.29
3	1.957	12.297	0.511	0.01	0.00	2.41
4	3.125	19.634	0.320	0.09	0.01	1.62
5	3.637	22.854	0.275	0.00	0.17	0.20
6	4.102	25.772	0.244	0.47	0.01	0.00
7	4.212	26.462	0.237	0.85	0.04	0.00
8	4.517	28.382	0.221	3.76	0.36	0.81
9	5.155	32.392	0.194	0,02	0.49	0.11
10	5.749	36.119	0.174	94.80	98.92	0.01

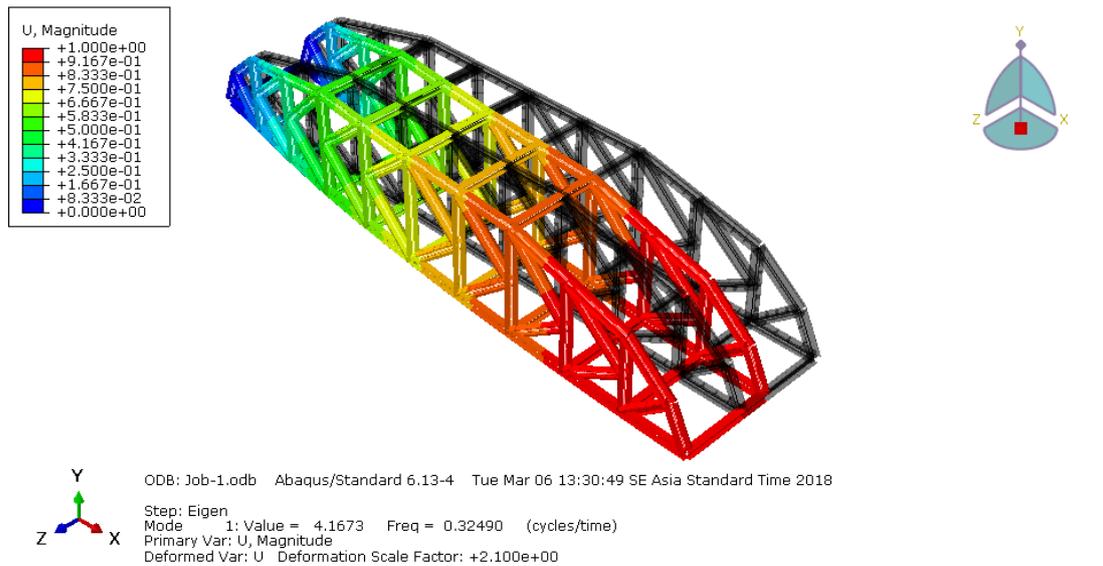
Untuk perhitungan koefisien α dan β yang akan dipakai pada analisis dinamis adalah sebagai berikut:

$$\alpha = \xi \cdot 2 \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \text{ dan } \beta = \xi \frac{2}{\omega_1 + \omega_2}, \text{ dimana untuk frame baja digunakan } \xi = 2\%$$

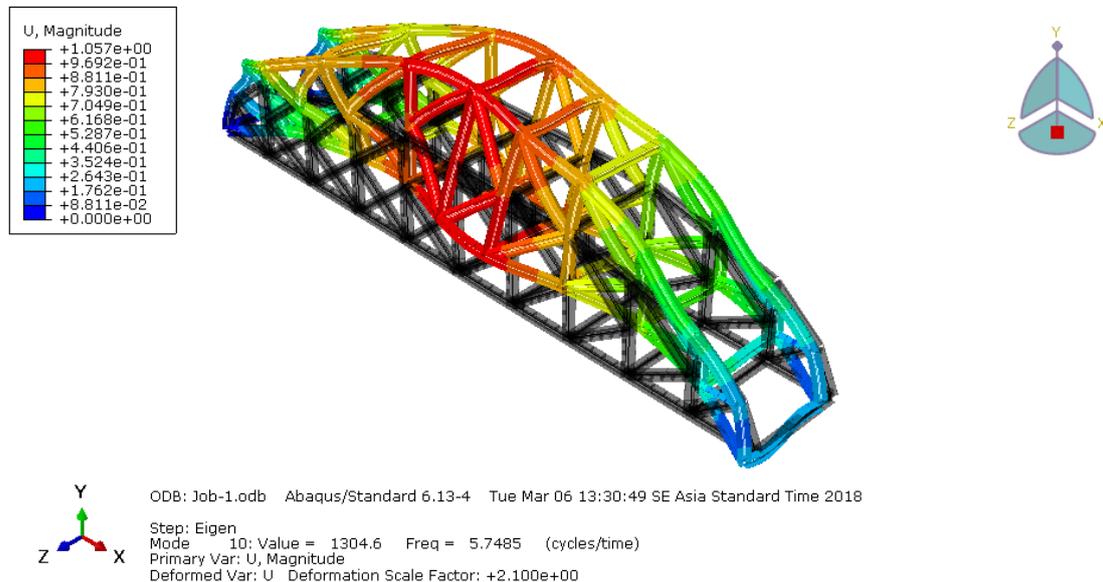
Sehingga:

$$\alpha = 0.02 \times 2 \times \frac{2.04 \times 36.13}{2.04 + 36.13} = 0.077 \dots\dots\dots (4-1)$$

$$\beta = 0.02 \times \frac{2}{2.04 + 36.13} = 0.0010 \dots\dots\dots (4-2)$$



Gambar 4.5 Bentuk mode 1 jembatan rangka k-truss K.H. Ahmad Fattah



Gambar 4.6 Bentuk mode 10 jembatan rangka k-truss K.H. Ahmad Fattah

Hasil nilai *damping ratio* berupa besaran koefisien α dan β , kemudian selanjutnya bisa dilakukan analisis dinamis jembatan rangka menggunakan metode riwayat waktu (*time history*).

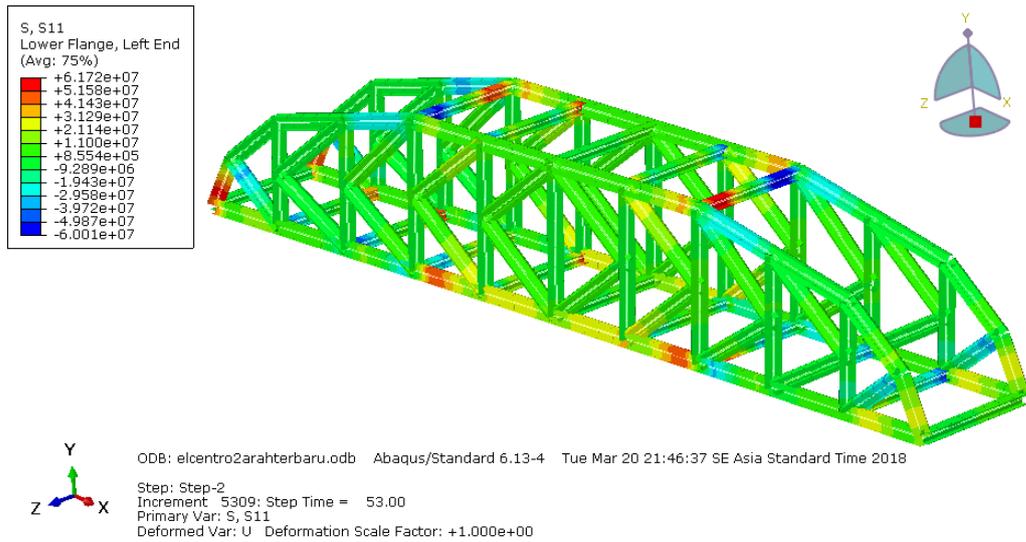
4.2.1 Hasil Simulasi Dinamis Jembatan Rangka *K-Truss* K.H. Ahmad Fattah

Dari simulasi numerik jembatan tipe *k-truss*, didapat nilai *damping ratio* berupa besaran koefisien α dan β . Nilai tersebut digunakan untuk analisis dinamis jembatan rangka menggunakan metode *time history*. Data gempa yang digunakan adalah data gempa yang berasal dari gempa Elcentro California pada tahun 1979. Beban gempa yang diberikan kepada struktur jembatan rangka diberikan pada arah gempa 2 arah yaitu East-West dan North-South selanjutnya pada arah gempa 3 arah yaitu East-West, North-South, dan Up-Down yang bekerja pada masing-masing tumpuan sendi dan rol. Pada umumnya dalam merencanakan suatu jembatan, beban gempa yang diberikan menerapkan 1 kali percepatan. Namun dalam penelitian ini diterapkan 10 kali percepatan agar dapat mengetahui kapasitas jembatan tersebut. Setelah memasukkan data gempa dengan 10 kali percepatan, didapatkan output dari simulasi dinamis jembatan yakni nilai tegangan dan perpindahan dari struktur jembatan tersebut.

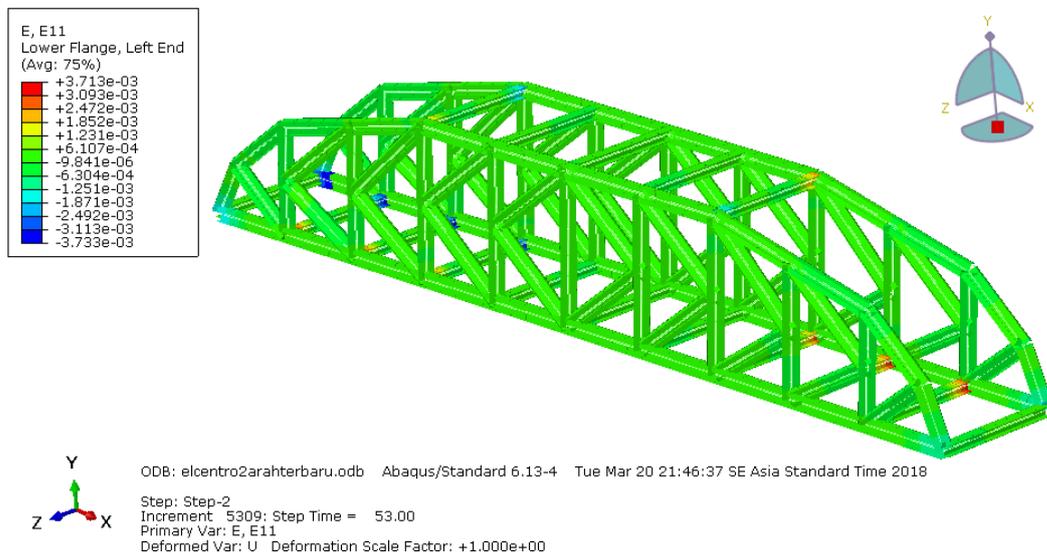
4.3. Respon Struktur terhadap Beban Gempa Dua Arah

Pemodelan jembatan dan data *time history* gempa dua arah selanjutnya dimasukkan ke dalam *software* ABAQUS *Student Edition*, kemudian dilakukan analisis terhadap struktur jembatan untuk melihat respon/perilaku yang terjadi pada struktur jembatan apabila diberi beban gempa dua arah. Pada arah jembatan sumbu X digunakan arah gempa *north-south* (utara-selatan) dan pada arah jembatan sumbu Z digunakan arah gempa *east-west* (timur-barat). Dimana keadaan tersebut merupakan keadaan saat jembatan mengalami efek terbesar akibat adanya beban gempa. Keadaan tersebut diterapkan pada tumpuan sendi, sedangkan pada arah jembatan sumbu Z yaitu tumpuan rol digunakan arah gempa *east-west* (timur-barat).

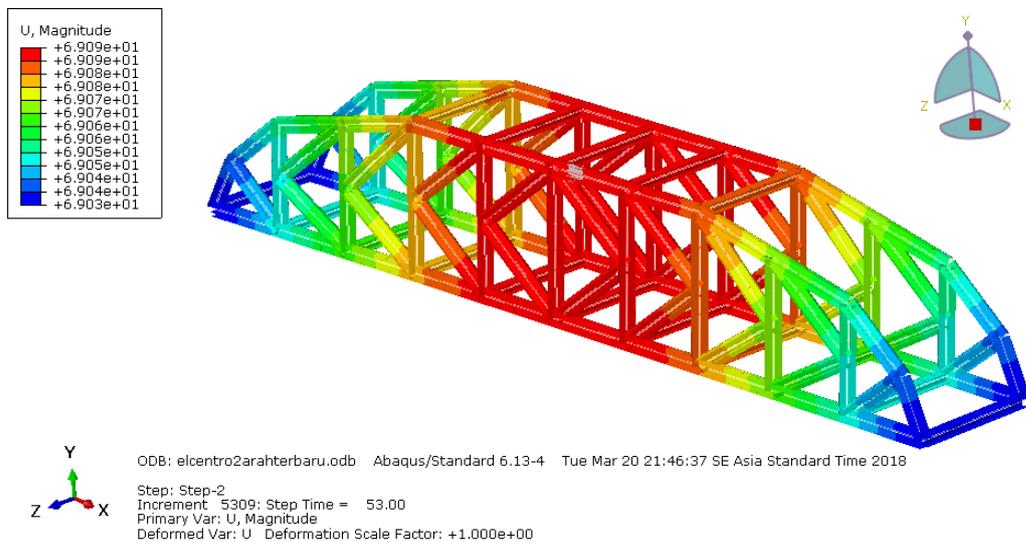
Hasil dari analisis ini berupa nilai *displacement*, tegangan aksial dan juga distribusi regangan. Respon struktur yang terjadi pada masing-masing jembatan berupa tegangan aksial terdiri atas, tegangan aksial tarik dan tegangan aksial tekan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 4.7**. Sedangkan, untuk hasil distribusi regangan tarik dan tekan disajikan pada **Gambar 4.8**. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa bagian jembatan dengan batang tarik dan tekan paling kritis adalah daerah balok yang berlokasi dekat dengan tumpuan sendi jembatan (ditunjukkan dengan garis warna kuning menuju jingga untuk batang tarik dan warna biru muda untuk batang tekan). Kotak yang berada disamping kiri gambar merupakan penjelasan warna tegangan dan regangan aksial akhir yang dicapai oleh struktur jembatan tersebut.



Gambar 4.7 Distribusi tegangan aksial akibat beban gempa dua arah

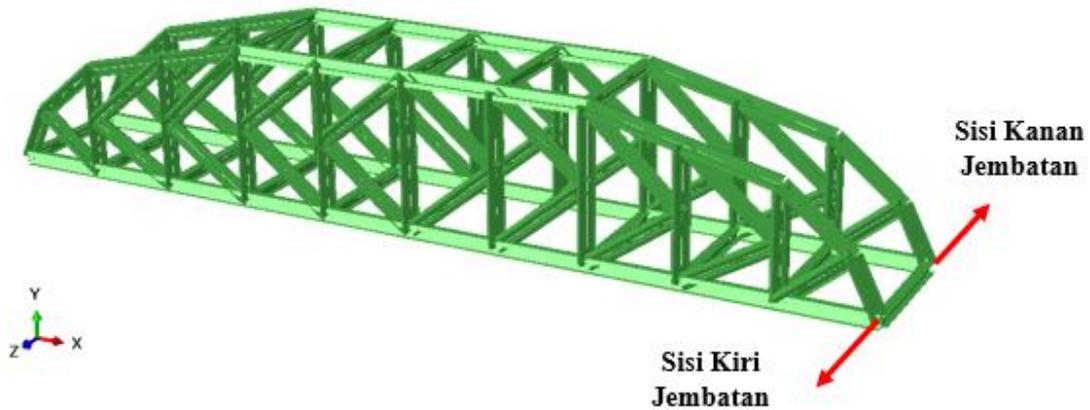


Gambar 4.8 Distribusi regangan aksial akibat beban gempa dua arah

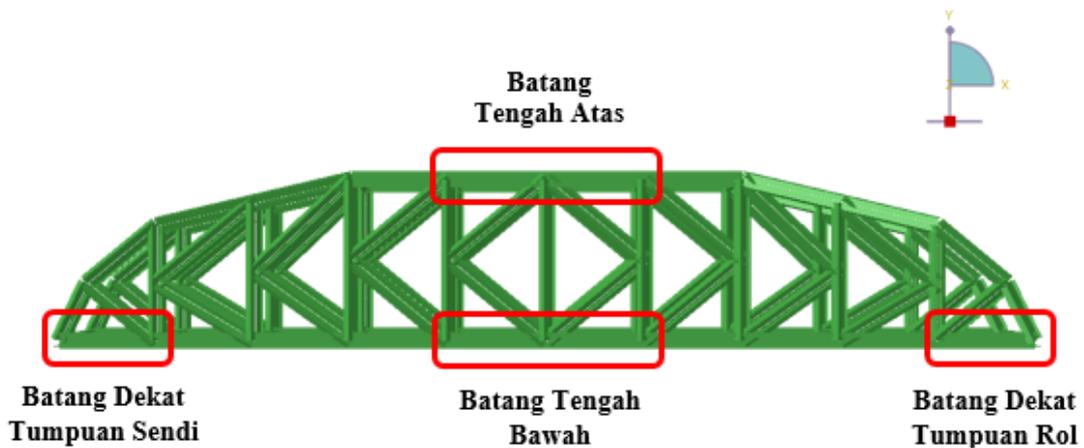


Gambar 4.9 Deformasi akibat beban gempa dua arah

Untuk dapat mengetahui kurva tegangan dan regangan dari awal pembebanan sampai dengan akhir pada tiap bagian struktur jembatan, peneliti membagi jembatan menjadi dua sisi yaitu sisi kanan dan sisi kiri yang secara jelas dapat dilihat pada **Gambar 4.10**. Kemudian dapat dilihat pada **Gambar 4.11**, setiap sisi jembatan dibagi menjadi empat bagian, antara lain batang dekat tumpuan sendi, batang dekat tumpuan rol, batang tengah bawah dan batang tengah atas.



