

ANALISIS KAPASITAS STRUKTUR JEMBATAN RANGKA TIPE WARREN DENGAN MUTU BAJA TIDAK SERAGAM DALAM MENAHAN BEBAN GEMPA DUA ARAH DAN TIGA ARAH

(Structural Capacity Analysis of Warren Truss Bridge with Non-Uniform Steel Grade in Carrying Bi-Directional and Tri-Directional Earthquake Loads)

Muhammad Iqbal, Lilya Susanti, Desy Setyowulan

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan Mayjen Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

Email : iqbalbalmuh@yahoo.com

ABSTRAK

Dalam merencanakan struktur jembatan harus memperhitungkan secara detail dan akurat total beban yang akan dipikul oleh struktur jembatan, salah satunya adalah beban gempa. Beban gempa merupakan pembebanan pada struktur jembatan yang sifatnya tak terduga dan dapat terjadi di segala arah. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis jembatan rangka tipe warren akibat beban gempa secara dua arah dan tiga arah. Analisis dilakukan dengan menggunakan software ABAQUS Student Edition. Selain itu, dalam penelitian ini digunakan mutu yang tidak seragam pada material baja. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil pengaruh diantara keduanya terhadap kapasitas struktur jembatan. Output yang dihasilkan dalam analisis ini berupa besarnya nilai tegangan dan regangan tiap batang pada struktur jembatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa akibat beban gempa dua arah dan tiga arah tegangan maksimum berada pada batang segmen tengah bagian bawah. Nilai tegangan maksimum pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah sebesar 332.39312 MPa, sedangkan akibat beban gempa tiga arah tegangan maksimum pada batang segmen tengah bagian bawah sebesar 312.705536 MPa. Penggunaan beban gempa dua arah dan tiga arah pada struktur jembatan rangka tipe warren dengan mutu baja tidak seragam mengakibatkan terjadinya penurunan kekakuan pada tiap-tiap batang yang berkisar antara 5%-10%. Selain itu, penggunaan mutu material baja yang tidak seragam pada struktur jembatan rangka tipe warren menyebabkan terjadinya penurunan kekakuan yang cukup signifikan dibandingkan dengan mutu material yang seragam. Sehingga dapat mempengaruhi kekuatan yang mampu ditampung oleh struktur jembatan tersebut.

Kata kunci: jembatan rangka, tipe warren, metode riwayat waktu, beban gempa, dua arah, tiga arah, tegangan, regangan, kapasitas struktur, ABAQUS Student Edition.

ABSTRACT

In planning the structure of the bridge, detailed and accurate calculation of the total load that the bridge is going to withstand is importantly needed, including an earthquake loads. An earthquake loads is a load the bridge may withstand that could not be predicted and might happen in anyways. Therefore, this research deals with an analysis of warren truss bridge structure regarding bi-directional and tri-directional earthquake loads. The analysis was done by using ABAQUS Student Edition software. In addition, this research also focuses on the application of non-uniform steel grade. The purpose of this is that to get the effect of both actions toward the structural capacity of the bridge. The output of this research analysis is in form of the stress and strain value in every member of the bridge structure. The results show that due to the bi-directional and tri-directional earthquake loads, the maximum stress is in the bottom of the middle segment of the bridge. The maximum stress in the bottom of the middle segment due to the bi-directional earthquake load is 332.39312 MPa, whereas due to the tri-directional earthquake load, the

maximum stress is 312.705536 MPa. The use of bi-directional and tri-directional earthquake loads on warren truss structure with non-uniform steel grade, causing a decrease in stiffness in each member of the bridge structure that ranges from 5% -10%. In addition, the use of non-uniform steel material grade in the warren truss structure bridge, causing a significant decrease in stiffness, compared with the uniform steel material grade, which may affect the ability of the bridge to withstand earthquake loads.

Keywords: *structural bridge, warren type, time history method, earthquake loads, bi-directional, tri-directional, stress, strain, structure capacity, ABAQUS Student Edition.*

1.PENDAHULUAN

Secara umum, jembatan merupakan suatu konstruksi yang dibangun sebagai jalur transportasi untuk melintasi rintangan berupa sungai, danau, saluran irigasi, rawa, jurang, lembah serta raya yang melintang tidak sebidang (Struyk, 1995). Tidak hanya sebagai alat penghubung saja, jembatan juga mempunyai tujuan dan fungsi yang luas, baik dalam segi ekonomi, sosial budaya, politik dan pertahanan nasional.