Gambar 4.10 Sisi kanan dan sisi kiri jembatan



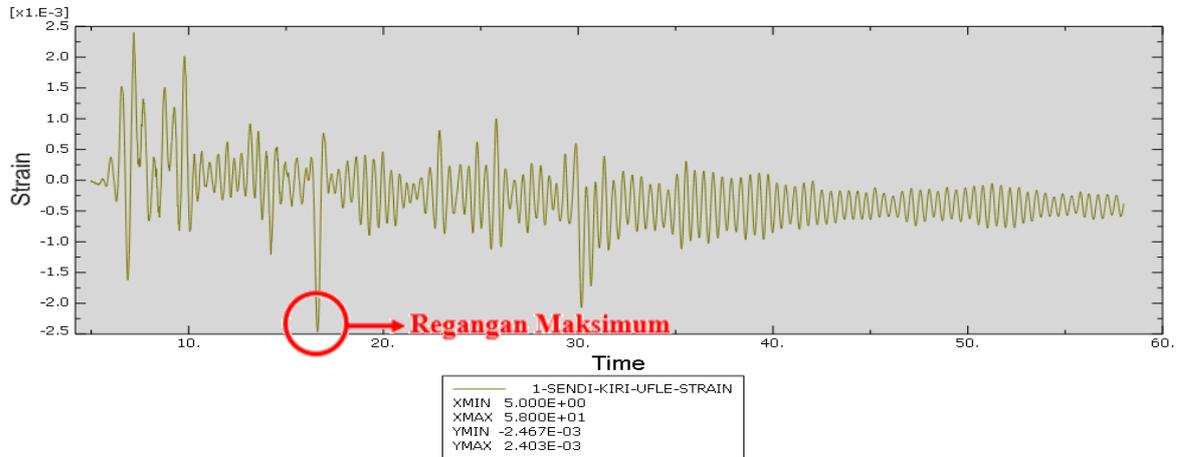
Gambar 4.11 pembagian 4 bagian pada jembatan

4.3.1 Batang Dekat Tumpuan Sendi

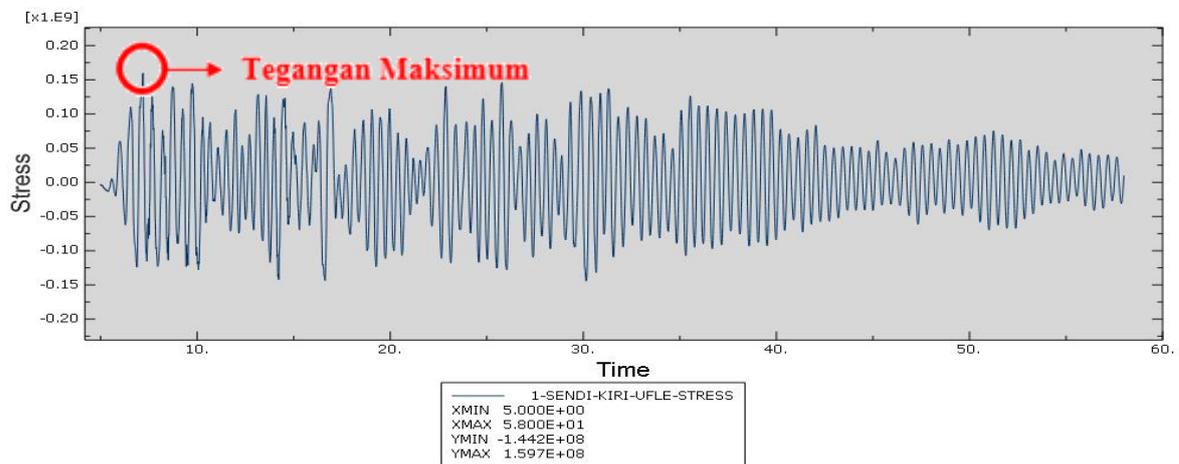
Gambar 4.12 di bawah ini merupakan gambaran riwayat kurva regangan dari awal pembebanan hingga akhir pada bagian batang dekat tumpuan sendi struktur jembatan. Terlihat bahwa nilai regangan maksimum sebesar 0.002467 (Tekan), sedangkan regangan minimum sebesar 0.002403 (Tarik).

Kemudian kurva tegangan pada bagian batang dekat tumpuan sendi struktur jembatan tersebut digambarkan pada **gambar 4.13**. Dijelaskan bahwa nilai tegangan

maksimum pada batang tersebut sebesar 159.700 MPa (Tarik), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 144.200 MPa (Tekan).

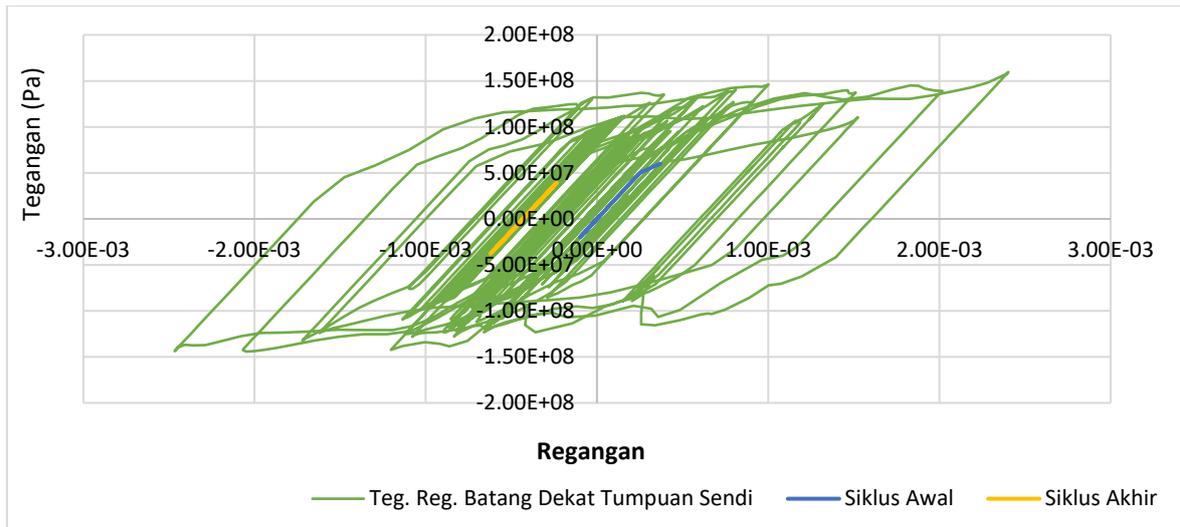


Gambar 4.12 Kurva regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah



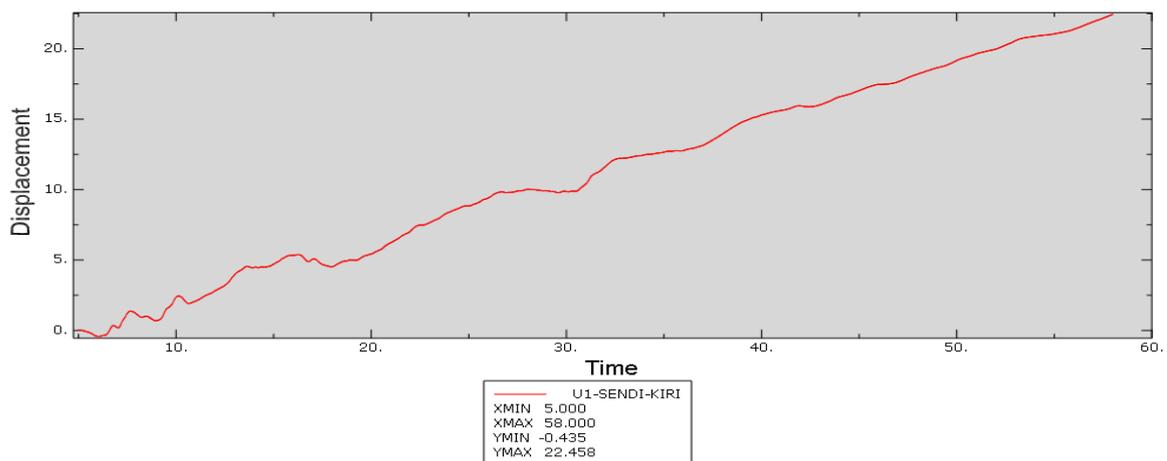
Gambar 4.13 Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah

Gambar 4.14 di bawah adalah kurva tegangan dan regangan dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah sebesar 159.700 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 141.404 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat garis berwarna biru merupakan siklus awal yang terjadi pada batang, sedangkan garis berwarna oranye merupakan siklus akhir dari batang tersebut. Jika dari posisi keduanya, menunjukkan bahwa batang meregang tanpa kembali ke bentuk semula atau batang dekat tumpuan sendi tersebut telah mengalami tahap inelastis sehingga dapat disimpulkan bahwa batang dekat tumpuan sendi tersebut telah mengalami keruntuhan, baik keruntuhan lentur maupun tekuk.



Gambar 4.14 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah

Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini terdapat **Gambar 4.15** yang menunjukkan batang dekat tumpuan sendi yang mengalami *displacement* ke arah X sebesar 22.458 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.



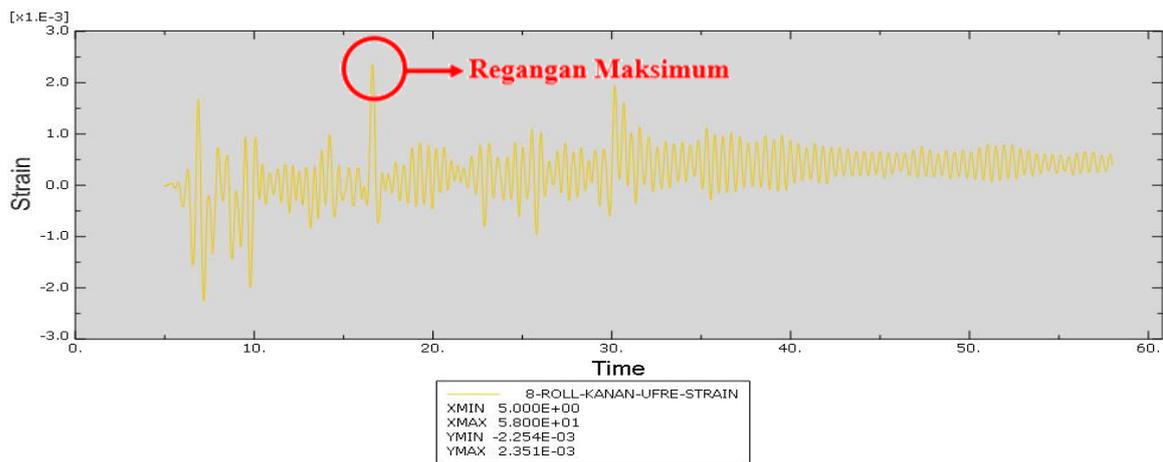
Gambar 4.15 Kurva *displacement* (U1) pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah

4.3.2 Batang Dekat Tumpuan Rol

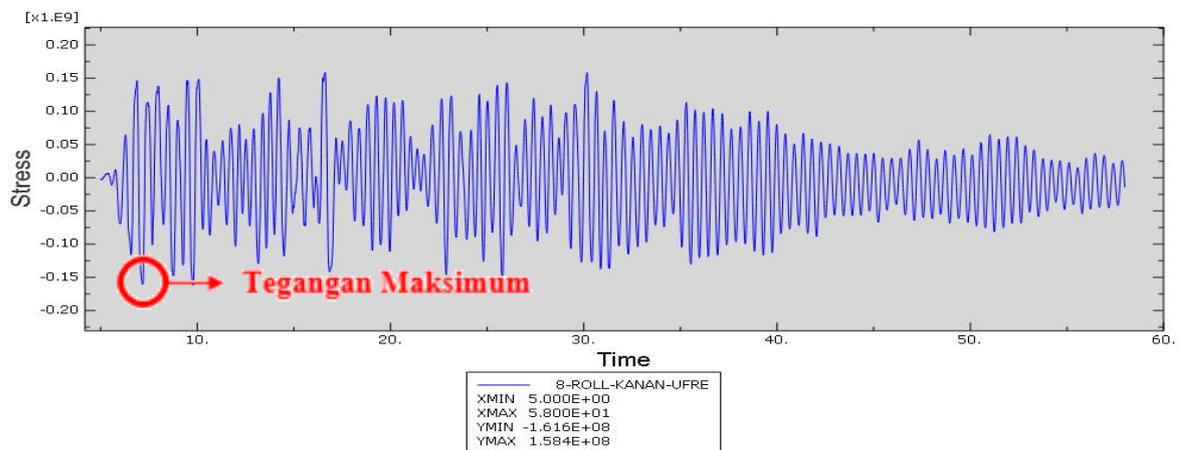
Gambar 4.16 Di bawah ini merupakan riwayat kurva regangan batang dekat tumpuan rol dari awal hingga akhir pembebanan pada struktur jembatan. Dapat dilihat bahwa nilai

regangan maksimum sebesar 0.002351 (Tarik), sedangkan regangan minimum sebesar 0.002254 (Tekan).

Kemudian untuk bagian batang dekat tumpuan rol struktur jembatan tersebut, kurva tegangan digambarkan pada **gambar 4.17**. Dijelaskan bahwa nilai tegangan maksimum pada batang tersebut sebesar 161.600 Pa (Tekan), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 158.400 MPa (Tarik)



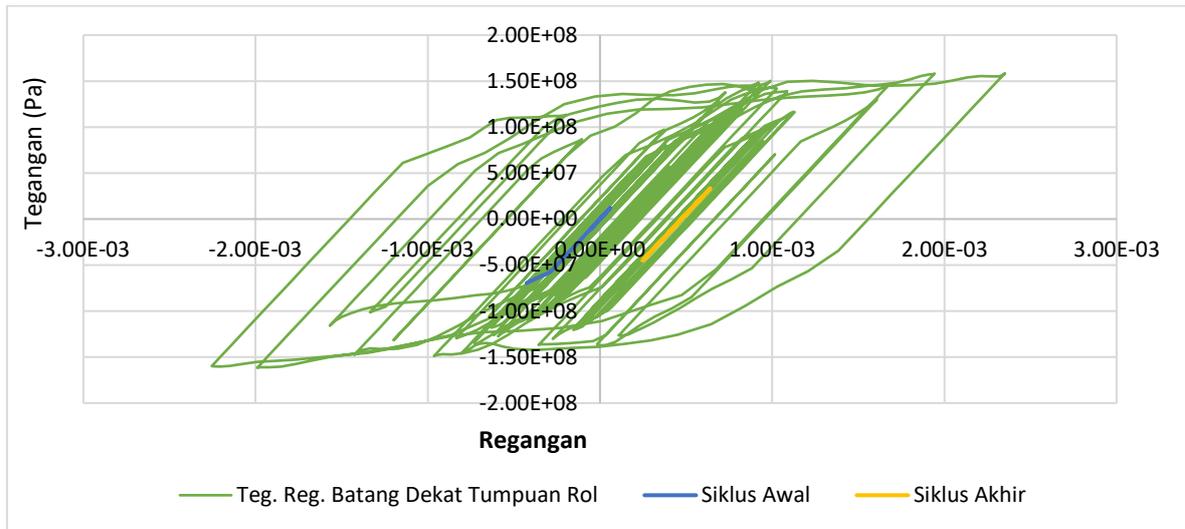
Gambar 4.16 Kurva regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah



Gambar 4.17 Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah

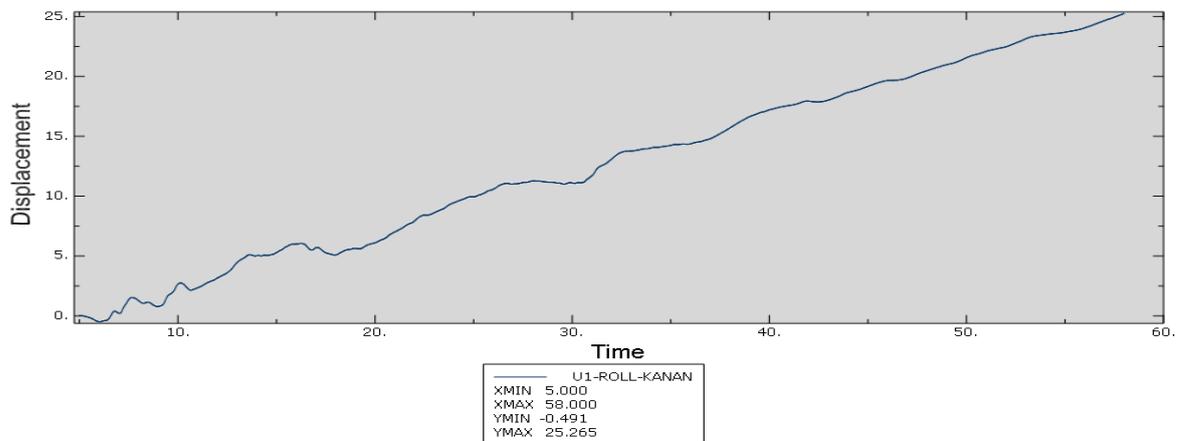
Di bawah ini merupakan **Gambar 4.18** yaitu kurva tegangan dan regangan dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah sebesar 161.600 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 141.404 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat garis berwarna biru merupakan siklus awal yang terjadi pada batang, sedangkan garis berwarna oranye merupakan siklus akhir dari batang tersebut. Jika dari posisi keduanya, menunjukkan bahwa batang meregang tanpa kembali ke bentuk semula atau batang dekat tumpuan rol tersebut telah mengalami tahap inelastis sehingga dapat

disimpulkan bahwa batang dekat tumpuan sendi tersebut telah mengalami keruntuhan, baik keruntuhan lentur maupun tekuk.



Gambar 4.18 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah

Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini terdapat **Gambar 4.19** yang menunjukkan batang dekat tumpuan rol yang mengalami *displacement* ke arah X sebesar 25.265 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.

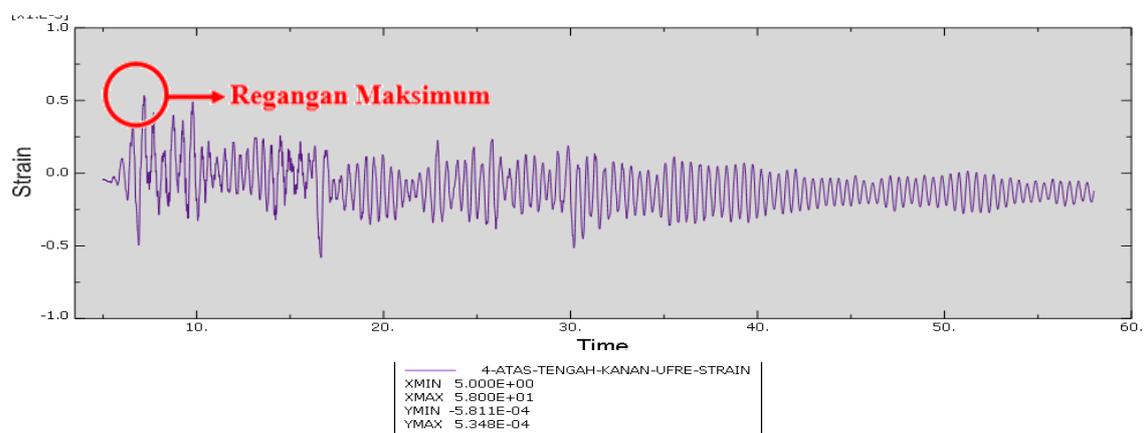


Gambar 4.19 Kurva *displacement* (U1) pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah

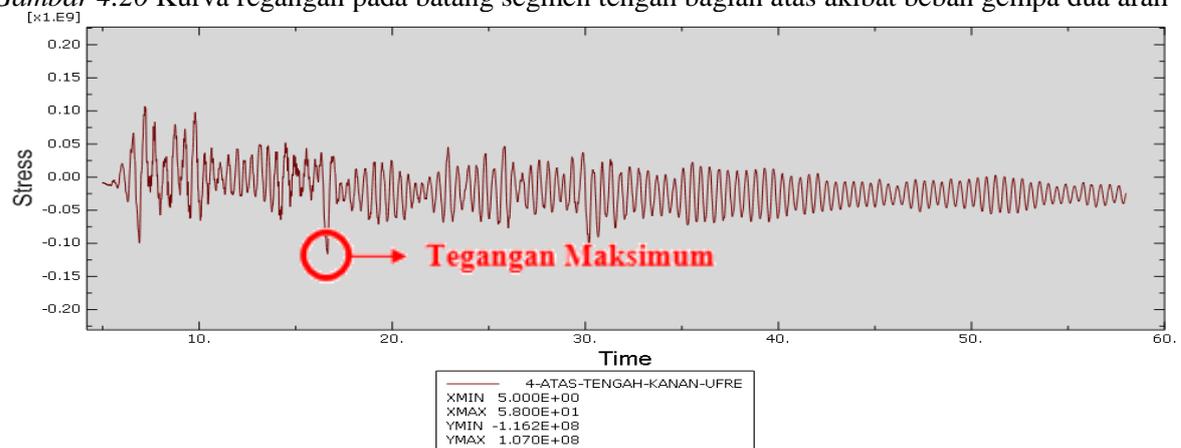
4.3.3 Batang Segmen Tengah Bagian Atas

Berikut merupakan **Gambar 4.20** yaitu riwayat kurva regangan batang segmen tengah bagian atas dari awal hingga akhir pembebanan pada struktur jembatan. Dapat dilihat bahwa nilai regangan maksimum sebesar 0.000581 (Tarik), sedangkan regangan minimum sebesar 0.000534 (Tekan).

Kemudian untuk bagian batang segmen tengah bagian atas struktur jembatan tersebut, kurva tegangan digambarkan pada **gambar 4.21**. dapat dilihat bahwa nilai tegangan maksimum pada batang tersebut sebesar 116.200 MPa (Tekan), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 107 MPa (Tarik).



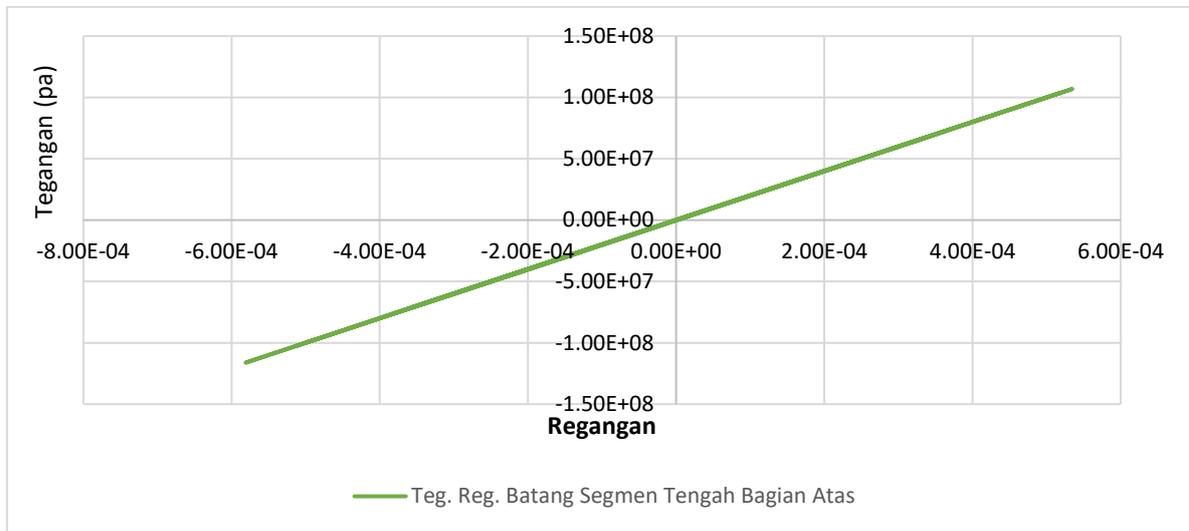
Gambar 4.20 Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah



Gambar 4.21 Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah

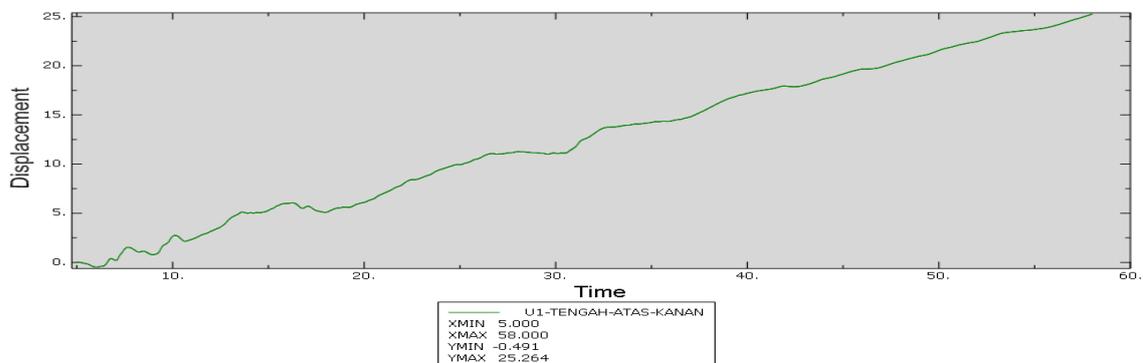
Di bawah ini merupakan **Gambar 4.22** yaitu kurva tegangan dan regangan batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah sebesar 116.200 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.650 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa batang segmen tengah bagian atas tersebut masih dalam tahap elastis atau dapat kembali ke bentuk awal yang dapat

ditandai dengan grafik yang masih membentuk linear. Sehingga dapat disimpulkan, bahwa batang segmen tengah bagian atas tersebut belum mengalami keruntuhan baik keruntuhan lentur maupun tekuk.



Gambar 4.22 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah

Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini merupakan **Gambar 4.23** yang menunjukkan batang segmen tengah bagian atas yang mengalami perpindahan ke arah X sebesar 25.264 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.

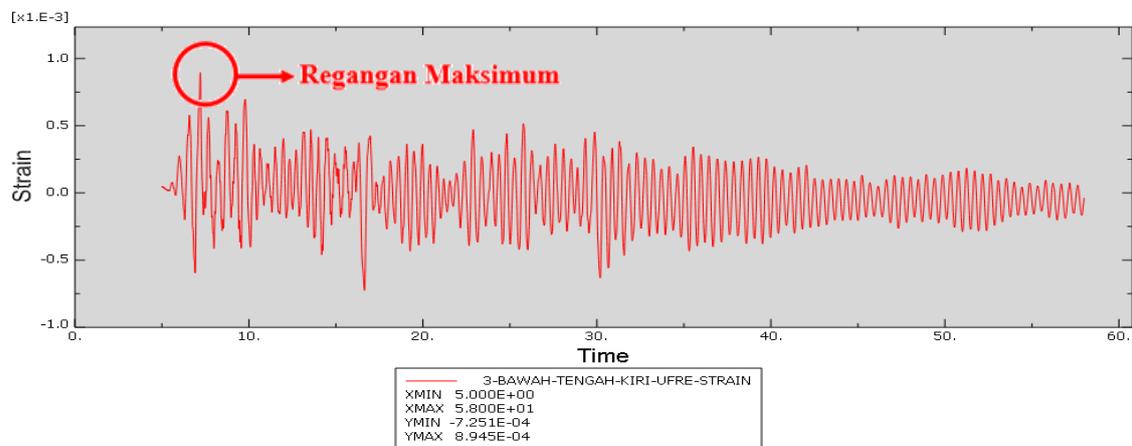


Gambar 4.23 Kurva *displacement* (U1) pada batang dekat tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah

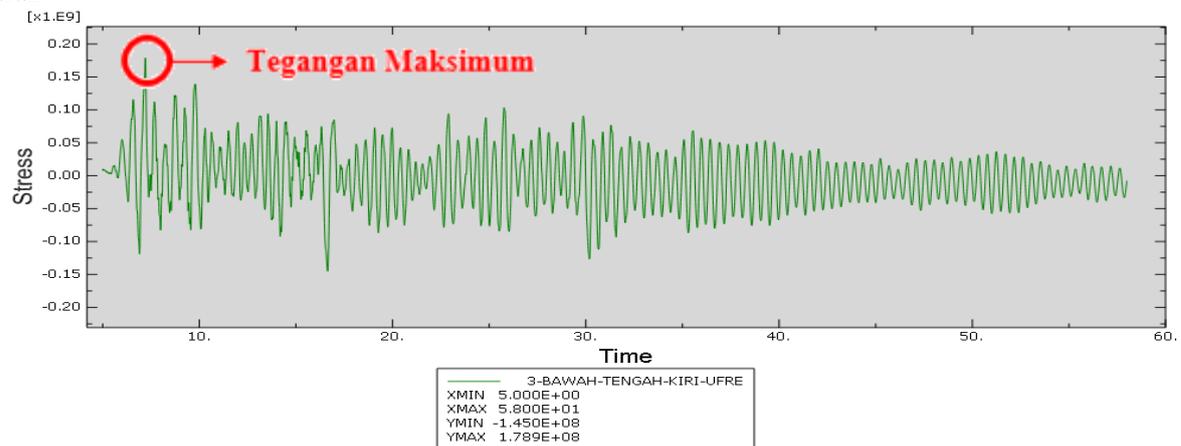
4.3.4 Batang Segmen Tengah Bagian Bawah

Gambar 4.24 di bawah ini merupakan gambaran riwayat kurva regangan dari awal pembebanan hingga akhir pada bagian batang segmen tengah bagian bawah struktur jembatan. Terlihat bahwa nilai regangan maksimum sebesar 0.000894 (Tarik), sedangkan regangan minimum sebesar 0.000725 (Tekan).

Kemudian kurva tegangan pada bagian batang segmen tengah bagian bawah struktur jembatan tersebut digambarkan pada **gambar 4.25**. Dijelaskan bahwa nilai tegangan maksimum pada batang tersebut sebesar 178.900 MPa (Tarik), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 145 MPa (Tekan).



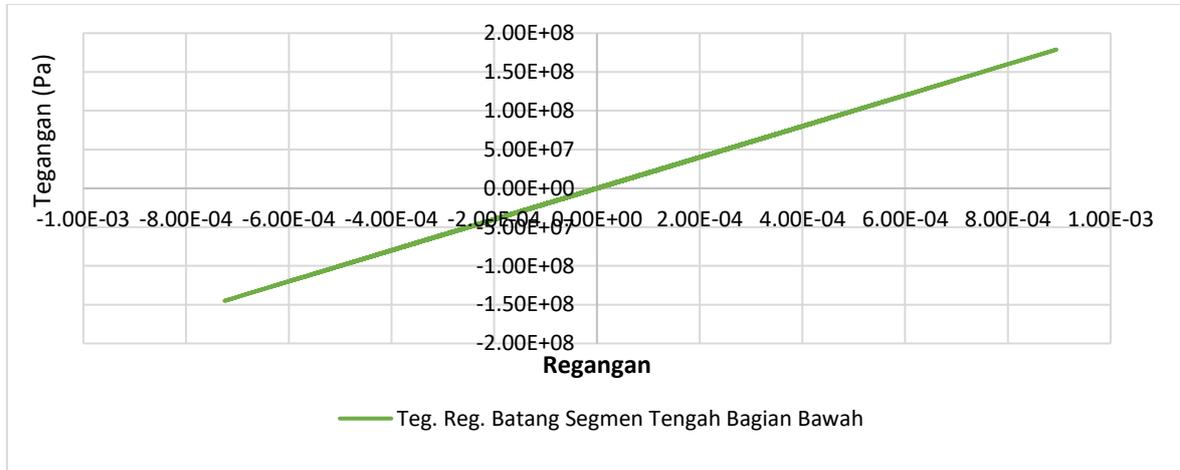
Gambar 4.24 Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah



Gambar 4.25 Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah

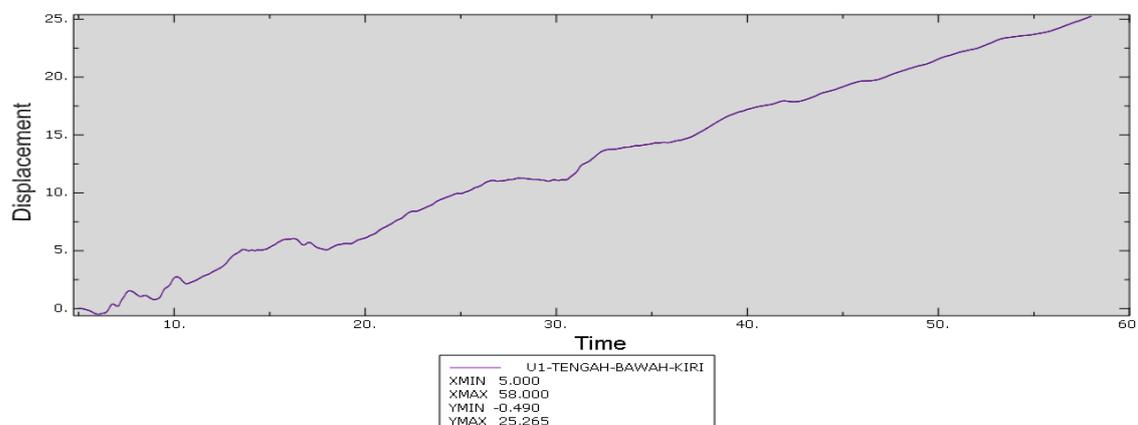
Di bawah ini merupakan **Gambar 4.26** yaitu kurva tegangan dan regangan batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa dua arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah sebesar 178.900 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.650 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa batang segmen tengah bagian

bawah tersebut masih mengalami tahap elastis atau dapat kembali ke bentuk awal yang dapat ditandai dengan grafik yang masih membentuk linear. Sehingga dapat disimpulkan, bahwa batang segmen tengah bagian bawah tersebut belum mengalami keruntuhan baik keruntuhan lentur maupun tekuk.



Gambar 4.26 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah

Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini merupakan **Gambar 4.27** yang menunjukkan batang segmen tengah bagian bawah yang mengalami perpindahan ke arah X sebesar 25.265 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.