Keberadaan jembatan di Indonesia terus mengalami perkembangan dari tahun ke tahun. Jembatan yang umumnya digunakan di Indonesia hingga saat ini adalah jembatan rangka baja. Jembatan rangka baja sendiri memiliki tipe yang beragam, salah satunya adalah tipe *warren*. Jembatan tipe ini memiliki bentuk rangka segitiga sama kaki atau sama sisi. Struktur rangka yang digunakan terdiri dari batang horizontal atas, batang horizontal bawah dan batang diagonal.

Mutu pada material baja berkaitan dengan kapasitas struktur yang mampu diterima oleh suatu jembatan. Mutu dan ukuran material baja sudah ditetapkan karena merupakan hasil dari proses fabrikasi. Di Indonesia, standar spesifikasi mutu dan ukuran material baja mengacu pada SNI (Standar Nasional Indonesia) yang telah diterbitkan oleh lembaga pemerintah. Namun, pada kenyataannya masih terdapat jenis baja yang tidak sesuai dengan standar yang telah ditetapkan, jenis baja ini biasanya dinamakan baja tidak teridentifikasi.

Sebuah jembatan sesungguhnya dirancang untuk mampu menahan 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. Tidak hanya itu, Indonesia merupakan daerah yang mempunyai tingkat resiko gempa yang cukup tinggi.

Penelitian ini merupakan analisis mengenai dampak gempa terhadap kekuatan struktur jembatan rangka tipe *warren*. Analisis yang dilakukan adalah analisis dinamis, karena merupakan analisa yang paling mendekati kenyataan sebenarnya di lapangan. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penggunaan material baja tidak terstandar terhadap kekuatan jembatan secara keseluruhan untuk memastikan keamanan jembatan rangka tersebut.

2.DASAR TEORI

2.1 Material Baja

Penggunaan material baja sebagai struktur jembatan akan memberikan keuntungan yang berlebih terhadap perkembangan serta kelancaran sarana transportasi di Indonesia. Keunggulan dari material baja itu sendiri sebagai berikut (Agus Setiawan, 2013), antara lain baja memiliki kekuatan yang tinggi, keseragaman dan keawetan yang tinggi, baja bersifat elastis dan baja mempunyai daktilitas yang cukup tinggi.

Tegangan

Tegangan adalah besaran pengukuran intensitas gaya (F) atau reaksi dalam yang timbul per satuan luas (A). Apabila terjadi tegangan secara merata pada luasan (A) dan

tegangan () bernilai konstan, maka persamaan yang digunakan menurut Singer (1995), adalah:

$$= \frac{F_n}{A}$$

Dimana:

= Tegangan (kN/mm²).

F_n = Gaya yang bekerja (kN).

A = Luas penampang (mm²).

Tegangan menurut Marciniak dkk. (2002) dibedakan menjadi dua yaitu, *engineering stress* dan *true stress*. *Engineering stress* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0}$$

Dimana:

σ_{eng} = *Engineering stress* (MPa).

F = Gaya (N).

A₀ = Luas permukaan awal (mm²).

Sedangkan *true stress* adalah tegangan hasil pengukuran intensitas gaya reaksi yang dibagi dengan luas permukaan sebenarnya. *True stress* dapat dihitung dengan:

$$= \frac{F}{A}$$

Dimana:

= *True stress* (MPa).

F = Gaya (N).

A = Luas permukaan sebenarnya (mm²).

Regangan

Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan () yaitu dengan membagi perpanjangan (L- L₀) dengan panjang material mula-mula (L₀). Hal ini sesuai dengan pernyataan Singer (1995) yaitu:

$$= \frac{(L-L_0)}{L_0}$$

Dimana:

= Regangan.

(L- L₀) = Perubahan panjang (m).

L₀ = Panjang awal (m).

Menurut

Marciniak dkk. (2002) regangandibedakan menjadidua, yaitu:

engineering strain dan *true strain*. *Engineering strain* adalah regangan yang dihitung menurut dimensi benda aslinya (panjang

awal). Sehingga untuk mengetahui besarnya regangan yang terjadi adalah dengan membagi perpanjangan dengan panjang semula.

$$\epsilon_{eng} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\%$$

Dimana

ϵ_{eng} = *Engineering strain*.

l = Perubahan panjang.

L₀ = Panjang mula-mula.

L = Panjang setelah diberi gaya.