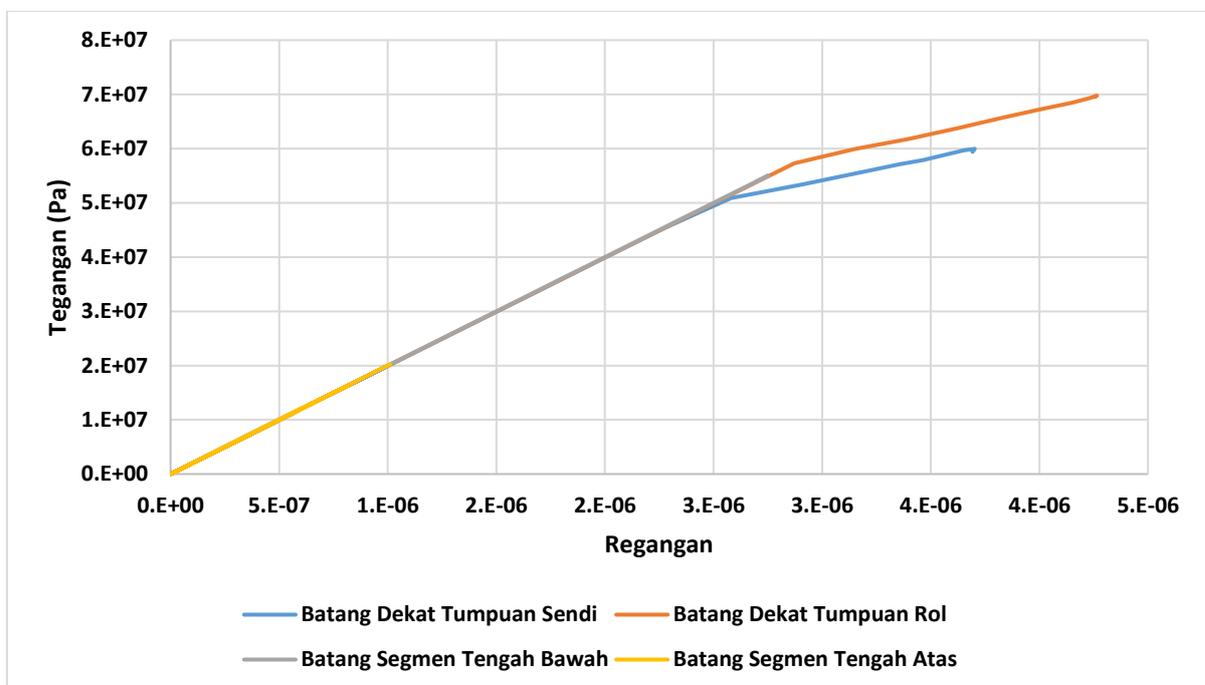


Gambar 4.27 Kurva *displacement* (U1) pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah

4.3.5 Perbandingan Tegangan dan Regangan antar Batang yang Ditinjau

Dalam merencanakan struktur terdapat beberapa syarat yang harus dipenuhi yaitu syarat kekakuan dan daktilitas. Kekakuan adalah besarnya gaya yang diperlukan untuk menghasilkan satu unit deformasi. Parameter yang digunakan berupa modulus elastisitas (E). Pembatasan kekakuan berguna untuk menjaga agar lendutan pada struktur tersebut tidak melebihi lendutan ijin. Kekakuan berarti bertambahnya tegangan tidak disertai dengan kenaikan regangan yang tinggi maka kekakuannya tergolong tinggi. Sedangkan jika kenaikan regangan disertai dengan kenaikan tegangan yang rendah maka kekakuannya tergolong rendah.

Di bawah ini merupakan **Gambar 4.28** yaitu gambar grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama. Dari grafik dapat dilihat bahwa batang dekat dengan tumpuan sendi, batang dekat tumpuan rol, batang segmen tengah bagian atas dan batang segmen tengah bagian bawah memiliki kemiringan kurva yang sama. Ini berarti keempat batang tersebut memiliki kekakuan yang hampir sama di awal seperempat siklus tersebut. Perbedaannya adalah kurva dari batang dekat tumpuan sendi dan batang dekat tumpuan rol ketika di seperempat siklus terakhir kurvanya mulai condong ke arah kanan. Berbeda halnya dengan batang segmen tengah atas dan bawah yang memiliki kemiringan kurva yang sama dari awal hingga seperempat siklus.



Gambar 4.28 Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama akibat beban gempa dua arah

Sehingga dapat disimpulkan bahwa batang dekat dengan tumpuan sendi dan rol memiliki modulus elastisitas yang rendah dan daktilitas yang lebih tinggi karena memiliki regangan yang lebih besar dibandingkan dengan dua batang yang lain, karena semakin condong kurva tegangan-regangan ke arah kanan maka semakin daktil batang tersebut sedangkan batang segmen tengah atas dan bawah memiliki kekakuan yang tinggi dikarenakan penambahan tegangan tidak disertai dengan penambahan regangan yang tinggi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **tabel 4.3** di bawah ini:

Tabel 4.3

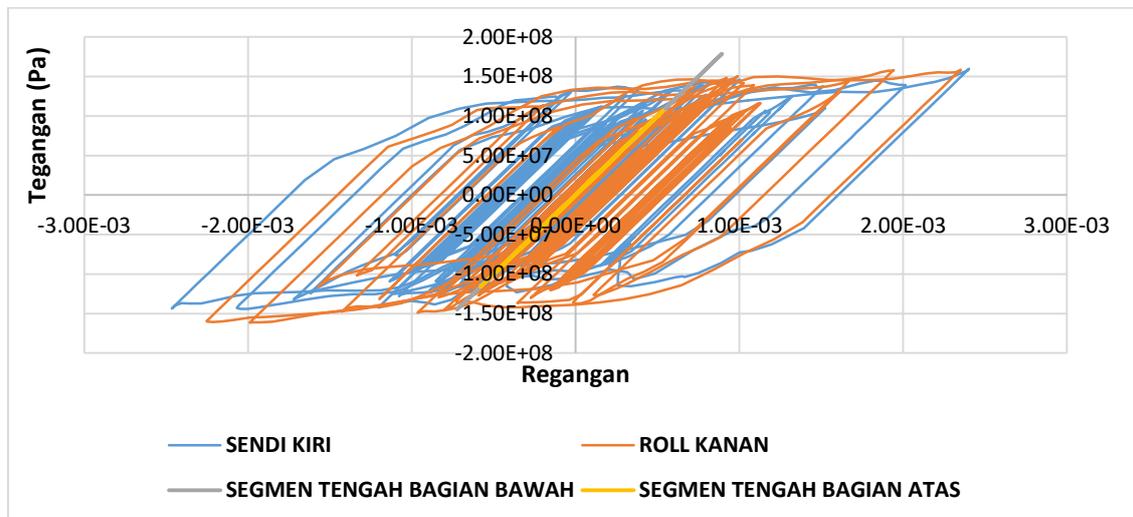
Nilai Modulus Elastisitas Pada Siklus Pertama akibat Beban Gempa Dua Arah

No	Nama Batang	Tegangan	Regangan	Modulus Elastisitas (MPa)
1	Batang Dekat Tumpuan Sendi	59433900	0.0003693	160951
2	Batang Dekat Tumpuan Rol	69511300	0.0004253	163441
3	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	20544200	0.0001027	200000
4	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	55038300	0.0002752	200000

Dapat dilihat bahwa batang segmen tengah bagian atas dan batang segmen tengah bagian bawah merupakan batang yang tidak mengalami penurunan modulus elastisitas akibat beban gempa dua arah. Dapat dilihat pada **Tabel 4.3** diatas, bahwa nilai modulus elastisitas pada batang segmen tengah sebesar ≈ 200000 MPa. Dengan kata lain bahwa, beban gempa dua arah sama sekali tidak berpengaruh signifikan terhadap elastisitas batang tersebut. Berbeda dengan batang dekat tumpuan sendi dan batang dekat tumpuan rol, kedua batang tersebut mengalami penurunan kekakuan akibat adanya beban gempa dua arah.

Dibawah ini merupakan **Gambar 4.29** yaitu kurva perbandingan hubungan tegangan dan regangan antar batang yang ditinjau yaitu batang dekat dengan tumpuan sendi, batang dekat dengan tumpuan rol, batang segmen tengah bagian atas, dan batang segmen tengah bagian bawah yang akan menunjukkan daktilitas dari suatu batang. Daktilitas adalah kemampuan material untuk mengalami regangan sebelum material runtuh. Dapat diketahui bahwa baja dengan mutu yang tinggi memiliki daktilitas yang rendah, sehingga dapat dilihat bahwa grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian atas dan bawah membentuk linear sehingga regangan yang terjadi pada siklus batang tersebut tidak terlihat kecuali menggunakan data yang didapat. Sehingga ini menandakan bahwa batang segmen tengah bagian atas dan bawah belum mengalami kerusakan karena tegangan yang didapat belum mencapai tegangan leleh pada kondisi awal batang atau masih dalam tahap

elastis dan juga terdapat faktor akibat memakai material dengan mutu tinggi yaitu baja mutu BJ-41.



Gambar 4.29 Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau akibat beban gempa dua arah

Berbeda halnya dengan batang dekat dengan tumpuan sendi dan rol, dalam kurva dapat terlihat pada bagian mendatar bahwa batang dekat dengan tumpuan memiliki regangan yang besar jika dibandingkan dengan batang segmen tengah atas dan bawah. Hal ini menandakan bahwa batang dekat dengan tumpuan telah mengalami kerusakan karena tegangan yang didapat lebih besar daripada tegangan leleh pada kondisi awal batang atau telah mencapai tahap inelastis dan juga terdapat faktor akibat memakai material dengan mutu rendah yaitu baja mutu BJ-37. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan didaptkannya nilai selisih dari regangan maksimum dengan regangan leleh dari tiap batang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel 4.4** dimana batang yang memiliki selisih regangan paling besar adalah batang dekat tumpuan sendi sehingga, batang tersebut dapat dikatakan memiliki daktilitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan batang yang lain.

Tabel 4.4

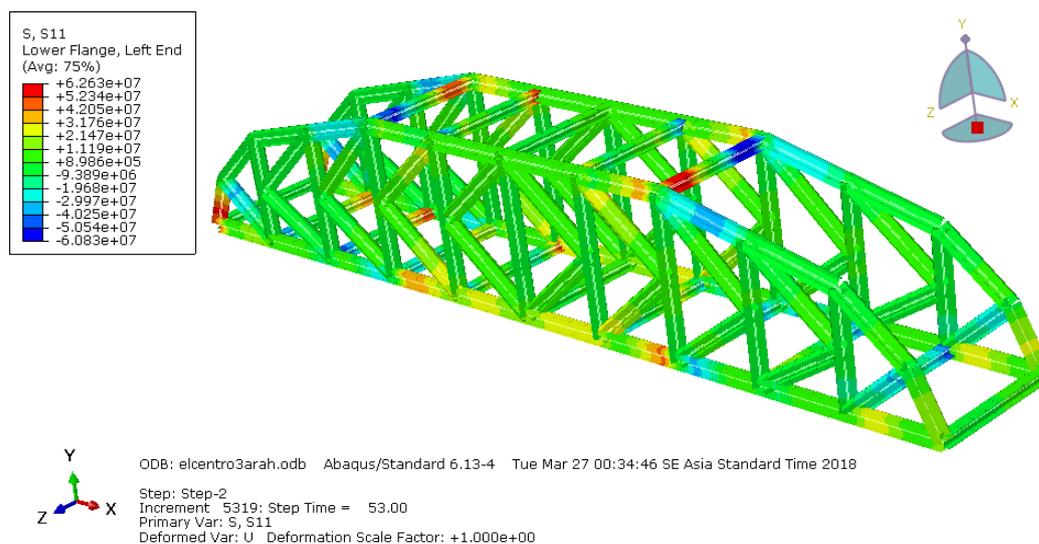
Rekapitulasi Selisih Nilai Regangan Tiap Batang akibat Beban Gempa Dua Arah

No	Batang	Regangan Leleh	Regangan Maksimum	Selisih Regangan
1	Batang Dekat Tumpuan Sendi	0.000258	0.002467	0.002209
2	Batang Dekat Tumpuan Sendi	0.000287	0.002351	0.002064
3	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	0.000102	0.000581	0.000479
4	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	0.000269	0.000894	0.000625

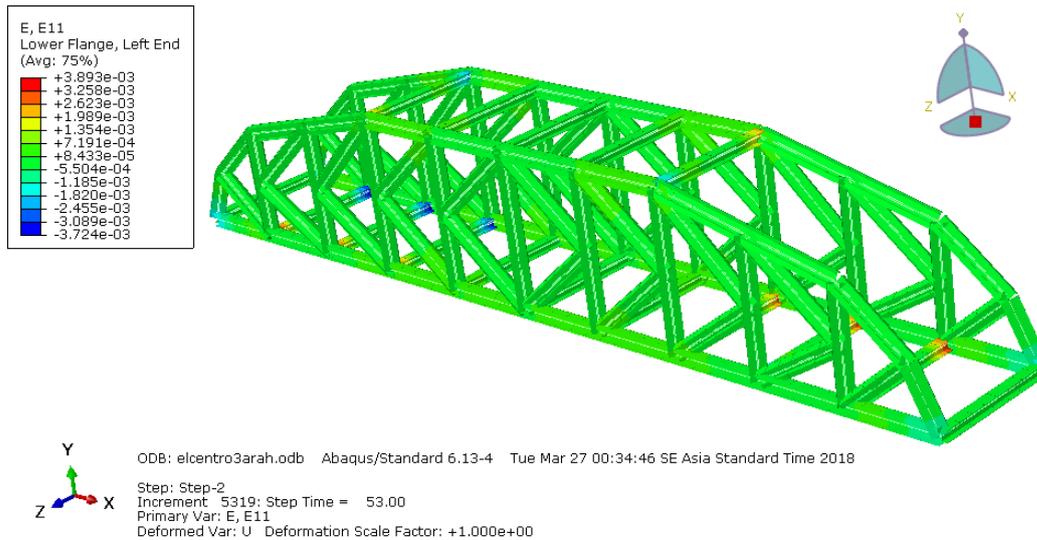
4.4 Respon Struktur Terhadap Beban Gempa Tiga Arah

Pemodelan jembatan dan data *time history* gempa tiga selanjutnya dimasukkan arah ke dalam *software* ABAQUS *Student Edition*, kemudian dilakukan analisis terhadap struktur jembatan untuk melihat respon/perilaku yang terjadi pada struktur jembatan apabila diberi beban gempa tiga arah. Pada arah jembatan sumbu X digunakan arah gempa *north-south* (utara-selatan), pada arah jembatan sumbu Y digunakan arah gempa *up-down* dan pada arah jembatan sumbu Z digunakan arah gempa *east-west* (timur-barat). Dimana keadaan tersebut merupakan keadaan saat jembatan mengalami efek terbesar akibat adanya beban gempa. Keadaan tersebut diterapkan pada tumpuan sendi, sedangkan ditumpuan rol digunakan gempa pada arah jembatan sumbu Y dengan arah *up-down* dan daerah jembatan sumbu Z dengan arah gempa *east-west* (timur-barat).

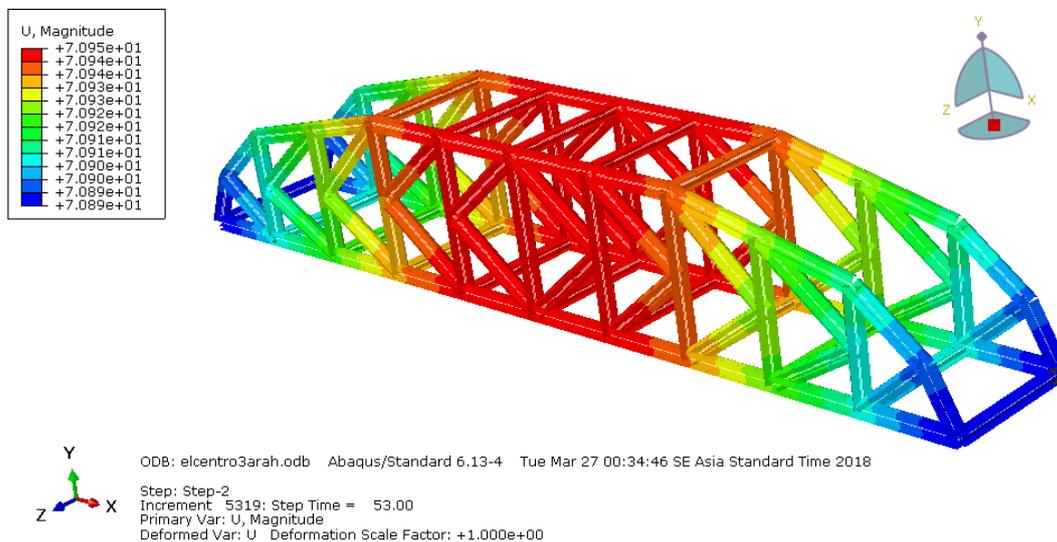
Hasil dari analisis ini berupa nilai *displacement*, tegangan aksial dan juga distribusi regangan. Respon struktur jembatan berupa tegangan aksial terdiri atas, tegangan aksial tarik dan tegangan aksial tekan yang terjadi pada masing-masing batang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 4.30**. Sedangkan, untuk hasil distribusi regangan tarik dan tekan disajikan pada **Gambar 4.31**. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa bagian jembatan dengan batang tarik dan tekan paling kritis adalah daerah balok yang berlokasi dekat dengan tumpuan sendi jembatan (ditunjukkan dengan garis warna jingga untuk batang tarik dan warna biru muda untuk batang tekan). Kotak yang berada disamping kiri gambar merupakan penjelasan warna tegangan dan regangan aksial akhir yang dicapai oleh struktur jembatan tersebut.



Gambar 4.30 Distribusi tegangan aksial akibat beban gempa tiga arah



Gambar 4.31 Distribusi regangan aksial akibat beban gempa tiga arah



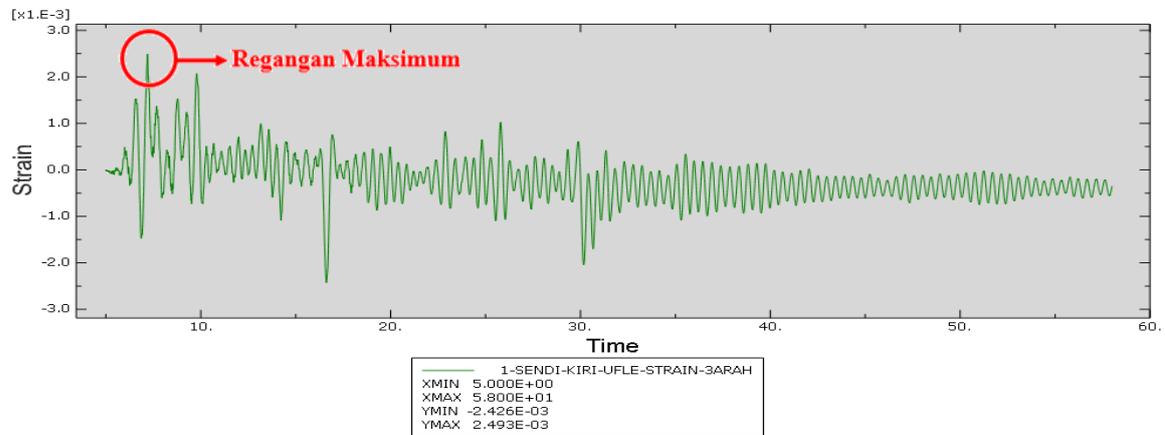
Gambar 4.32 Deformasi akibat beban gempa tiga arah

Seperti dijelaskan sebelumnya, untuk dapat mengetahui kurva tegangan dan regangan dari awal pembebanan sampai dengan akhir pada tiap bagian struktur jembatan, peneliti membagi jembatan menjadi dua sisi yaitu sisi kanan dan sisi kiri yang secara jelas dapat dilihat pada **Gambar 4.10**. Kemudian dapat dilihat pada **Gambar 4.11**, setiap sisi jembatan dibagi menjadi empat bagian, antara lain batang dekat tumpuan sendi, batang dekat tumpuan rol, batang tengah bawah dan batang tengah atas.

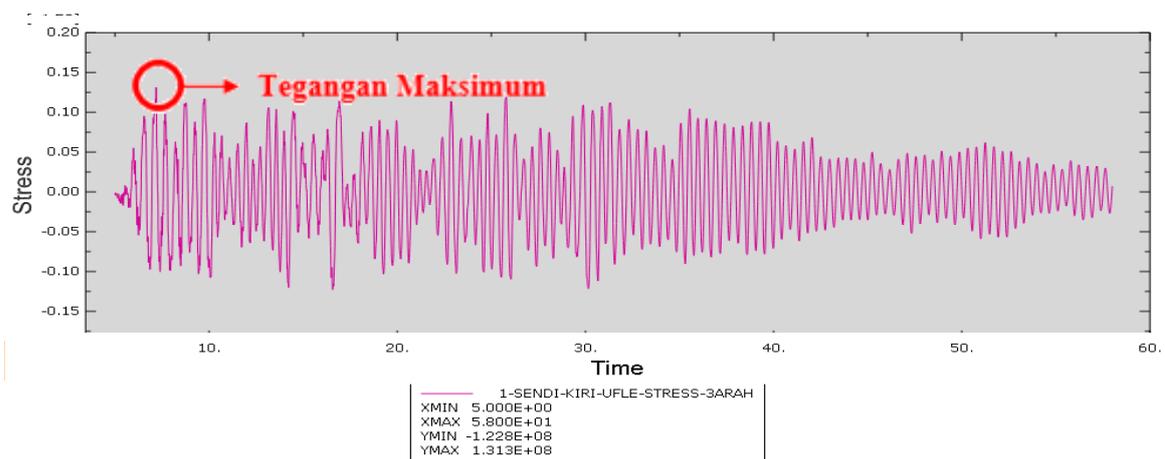
4.4.1 Batang Dekat Tumpuan Sendi

Gambar 4.33 di bawah ini merupakan gambaran riwayat kurva regangan dari awal pembebanan hingga akhir pada bagian batang dekat tumpuan sendi struktur jembatan. Terlihat bahwa nilai regangan maksimum sebesar 0.002493 (Tarik), sedangkan regangan minimum sebesar 0.002426 (Tekan).

Kemudian kurva tegangan pada bagian batang dekat tumpuan sendi struktur jembatan tersebut digambarkan pada **gambar 4.34**. Dijelaskan bahwa nilai tegangan maksimum pada batang tersebut sebesar 131.300 MPa (Tarik), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 122.800 MPa (Tekan).

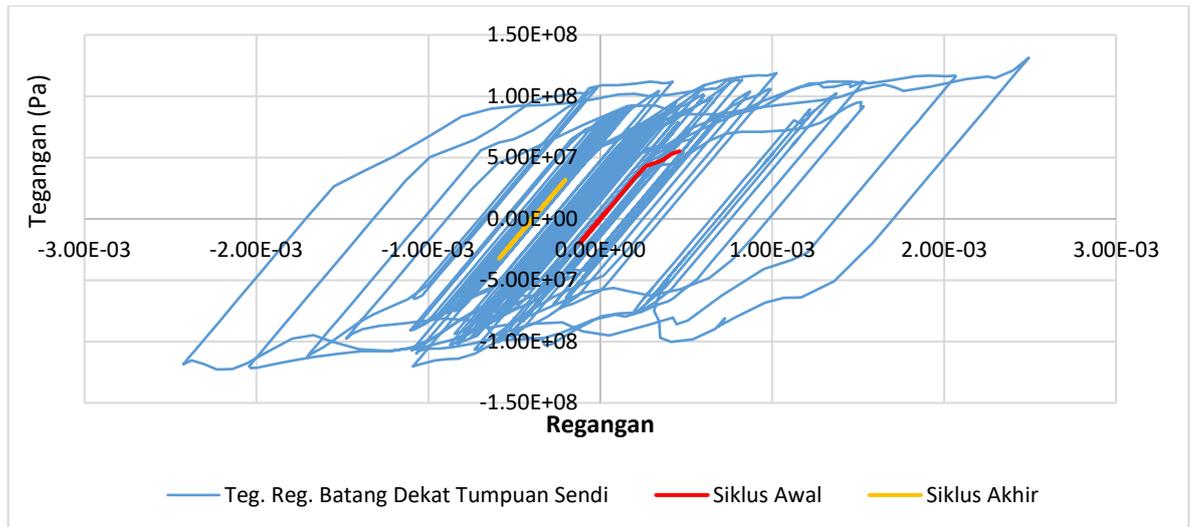


Gambar 4.33 Kurva regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah



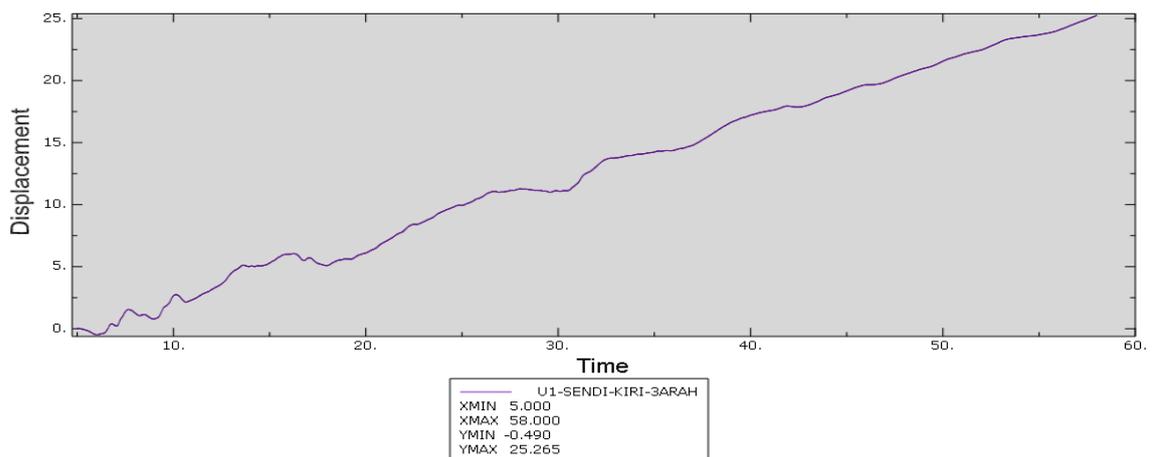
Gambar 4.34 Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah

Gambar 4.35 di bawah merupakan kurva tegangan dan regangan dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah sebesar 131.300 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 141.404 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat garis berwarna merah merupakan siklus awal yang terjadi pada batang, sedangkan garis berwarna oranye merupakan siklus akhir dari batang tersebut. Jika dari posisi keduanya, menunjukkan bahwa batang meregang tanpa kembali ke bentuk semula atau batang dekat tumpuan sendi tersebut telah mengalami tahap inelastis sehingga dapat disimpulkan bahwa batang dekat tumpuan sendi tersebut telah mengalami keruntuhan, baik keruntuhan lentur maupun tekuk.



Gambar 4.35 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah

Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini terdapat **Gambar 4.36** yang menunjukkan batang dekat tumpuan sendi yang mengalami perpindahan ke arah X sebesar 25.265 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.



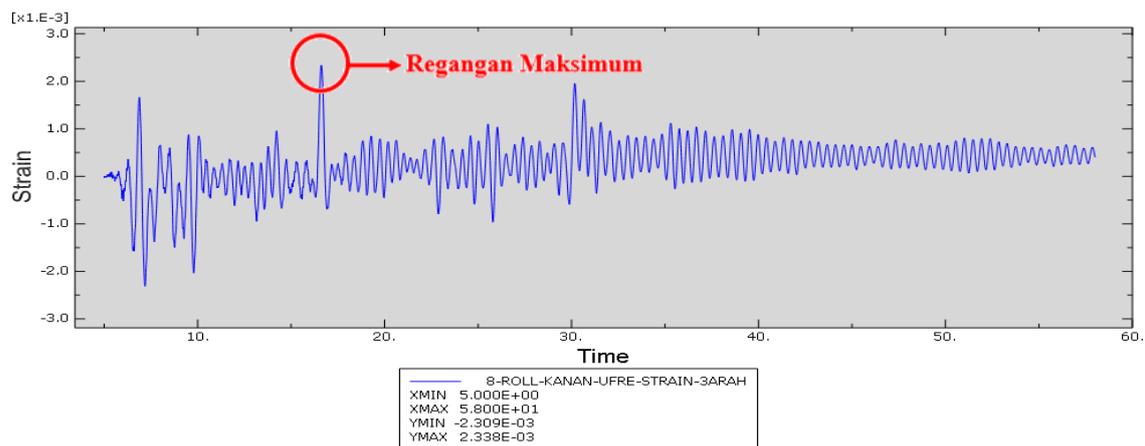
Gambar 4.36 Kurva *displacement* (U1) pada batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa tiga arah

4.4.2 Batang Dekat Tumpuan Rol

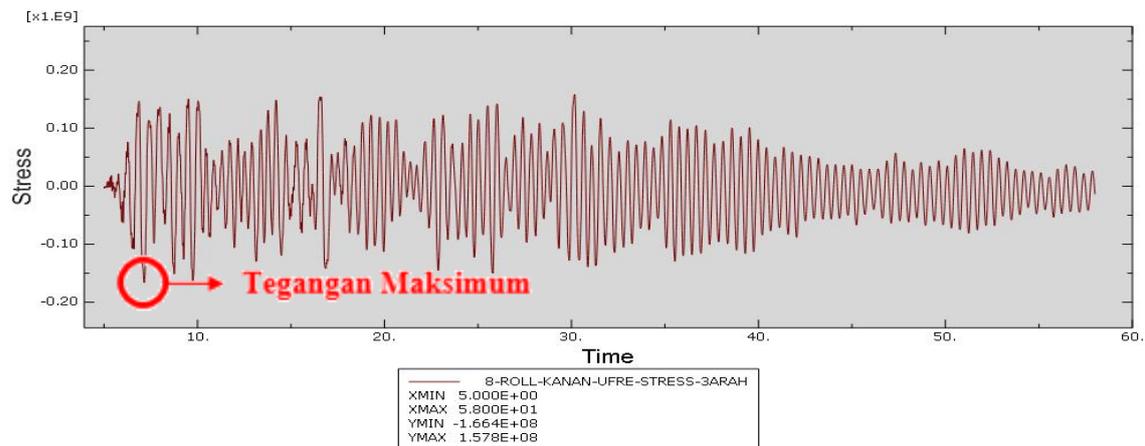
Gambar 4.37 Di bawah ini merupakan riwayat kurva regangan batang dekat tumpuan rol dari awal hingga akhir pembebanan pada struktur jembatan. Dapat dilihat bahwa nilai

regangan maksimum sebesar 0.002338 (Tarik), sedangkan regangan minimum sebesar 0.002309 (Tekan).

Kemudian untuk bagian batang dekat tumpuan rol struktur jembatan tersebut, kurva tegangan digambarkan pada **gambar 4.38**. Dijelaskan bahwa nilai tegangan maksimum pada batang tersebut sebesar 166.400 MPa (Tekan), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 157.800 MPa (Tarik).



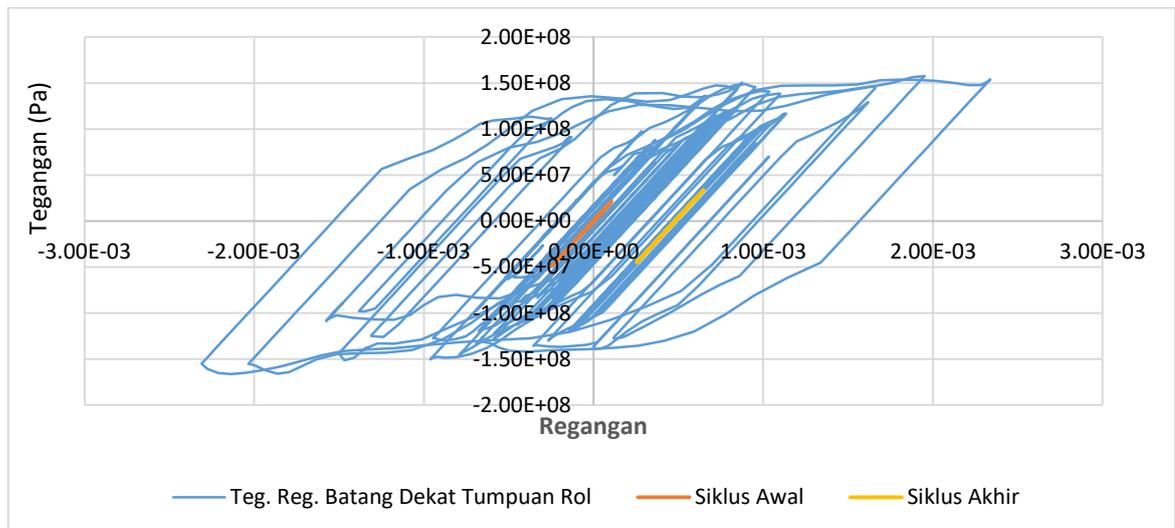
Gambar 4.37 Kurva regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah



Gambar 4.38 Kurva tegangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah

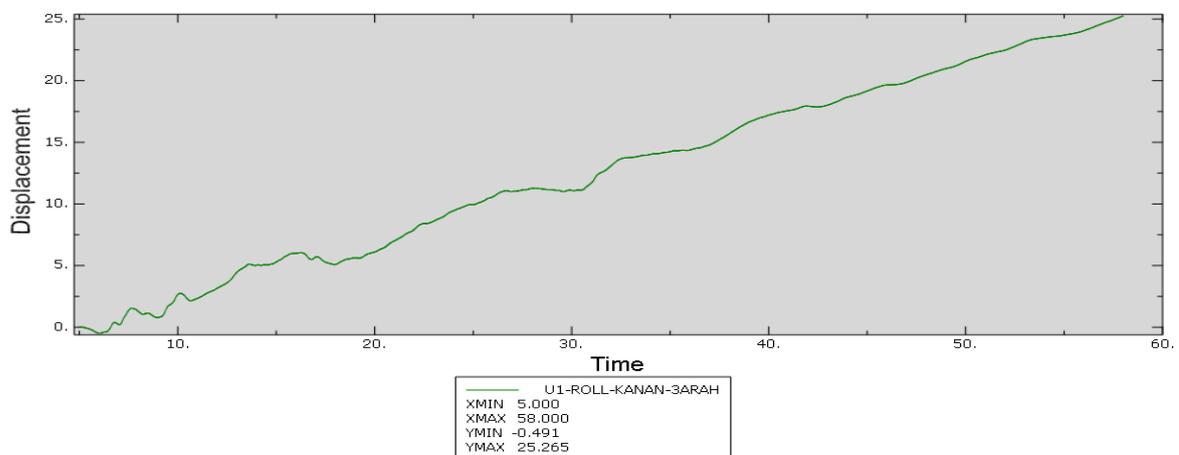
Gambar 4.39 di bawah merupakan kurva tegangan dan regangan dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah sebesar 166.400 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 141.404 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat garis berwarna biru merupakan siklus awal yang terjadi pada batang, sedangkan garis berwarna oranye merupakan siklus akhir dari batang tersebut. Jika dari posisi keduanya, menunjukkan bahwa batang meregang tanpa kembali ke bentuk semula atau batang dekat tumpuan rol tersebut telah mengalami tahap inelastis sehingga dapat

disimpulkan bahwa batang dekat tumpuan sendi tersebut telah mengalami keruntuhan, baik keruntuhan lentur maupun tekuk.