True strain regangan yang dihitung secara bertahap (*increment strain*), dimana regangan dihitung pada kondisi dimensi benda saat itu (sebenarnya) dan bukan dihitung

berdasarkan panjang awal dimensi benda. Maka persamaan

regangan untuk *true strain* () adalah:

$$= \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

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. Kekakuan adalah besarnya gaya untuk menghasilkan satu unit deformasi, parameternya berupa modulus elastisitas. Daktilitas terkait dengan besarnya deformasi sebelum keruntuhan (*failure*) terjadi. Properti mekanik beberapa bahan material konstruksi adalah sebagai berikut:

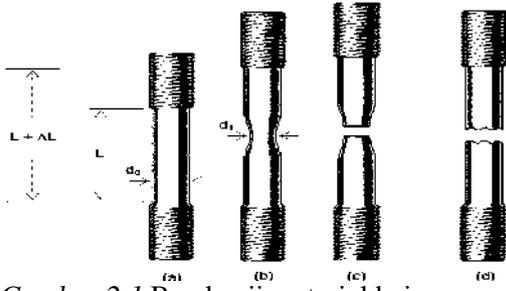
Tabel 2.1

Properti Mekanik Beberapa Bahan Material Konstruksi

Material	Berat Jenis (kg/m ³)	Modulus Elastisitas (MPa)	Kuat (MPa)		Rasio Kuat ÷ BJ (1E+6 ÷ L/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
Aluminium	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

*Rittironk dan Elnieiri (2008).

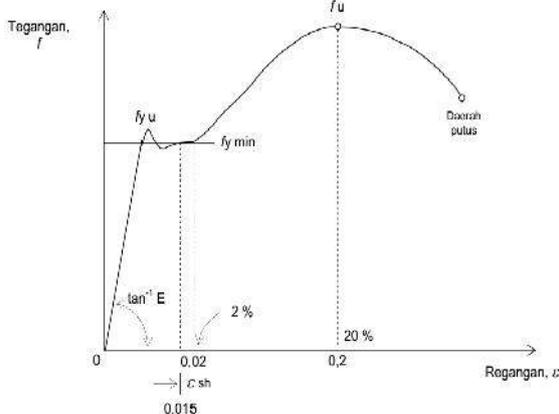
Model pengujian yang paling tepat untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik dari material baja adalah dengan melakukan uji tarik terhadap suatu benda uji baja. Hal ini dikarenakan, uji tekan tidak dapat memberikan data yang akurat terhadap sifat-sifat mekanik material baja.



Gambar 2.1 Benda uji material baja.

(b dan c) bersifat liat (*ductile*), (d) bersifat rapuh/getas (*brittle*).

Tegangan merupakan perbandingan antara gaya dengan luas penampang (f/A) yang terjadi dalam benda uji akan diplot pada sumbu vertikal, sedangkan regangan (ϵ) yang merupakan perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula ($\Delta L/L$) akan diplot pada sumbu horizontal.



Gambar 2.2 Kurva hubungan tegangan (f) dan regangan (ϵ)

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
DJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

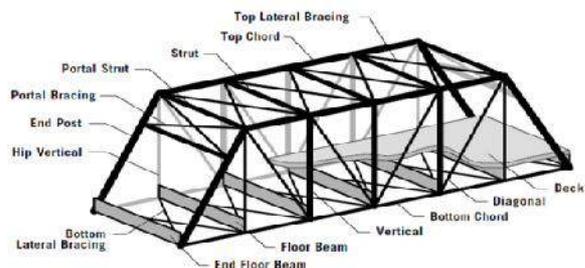
Sumber: SNI 03-1729-2002 (2002)

2.2 Jembatan

Menurut Struyck dan Van Der Veen (1984), jembatan merupakan sebuah struktur yang dibangun melewati suatu rintangan yang berada lebih rendah. Rintangan-rintangan tersebut dapat berupa sungai, danau, saluran irigasi, rawa, jurang, lembah serta raya yang melintang tidak sebidang.

Jembatan Rangka (*Truss Bridge*)

Jembatan rangka (*truss bridge*) merupakan jembatan yang mempunyai bentuk struktur rangka pada sistem konstruksinya. Jembatan rangka menggunakan material baja sebagai penyusun utama strukturnya. Jadi, jembatan rangka tersusun atas member-member baja, dimana antar member-member baja tersebut dihubungkan untuk membentuk suatu ikatan yang kokoh. Member-member adalah komponen yang menahan beban sebuah struktur.



Gambar 2.3 Komponen-komponen jembatan rangka.

Sumber: Ressler (2001).

Jembatan Rangka tipe “K-Truss”

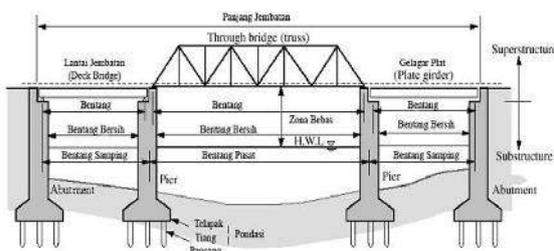
Keunggulan dari jembatan rangka tipe ini adalah mampu mengurangi tekanan pada member atau batang vertikal serta memungkinkan dapat mengurangi penggunaan material baja dan biaya konstruksi jika didesain dengan efisien. Sedangkan, kelemahan dari jembatan rangka tipe ini adalah sedikit rumit dalam merangkai struktur jembatannya. Selain itu, meningkatkan volume konstruksi karena ada member rangka tambahan dan juga jembatan ini mempunyai berat struktur yang cukup berat.

Jembatan Rangka tipe Warren

Keunggulan dari jembatan rangka tipe ini adalah mampu digunakan untuk struktur dengan bentang panjang serta desain yang cukup sederhana pada struktur rangkanya menjadikan jembatan tipe ini memiliki berat yang relatif ringan. Selain itu, penyaluran beban-beban yang merata antar member-member rangka bajanya. Sedangkan, kelemahan dari jembatan rangka tipe ini adalah tidak bisa bekerja dengan baik jika beban yang diberikan terpusat. Selain itu, biaya konstruksi yang cukup banyak dikarenakan penambahan rangka.

Bagian-Bagian Struktur Jembatan Rangka

Struktur jembatan secara umum dibedakan menjadi dua bagian, yaitu bangunan atas (*super structure*) dan bangunan bawah (*sub structure*).



Gambar 2.4 Bagian-bagian konstruksi jembatan rangka.

Sumber: Chen dan Duan (2000).

Bangunan atas (*super structure*) merupakan struktur yang berhubungan langsung dengan beban-beban lalu lintas yang bekerja. Sedangkan, bangunan bawah (*sub structure*) merupakan struktur yang menerima beban-beban dari bangunan atas dan meneruskannya ke lapisan pendukung (tanah keras) di bawahnya.

Pembebanan Struktur Jembatan

Pembangunan jembatan pada dasarnya direncanakan untuk mampu menahan berbagai macam beban. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan dan perkiraan yang sangat detail dan akurat. Salah satunya adalah 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.

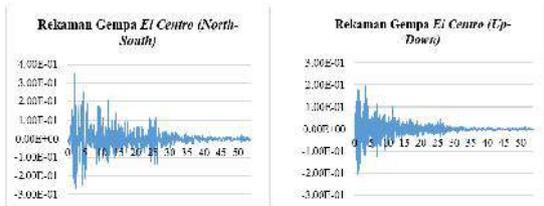
2.3 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran atau guncangan yang terjadi di permukaan bumi (Schodek, 1999). Gempa bumi dapat terjadi akibat adanya pelepasan energi yang secara tiba-tiba dari pusat gempa. Energi yang dilepaskan tersebut kemudian merambat melalui tanah dalam bentuk gelombang. Dikarenakan gelombang tersebut mempunyai suatu energi, maka dapat menyebabkan permukaan bumi dan bangunan di atasnya menjadi bergetar. Getaran ini nantinya akan menimbulkan gaya-gaya pada struktur bangunan karena struktur cenderung mempunyai gaya untuk mempertahankan dirinya dari gerakan.

2.4 Analisis Dinamis

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 2.5 Contoh rekaman gempa El Centro di California

Sumber: El Centro (1979)

Analisa Nilai Eigen

Analisa nilai eigen menghasilkan bentuk ragam getaran bebas tanpa redaman dan frekuensi dari sistem. Dari ragam getaran tersebut bisa dilihat perilaku suatu struktur ketika mengalami gaya gempa.

Prinsip Riwayat Waktu

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 diluar lokasi jembatan. Gerakan gempa masukan berupa gelombang akselerasi dengan amplitudo yang dimodifikasi berdasarkan wilayah frekuensi (*frequency zone*) sehingga sesuai akselerasi standar respon spektra.