Gambar 4.39 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah

Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini terdapat **Gambar 4.40** yang menunjukkan batang dekat tumpuan rol yang mengalami perpindahan ke arah X sebesar 25.265 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.

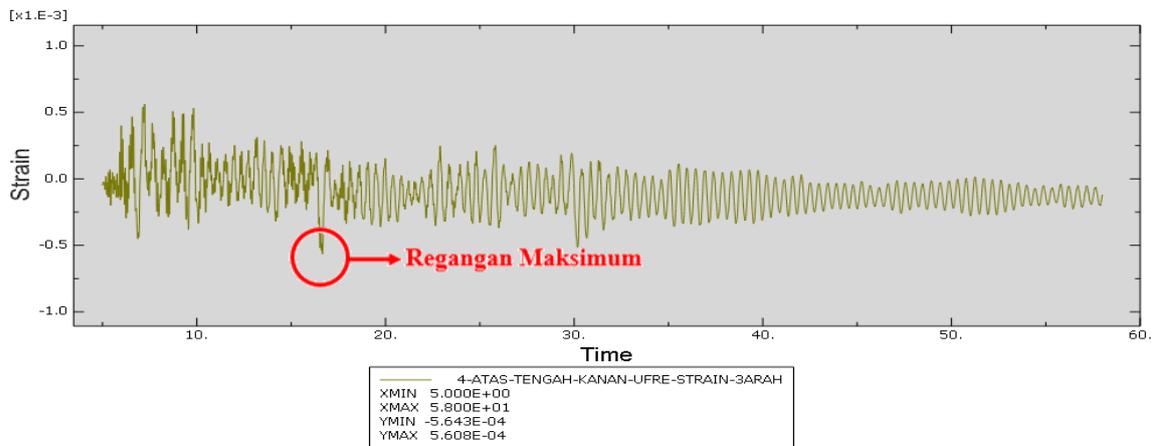


Gambar 4.40 Kurva *displacement* (U1) pada batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa tiga arah

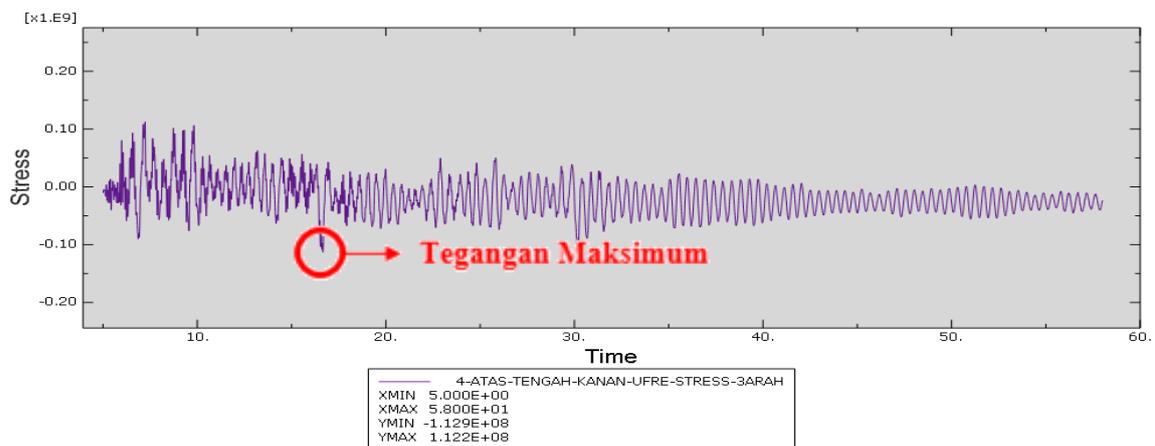
4.4.3 Batang Segmen Tengah Bagian Atas

Berikut ini merupakan **Gambar 4.41** yaitu riwayat kurva regangan batang segmen tengah bagian atas dari awal hingga akhir pembebanan pada struktur jembatan. Dapat dilihat bahwa nilai regangan maksimum sebesar 0.000564 (Tekan), sedangkan regangan minimum sebesar 0.000560 (Tarik).

Kemudian untuk bagian batang segmen tengah bagian atas struktur jembatan tersebut, kurva tegangan digambarkan pada **gambar 4.42** dapat dilihat bahwa nilai tegangan maksimum pada batang tersebut sebesar 112.900 MPa (Tekan), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 112.200 MPa (Tarik).



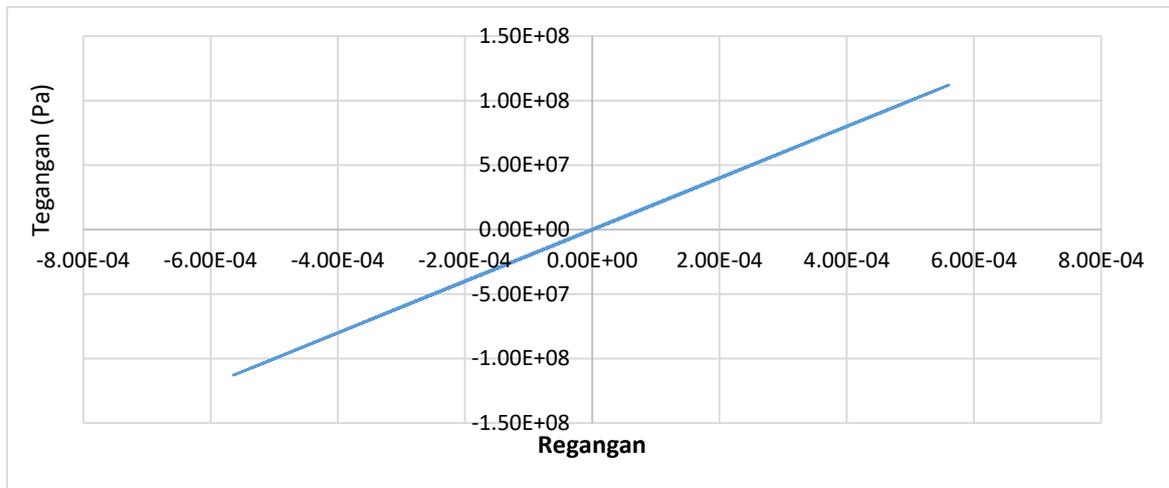
Gambar 4.41 Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah



Gambar 4.42 Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah

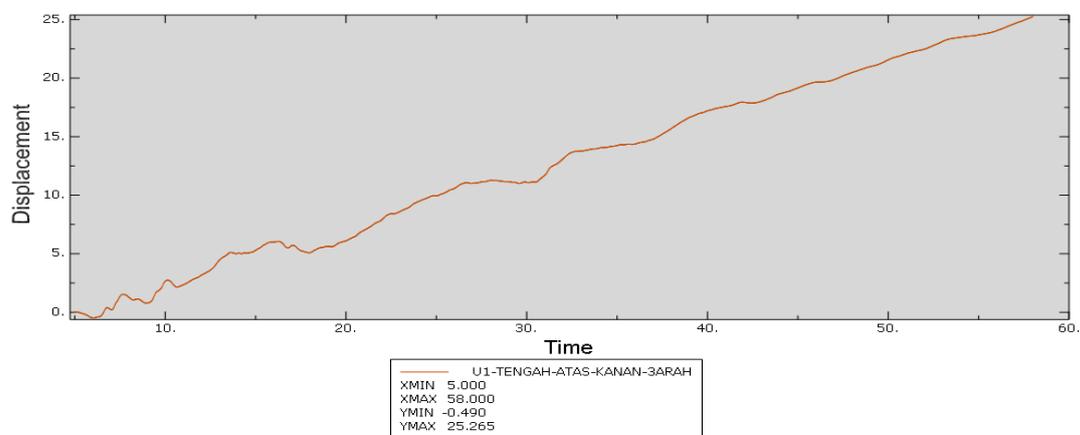
Di bawah ini merupakan **Gambar 4.43** yaitu kurva tegangan dan regangan batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah sebesar 112.900 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.650 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa batang segmen tengah bagian atas tersebut masih dalam tahap elastis atau dapat kembali ke bentuk awal yang dapat

ditandai dengan grafik yang masih membentuk linear. Sehingga dapat disimpulkan, bahwa batang segmen tengah bagian atas tersebut belum mengalami keruntuhan baik keruntuhan lentur maupun tekuk.



Gambar 4.43 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah

Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini merupakan **Gambar 4.44** yang menunjukkan batang segmen tengah bagian atas yang mengalami perpindahan ke arah X sebesar 25.265 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.

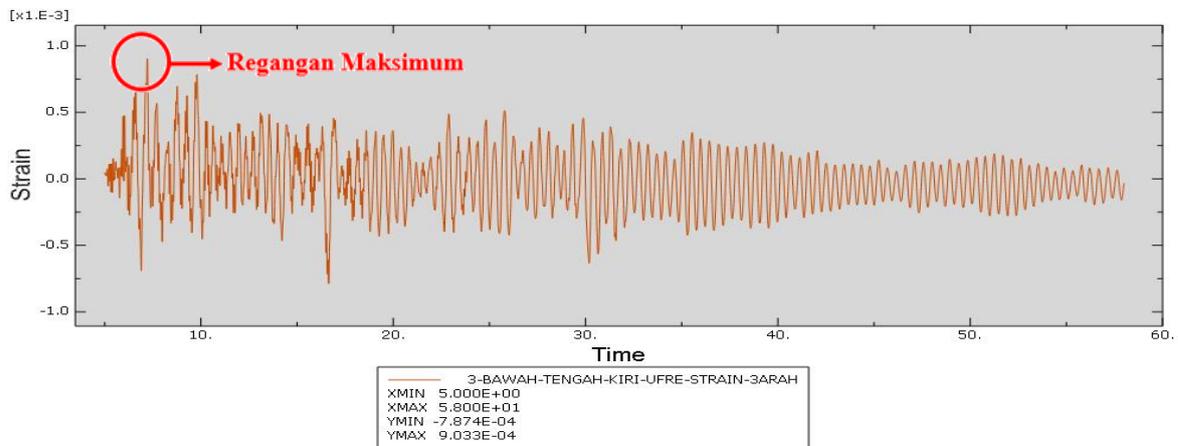


Gambar 4.44 Kurva *displacement* (U1) pada batang segmen tengah bagian atas akibat beban gempa tiga arah

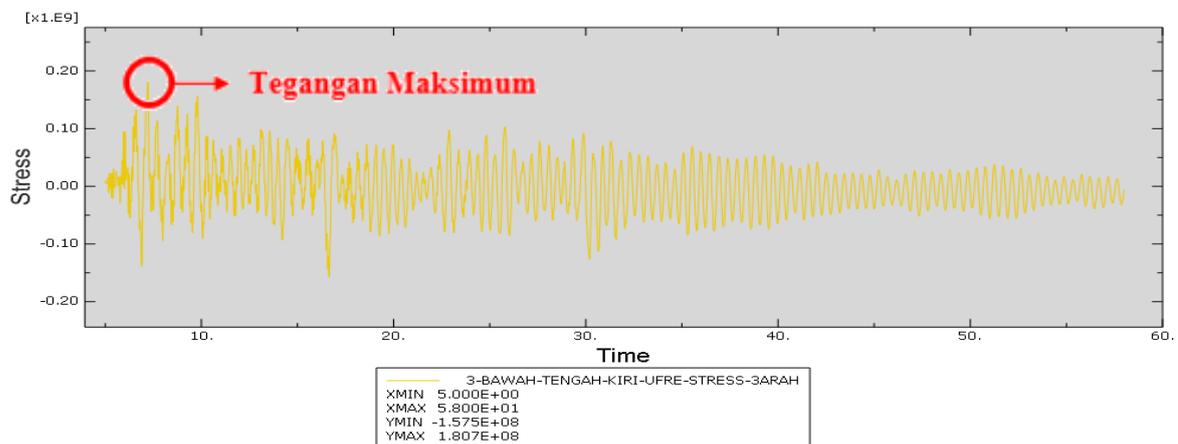
4.4.4 Batang Segmen Tengah Bagian Bawah

Gambar 4.45 di bawah ini merupakan gambaran riwayat kurva regangan dari awal pembebanan hingga akhir pada bagian batang segmen tengah bagian bawah struktur jembatan. Terlihat bahwa nilai regangan maksimum sebesar 0.000903 (Tarik), sedangkan regangan minimum sebesar 0.000787 (Tekan).

Kemudian kurva tegangan pada bagian batang segmen tengah bagian bawah struktur jembatan tersebut digambarkan pada **gambar 4.46**. Dijelaskan bahwa nilai tegangan maksimum pada batang tersebut sebesar 180.700 MPa (Tarik), sedangkan nilai tegangan minimumnya sebesar 157.500 MPa (Tekan).



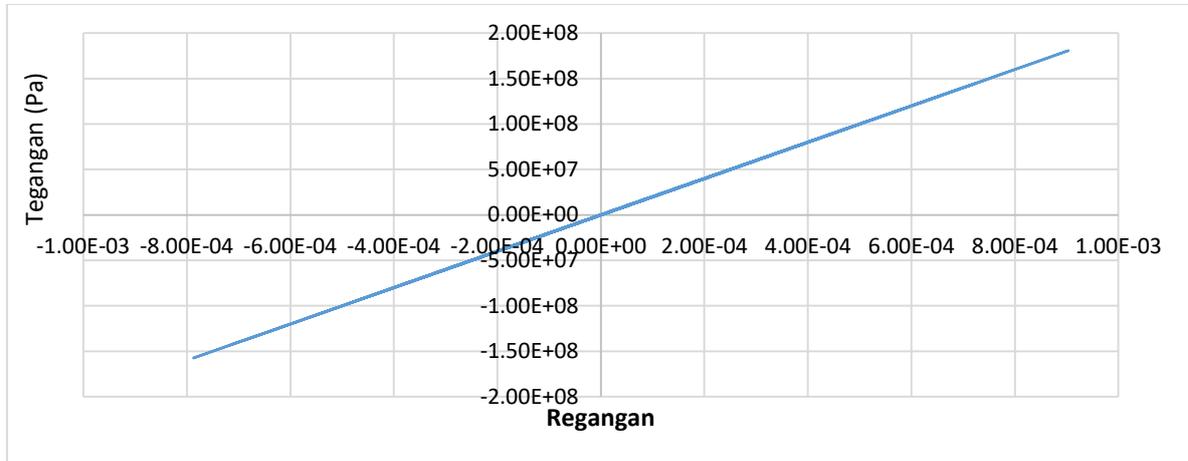
Gambar 4.45 Kurva regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah



Gambar 4.46 Kurva tegangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah

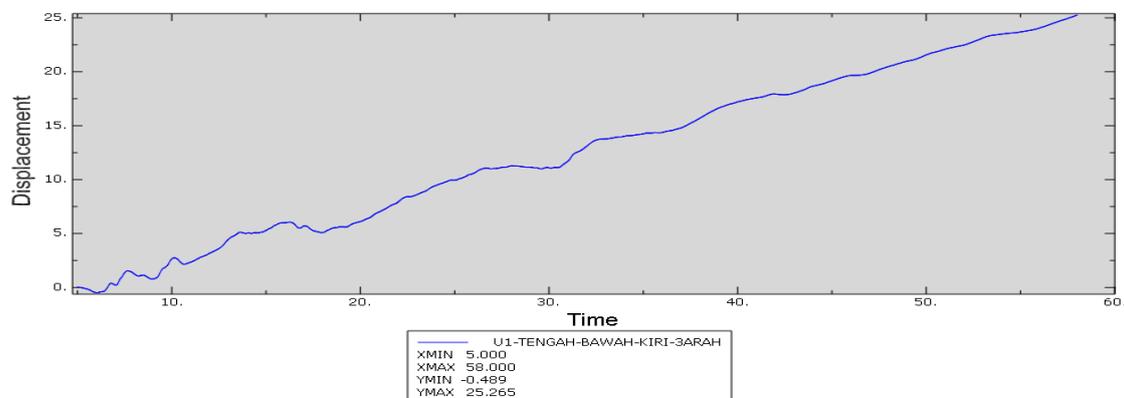
Di bawah ini merupakan **Gambar 4.47** yaitu kurva tegangan dan regangan batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah sebesar 180.700 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.650 MPa. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa batang segmen tengah bagian

bawah tersebut masih mengalami tahap elastis atau dapat kembali ke bentuk awal yang dapat ditandai dengan grafik yang masih membentuk linear. Sehingga dapat disimpulkan, bahwa batang segmen tengah bagian bawah tersebut belum mengalami keruntuhan baik keruntuhan lentur maupu tekuk.



Gambar 4.47 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah

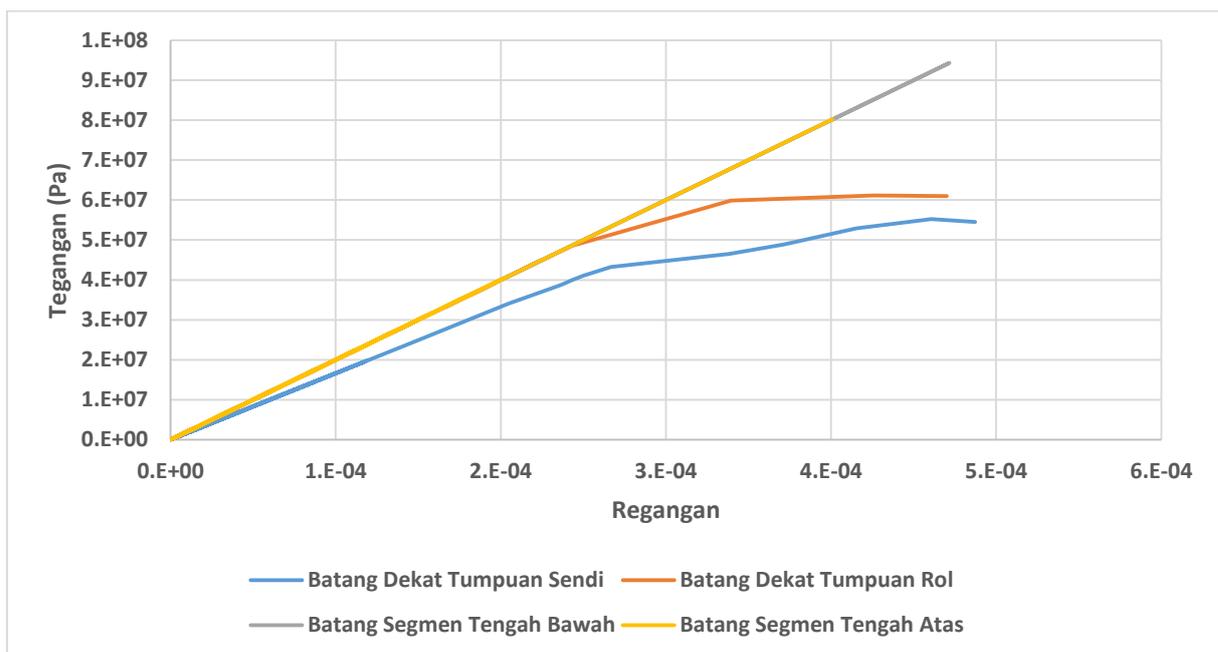
Pada suatu struktur jembatan, nilai *displacement* yang terjadi sebaiknya harus sekecil mungkin. Karena semakin besar gaya yang diberikan pada struktur jembatan, maka *displacement* yang terjadi akan semakin besar. Selain akibat gaya pada struktur, besarnya nilai *displacement* pada struktur juga dipengaruhi oleh kekakuan struktur itu sendiri. Semakin besar nilai kekakuan struktur, maka *displacement* yang dihasilkan akan semakin kecil. Di bawah ini merupakan **Gambar 4.48** yang menunjukkan batang segmen tengah bagian bawah yang mengalami perpindahan ke arah X sebesar 25.265 m. Hal ini diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan sebesar 10 kali percepatan dari gempa aslinya sehingga jembatan mengalami perpindahan dengan jarak tertentu.



Gambar 4.48 Kurva *displacement* (U1) pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa tiga arah

4.4.5 Perbandingan Tegangan dan Regangan antar Batang yang Ditinjau

Seperti telah dijelaskan pada perbandingan tegangan dan regangan antar batang yang ditinjau pada gempa dua arah, bahwa dalam merencanakan struktur terdapat beberapa syarat yang harus dipenuhi yaitu syarat kekakuan dan daktilitas. Di bawah ini merupakan **Gambar 4.49** yaitu gambar grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama. Dari grafik dapat dilihat bahwa batang dekat dengan tumpuan rol, batang segmen tengah bagian atas dan batang segmen tengah bagian bawah memiliki kemiringan kurva yang sama. Ini berarti ketiga batang tersebut memiliki kekakuan yang hampir sama di awal seperempat siklus tersebut. Berbeda halnya dengan batang dekat tumpuan sendi, batang tersebut kemiringan awalnya berbeda dan juga batang ini kurvanya lebih condong jika dibandingkan dengan ketiga batang lainnya. Hal tersebut berarti tumpuan dekat dengan sendi tidak lebih kaku dari batang lain. Seperti dapat dilihat pada gambar, batang dekat dengan tumpuan sendi memiliki regangan yang lebih besar yang berarti kemiringan kurvanya lebih condong ke bawah.



Gambar 4.49 Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama akibat beban gempa tiga arah

Sehingga dapat disimpulkan bahwa batang dekat dengan tumpuan sendi dan rol memiliki modulus elastisitas paling rendah dan daktilitas yang lebih tinggi, karena memiliki regangan yang lebih besar jika dibandingkan dengan kedua batang lainnya. Hal ini diakibatkan oleh efek dari beban gempa tiga arah yang telah merusak batang tersebut. Seperti dapat diketahui sebelumnya bahwa semakin condong kurva tegangan-regangan ke arah kanan maka semakin daktil batangnya sedangkan pada batang segmen tengah atas dan

bawah memiliki kekakuan yang tinggi dikarenakan penambahan tegangan tidak disertai dengan penambahan regangan yang tinggi, hal tersebut dibuktikan dengan bentuk kurva dari batang segmen tengah atas dan bawah yang masih berbentuk linear. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **tabel 4.5** di bawah ini :

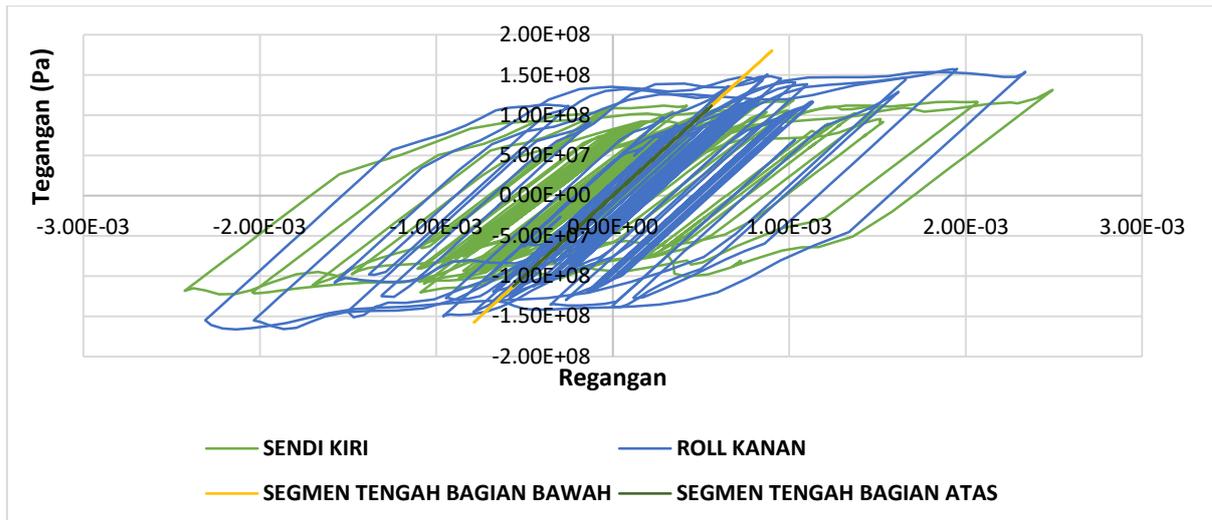
Tabel 4.5

Nilai Modulus Elastisitas Pada Siklus Pertama akibat Beban Gempa Tiga Arah

No	Nama Batang	Tegangan (Pa)	Regangan	Modulus Elastisitas (MPa)
1	Batang Dekat Tumpuan Sendi	54513400	0.0004872	111888.23
2	Batang Dekat Tumpuan Rol	60976200	0.0004701	129702.93
3	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	94329500	0.0004716	200000.21
4	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	80206500	0.000401	200000

Dapat dilihat bahwa batang segmen tengah bagian atas dan batang segmen tengah bagian bawah merupakan batang yang tidak mengalami penurunan modulus elastisitas akibat beban gempa dua arah. Dapat dilihat pada **Tabel 4.5** diatas, bahwa nilai modulus elastisitas pada batang segmen tengah ≈ 200000 MPa. Dengan kata lain bahwa, beban gempa dua arah sama sekali tidak berpengaruh signifikan terhadap elastisitas batang tersebut. Berbeda dengan batang dekat tumpuan sendi dan batang dekat tumpuan rol, kedua batang tersebut mengalami penurunan kekakuan akibat adanya beban gempa tiga arah.

Dibawah ini merupakan **Gambar 4.50** yaitu kurva perbandingan hubungan tegangan dan regangan antar batang yang ditinjau yaitu batang dekat dengan tumpuan sendi, batang dekat dengan tumpuan rol, batang segmen tengah bagian atas, dan batang segmen tengah bagian bawah yang akan menunjukkan daktilitas dari suatu batang. Daktilitas adalah kemampuan material untuk mengalami regangan sebelum material runtuh. Dapat diketahui bahwa baja dengan mutu yang tinggi memiliki daktilitas yang rendah, sehingga dapat dilihat bahwa grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian atas dan bawah membentuk linear sehingga regangan yang terjadi pada siklus batang tersebut tidak terlihat kecuali menggunakan data yang didapat. Sehingga ini menandakan bahwa batang segmen tengah bagian atas dan bawah belum mengalami kerusakan karena tegangan yang didapat belum mencapai tegangan leleh pada kondisi awal batang atau masih dalam tahap elastis dan juga terdapat faktor akibat memakai material dengan mutu tinggi yaitu baja mutu BJ-41.



Gambar 4.50 Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau akibat beban gempa tiga arah

Berbeda halnya dengan batang dekat tumpuan sendi dan rol, dalam kurva dapat terlihat pada bagian mendatar bahwa batang dekat dengan tumpuan memiliki regangan yang besar jika dibandingkan dengan batang segmen tengah atas dan bawah. Hal ini menandakan bahwa batang dekat dengan tumpuan telah mengalami kerusakan karena tegangan yang didapat lebih besar daripada tegangan leleh pada kondisi awal batang atau telah mencapai tahap inelastis dan juga terdapat faktor akibat memakai material dengan mutu rendah yaitu baja mutu BJ-37. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan didupkannya nilai selisih dari regangan maksimum dengan regangan leleh dari tiap batang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel 4.6** dimana batang yang memiliki selisih regangan paling besar adalah batang dekat tumpuan sendi sehingga, batang tersebut dapat dikatakan memiliki daktilitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan batang yang lain.

Tabel 4.6

Rekapitulasi Selisih Nilai Regangan Tiap Batang Akibat Beban Gempa Tiga Arah

No	Batang	Regangan Leleh	Regangan Maksimum	Selisih Regangan
1	Batang Dekat Tumpuan Sendi	0.000266	0.002493	0.002227
2	Batang Dekat Tumpuan Sendi	0.000243	0.002338	0.002095
3	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	0.000401	0.000564	0.000163
4	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	0.000471	0.000903	0.000432

4.5 Perbandingan Respon Struktur Jembatan antara Beban Gempa Dua Arah dan Tiga Arah

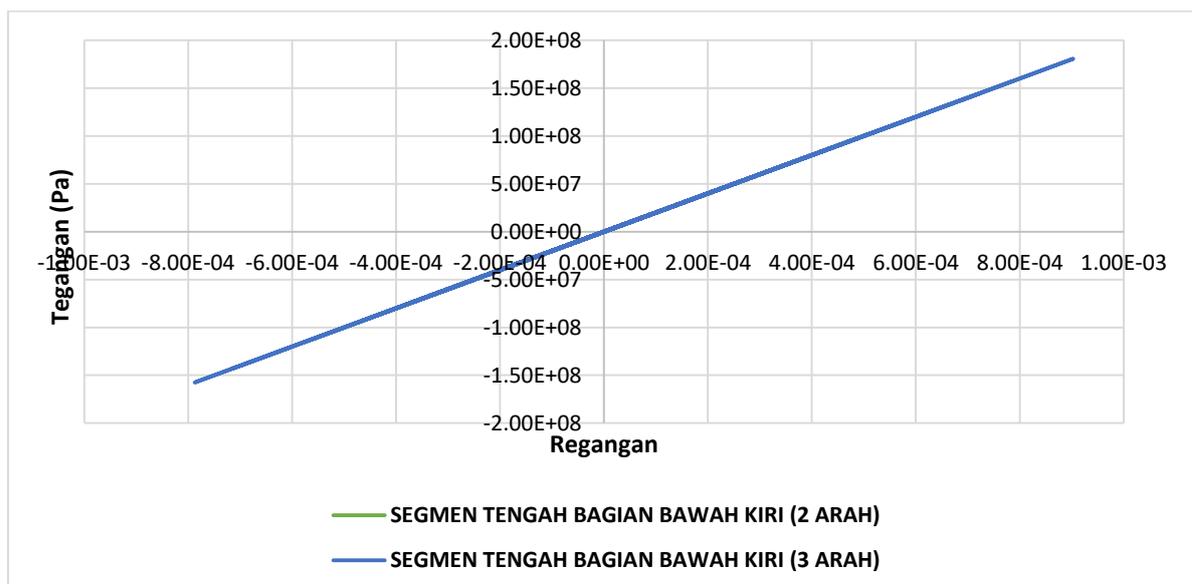
Berdasarkan pembahasan diatas, dapat diketahui nilai tegangan maksimum ada pada batang segmen tengah bagian bawah. Hal ini dibuktikan dalam **gambar 4.25** di atas, bahwa

nilai tegangan maksimum pada batang segmen tengah bagian bawah ketika diberikan beban gempa dua arah, yaitu sebesar 178.900 MPa. Sedangkan untuk nilai tegangan maksimum pada batang segmen tengah bagian bawah, ketika diberikan tiga arah dapat dilihat pada **gambar 4.46** yaitu sebesar 180.700 MPa.

Kemudian untuk nilai regangan maksimum pada segmen tengah bagian bawah saat diberikan beban gempa dua arah, yaitu sebesar 0.000894 seperti dapat dilihat pada **gambar 4.24**. Sedangkan untuk nilai regangan maksimum pada segmen tengah bagian bawah ketika diberikan beban gempa tiga arah, yaitu sebesar 0.000903 seperti dapat dilihat pada **gambar 4.45**.

Dalam satu batang pada struktur jembatan tersebut dibagi menjadi lima elemen balok. Hal ini bertujuan agar mendapatkan nilai tegangan dan regangan yang lebih detail sehingga mendekati hasil yang mendekati kenyataan. Kemudian besarnya nilai tegangan dan regangan maksimum diambil dari nilai terbesar yang dihasilkan lima elemen tersebut dalam satu batang.

Di bawah ini merupakan **Gambar 4.67** yaitu grafik perbandingan hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian bawah (Batang dengan tegangan dan regangan yang maksimum) akibat beban gempa dua arah dan tiga arah. Dari hasil yang didapat terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan dari nilai tegangan dan regangan akibat beban gempa dua arah dan tiga arah. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai tegangan dan regangan maksimum yang tidak terlampau jauh.



Gambar 4.51 Grafik perbandingan hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah dan tiga arah

Dari hasil analisis numerik akibat beban gempa dua arah didapatkan tegangan maksimum terjadi pada batang segmen tengah bagian bawah sebesar 178.900000 MPa (178.900 MPa) dengan nilai regangan sebesar 0.000894, maka diperoleh nilai modulus elastisitas sebesar :

$$E = \frac{178900000}{\frac{0.000894}{1000000}} = 200111.857 \text{ MPa}$$

Sedangkan akibat beban gempa tiga arah didapatkan tegangan maksimum terjadi pada batang segmen tengah bagian bawah sebesar 180700000 Pa (180.700 MPa) dengan nilai regangan sebesar 0.000903, maka diperoleh nilai modulus elastisitas sebesar :

$$E = \frac{180700000}{\frac{0.000903}{1000000}} = 200110.742 \text{ MPa}$$

Berdasarkan hasil yang didapat, dapat dihitung nilai selisih presentase kapasitas struktur jembatan rangka tipe *K-Truss* dengan mutu tidak seragam akibat beban gempa dua arah dan tiga arah terhadap kapasitas struktur jembatan pada kondisi awal sebagai berikut :

$$\frac{(200111,8568 - 200110,7420)}{200111,8568} \times 100\% = 0.000557 \%$$

Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa pengaruh perencanaan jembatan rangka menggunakan beban gempa dua arah dan tiga arah terhadap kapasitas struktur jembatan pada kondisi awal adalah tidak signifikan. Karena berdasarkan hasil perhitungan presentase yang didapat di atas, setelah dilakukan peningkatan beban gempa dua arah menjadi tiga arah, didapat hasil penurunan kapasitas struktur jembatan sebesar 0,000557% dari kapasitas struktur jembatan pada kondisi awal. Hal tersebut menunjukkan bahwa perencanaan jembatan rangka menggunakan pembebanan dua arah sudah cukup memenuhi syarat.

4.6 Perbandingan Respon Struktur Jembatan dengan Mutu Seragam dan Tidak Seragam

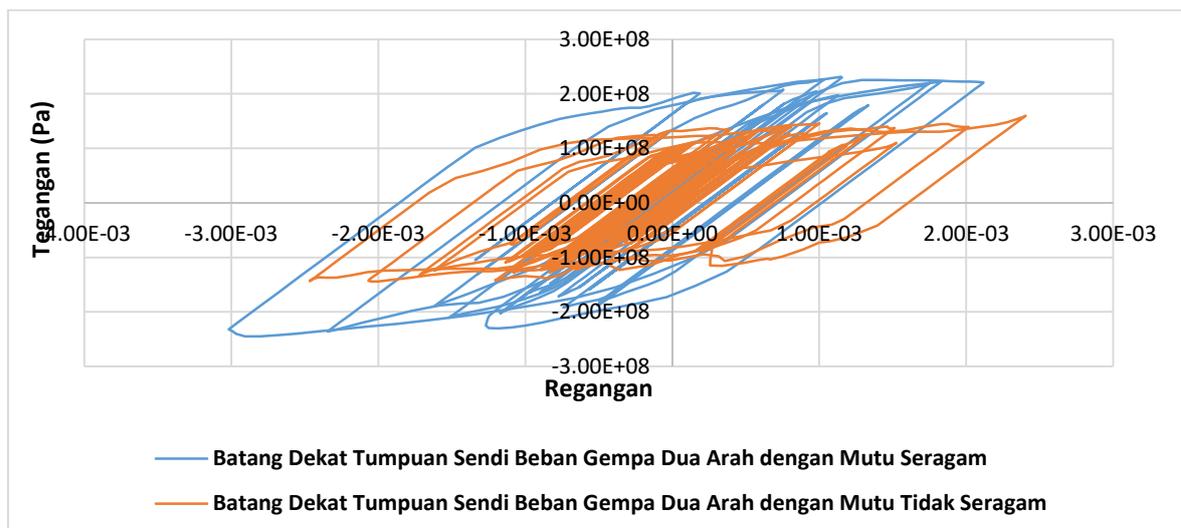
Kriteria dalam perencanaan struktur adalah apabila memenuhi syarat akan kekuatan, kekakuan dan daktilitas. Kekuatan berkaitan dengan besarnya tegangan yang mampu dipikul struktur tanpa mengalami kerusakan, baik deformasi (*yielding*) atau terpisah (*fracture*). Seperti telah dibahas sebelumnya, bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan dari nilai selisih presentase kapasitas struktur jembatan menggunakan beban gempa dua arah dan tiga arah. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan nilai modulus elastisitas yang didapat dengan membandingkan tegangan maksimum dan regangan maksimum pada batang tersebut. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa tidak terjadi presentase penurunan yang signifikan antara menggunakan beban gempa dua arah dengan tiga arah. Oleh karena itu, dalam pembahasan

ini digunakan beban gempa dua arah untuk membandingkan respon struktur jembatan dengan mutu seragam dan tidak seragam.

4.6.1 Batang Dekat Tumpuan Sendi

Di bawah ini merupakan **Gambar 4.52** yaitu kurva tegangan dan regangan batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam dan tidak seragam. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang dekat tumpuan sendi akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam sebesar 231.327 MPa. Dengan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.649 MPa pada batang dengan mutu seragam. Kemudian hasil analisis numerik dari batang dekat tumpuan sendi didapatkan nilai tegangan maksimum akibat beban gempa dua arah dengan mutu tidak seragam sebesar 159.700 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 141.404 MPa pada batang dengan mutu tidak seragam.

Jika ditinjau berdasarkan kondisi batang pada **Gambar 4.52**, menunjukkan bahwa batang dengan mutu baja seragam dan tidak seragam telah memasuki kondisi inelastis yang artinya nilai tegangan pada batang dekat tumpuan sendi tersebut telah melebihi batas tegangan leleh material pada kondisi awal, dimana batang mampu mengalami regangan hingga kondisi maksimum. Namun, dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa batang dekat tumpuan sendi dengan mutu seragam lebih kuat dalam menahan beban gempa dua arah dibandingkan dengan batang dekat tumpuan sendi dengan mutu tidak seragam. Hal ini dikarenakan pengaruh penggunaan keseragaman mutu yang digunakan dan juga memakai baja dengan mutu tinggi BJ-41.

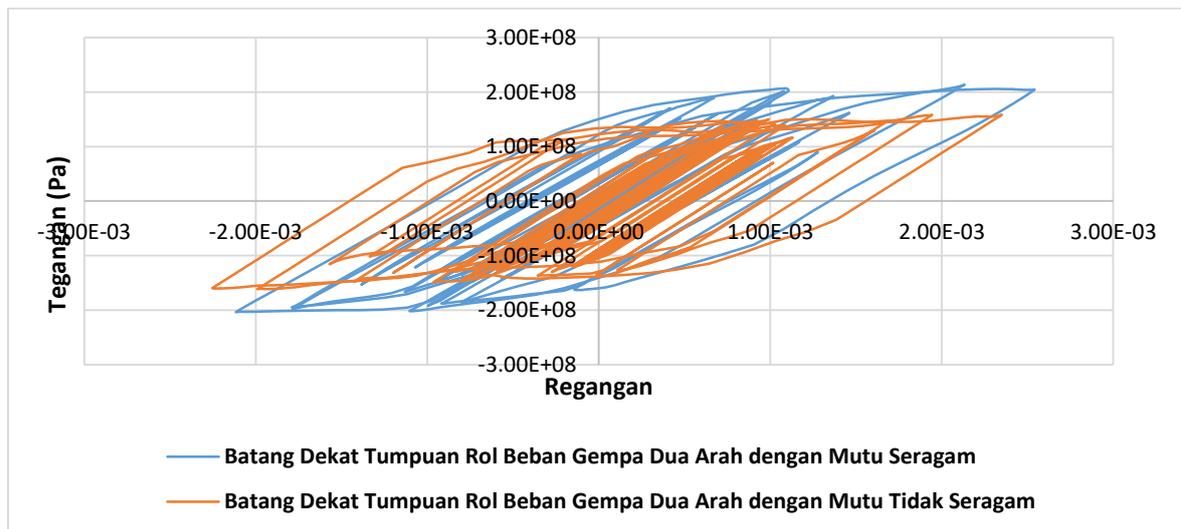


Gambar 4.52 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang sendi dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah

4.6.2 Batang Dekat Tumpuan Rol

Berikut ini merupakan **Gambar 4.53** yaitu kurva tegangan dan regangan batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam dan tidak seragam. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang dekat tumpuan rol akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam sebesar 213.259 MPa. Dengan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.649 MPa pada batang dengan mutu seragam. Kemudian hasil analisis numerik dari batang dekat tumpuan rol didapatkan nilai tegangan maksimum akibat beban gempa dua arah dengan mutu tidak seragam sebesar 161.600 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 141.404 MPa pada batang dengan mutu tidak seragam.

Jika ditinjau berdasarkan kondisi batang pada **Gambar 4.53**, menunjukkan bahwa batang dengan mutu baja seragam dan tidak seragam telah memasuki kondisi inelastis yang artinya nilai tegangan pada batang dekat tumpuan sendi tersebut telah melebihi batas tegangan leleh material pada kondisi awal, dimana batang mampu mengalami regangan hingga kondisi maksimum. Namun, dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa batang dekat tumpuan rol dengan mutu seragam lebih kuat dalam menahan beban gempa dua arah dibandingkan dengan batang dekat tumpuan rol dengan mutu tidak seragam. Hal ini dikarenakan pengaruh penggunaan keseragaman mutu yang digunakan dan juga memakai baja dengan mutu tinggi BJ-41.



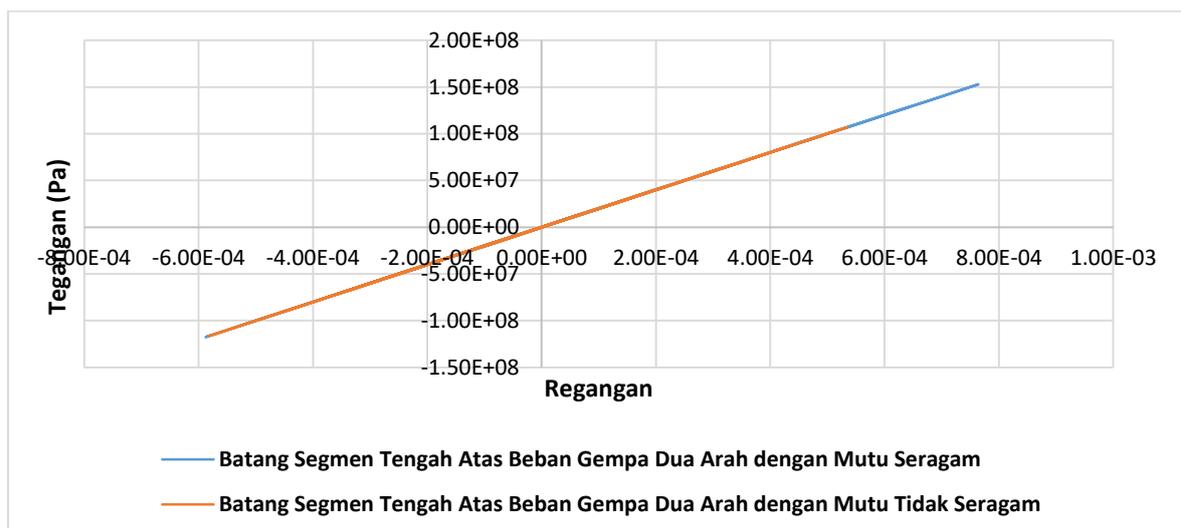
Gambar 4.53 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang rol dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah

4.6.3 Batang Segmen Tengah Atas

Berikutnya merupakan **Gambar 4.54** yaitu kurva tegangan dan regangan batang segmen tengah atas akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam dan tidak seragam. Dari hasil

analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang segmen tengah atas akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam sebesar 152.780 MPa. Dengan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.649 MPa pada batang dengan mutu seragam. Kemudian hasil analisis numerik dari batang segmen tengah atas didapat nilai tegangan maksimum akibat beban gempa dua arah dengan mutu tidak seragam sebesar 116.200 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.649 MPa pada batang dengan mutu tidak seragam.

Jika ditinjau berdasarkan kondisi batang, dari hasil menunjukkan bahwa batang dengan mutu baja seragam dan tidak seragam belum mengalami kondisi inelastis yang artinya tegangan pada batang segmen tengah atas yang menggunakan mutu baja seragam dan tidak seragam tersebut tidak melebihi batas tegangan leleh material pada kondisi awal (masih dalam kondisi elastis). Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa batang segmen tengah atas dengan mutu seragam dan tidak seragam sama-sama kuat dalam menahan beban gempa dua arah dikarenakan memakai baja dengan mutu tinggi BJ-41. Perbedaan yang dapat dilihat hanya dari nilai tegangan maksimum yang didapatkan dari analisis akibat penggunaan mutu baja seragam dan tidak seragam. Hal tersebut dikarenakan antar batang pada jembatan rangka bekerja saling berkaitan meskipun letaknya tidak berdekatan. Batang dengan mutu baja seragam akan menghasilkan nilai tegangan dengan hasil yang maksimal dibandingkan dengan batang dengan mutu yang tidak seragam karena adanya pengaruh dari baja mutu rendah terhadap baja mutu tinggi.



Gambar 4.54 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah atas dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah

4.6.4 Batang Segmen Tengah Bawah

Selanjutnya merupakan **Gambar 4.55** yaitu kurva tegangan dan regangan batang segmen tengah bawah akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam dan tidak seragam. Dari hasil analisis numerik didapatkan nilai tegangan maksimum dari batang segmen tengah bawah akibat beban gempa dua arah dengan mutu seragam sebesar 152.780 MPa. Dengan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.649 MPa pada batang dengan mutu seragam. Kemudian hasil analisis numerik dari batang segmen tengah bawah didapat nilai tegangan maksimum akibat beban gempa dua arah dengan mutu tidak seragam sebesar 178.900 MPa. Sedangkan tegangan leleh pada kondisi awal batang sebesar 342.649 MPa pada batang dengan mutu tidak seragam.

Jika ditinjau berdasarkan kondisi batang, dari hasil menunjukkan bahwa batang dengan mutu baja seragam dan tidak seragam belum mengalami kondisi inelastis yang artinya tegangan pada batang segmen tengah bawah yang menggunakan mutu baja seragam dan tidak seragam tersebut tidak melebihi batas tegangan leleh material pada kondisi awal (masih dalam kondisi elastis).

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa batang segmen tengah bawah dengan mutu seragam dan tidak seragam sama-sama kuat dalam menahan beban gempa dua arah dikarenakan memakai baja dengan mutu tinggi BJ-41.



Gambar 4.55 Grafik hubungan tegangan-regangan pada batang segmen tengah bawah dengan mutu seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis menggunakan software ABAQUS *Student Edition* dari model jembatan rangka tipe *K-Truss* K.H. Ahmad Fattah akibat beban gempa, maka didapatkan hasil sebagai berikut :

1. Pada bagian – bagian jembatan, yang mengalami keruntuhan akibat beban gempa dua arah dan tiga arah adalah batang dekat tumpuan sendi dan rol. Seluruh bagian – bagian jembatan memiliki penurunan kekakuan yang hampir sama, terlihat dari grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama yang memiliki kemiringan yang sama pada tiap – tiap bagian jembatan. Akibat bertambahnya arah gempa dari dua arah menjadi tiga arah mengakibatkan mengakibatkan penurunan modulus elastisitas jembatan sebesar 0.000557% dari modulus elastisitas pada kondisi struktur jembatan akibat beban gempa dua arah.
2. Ketika jembatan diberi beban gempa dua arah, batang yang mengalami daktilitas lebih tinggi adalah, batang dekat tumpuan sendi, terlihat jarak regangan leleh hingga regangan putus besarnya melebihi bagian – bagian jembatan yang lain sebesar 0.002209 sedangkan, ketika jembatan diberi beban gempa tiga arah, batang yang mengalami daktilitas lebih tinggi adalah batang dekat tumpuan sendi, terlihat jarak regangan leleh hingga regangan putus besarnya melebihi bagian – bagian jembatan yang lain sebesar 0.002227.

Dari besarnya persentase penurunan modulus elastisitas yang tidak begitu besar, dapat diambil kesimpulan bahwa analisis jembatan dengan menggunakan beban tiga arah tidak begitu berpengaruh besar sehingga cukup jika dianalisis menggunakan dua arah. Namun, Penggunaan mutu material baja yang tidak seragam pada struktur jembatan rangka tipe *K-Truss* mempengaruhi kekuatan yang mampu ditampung oleh struktur jembatan tersebut. Penggunaan mutu material baja yang tidak seragam menyebabkan terjadinya penurunan kekakuan yang cukup signifikan dibandingkan dengan mutu material yang seragam.

5.2 Saran

Saran yang bisa diberikan sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya, Dapat menggunakan konfigurasi jembatan rangka yang berbeda.
2. Pada analisis software selanjutnya, Ketika melakukan pemodelan benda uji (*create part*) pada *ABAQUS Student Edition* dapat dipilih bentuk dasar (*base feature*) berupa *shell* untuk mendapatkan hasil yang lebih detail.
3. *Time history* dapat diambil dari gempa yang terjadi di Indonesia, mengingat Indonesia juga merupakan negara yang rawan mengalami gempa.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaqus Analysis User's Manual 6.9*. Dassault Systems Simulia Corp., Providence. RI. USA.
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). *RSNI T-02-2005 Standar Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). *RSNI T-03-2005 Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-1726-2002 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-1729-2002 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Chen, W. & Duan, L. (2000). *Bridge Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- Dewobroto, Wiryanto. (2016). *Struktur Baja-Perilaku, Analisis dan Desain*, Edisi ke-2. Jakarta: Penerbit Jurusan Teknik Sipil UPH.
- Gere, J.M., Timoshenko. (1997). *Mekanika Bahan – Terjemahan Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Salim, A.A. (2018). *Studi Numerik dan Eksperimental Distribusi Tegangan-Regangan Baja*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Satyarno, I. (2003). *Analisis Struktur Jembatan*, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM. Yogyakarta.
- Setiawan, Agus. (2013). *Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD*. Jakarta: Erlangga
- Struyk, H.J. & Van der Veen, K.H.C.W. (1984). *Jembatan-Konstruksi*. Terjemahan Soemargono. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Supriadi, Bambang., Agus Setyo Muntohar. (2007). *Jembatan*. Cetakan Ke-4. Yogyakarta: Beta Offset.
- Supriatna, Lucky. Budiono, Bambang. (2011). *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa dengan Menggunakan SNI 03-1726-2002 dan RSNI 03-1726-201x*. Bandung: Penerbit ITB.
- Widodo. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Universitas Islam Indonesia Press.
- Wijaya, M.N., Susanti, L., Setyowulan, D. & Salim, A.A. (2017). *Effects of Using Lower Steel Grade on the Critical Members to the Seismic performance of Steel Truss Bridge Structures*. *IJCIET*. Vol. 8, No.10:948-955.

Wijaya, M.N., Susanti, L. & Setyowulan, D. (2017). *Pengaruh Keseragaman Mutu dan Modulus Elastisitas Baja Terhadap Kapasitas Struktur Jembatan Rangka Dalam Menahan Beban Gempa*. Hibah Peneliti Pemula.