2.5 Software ABAQUS

Software ABAQUS merupakan penyedia program yang dapat memodelkan benda yang akan dianalisis dalam bentuk CAE. Program tersebut berfungsi sebagai desain model yang kekuatan dari materialnya

dapat dimasukkan dari data-data material yang ada. Seperti berbagai program komputer yang ada di pasaran, software ABAQUS memiliki CAD/CAM/CAE yang berfungsi sebagai program untuk analisis elastis dan plastis. Keunggulan ABAQUS dibandingkan dengan program lainnya yang sejenis adalah menu yang ada pada ABAQUS lengkap pada *part modulnya*.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Data Jembatan

Data umum jembatan yang menjadi objek dalam analisis adalah sebagai berikut:

Jembatan: Jembatan Rangka Jalan Soekarno-Hatta.

Lokasi : Kota Malang, Provinsi Jawa Timur.

Kelas : Kelas I.

Fungsi : Jalan Raya.



Gambar 3.1 Jembatan rangka Soekarno-Hatta, Malang

Sumber: www.malangvoice.com

Data Teknis Jembatan

Jembatan rangka yang menjadi fokus penelitian ini adalah bentang 60 meter, dengan data sebagai berikut:

Bentang: 60 m.

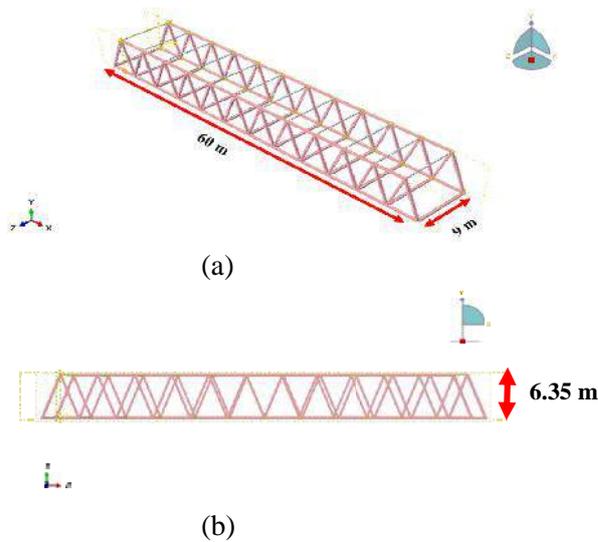
Lebar : 9 m.

Tinggi : 6.35 m.

Material : Baja.

Tumpuan : Sendi-rol.

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

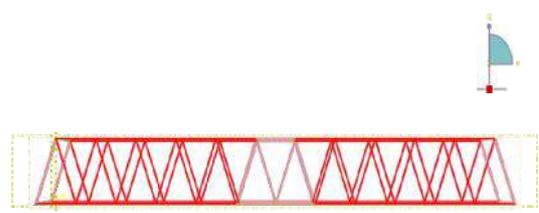


Gambar 3.2 (a), (b) dan (c) Layout jembatan tipe warren pada software ABAQUS Student Edition

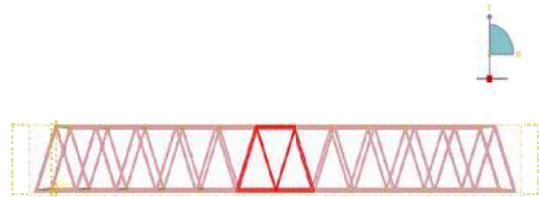
Tabel 3.1
Dimensi Profil Baja Model Jembatan Rangka Tipe Warren

No.	Bagian Struktur	Dimensi Profil
1.	Rangka Utama	WF 400.300.145.15
2.	Rangka Utama Tepi (Dekat Tumpuan)	WF 400.350.170.10
3.	Balok Melintang Atas	WF 200.150.6.9
4.	Balok Melintang Bawah	WF 400.300.145.15

Dimensi dan profil baja yang digunakan mengadopsi dari desain jembatan rangka eksisting yang ada di Malang, yaitu Jembatan Soekarno-Hatta. Namun beberapa dimensi profil yang tidak diketahui dilakukan asumsi pendekatan. Analisis dilakukan dengan menggunakan desain mutu material struktur baja yang tidak seragam.



Gambar 3.3 Bagian jembatan dengan mutu baja BJ-37



Gambar 3.4 Bagian jembatan dengan mutu baja BJ-41

Pada lima bentang-bentang dari ujung sisi kanan dan kiri rangka utama jembatan menggunakan mutu dan modulus elastisitas baja BJ-37. Sementara itu, dua bentang tengah rangka utama jembatan menggunakan mutu dan modulus elastisitas baja BJ-41.

Berikut ini adalah spesifikasi material pada model jembatan rangka tipe warren.

Tabel 3.2
Spesifikasi Material pada Model Jembatan Rangka Tipe Warren

Spesifikasi	Mutu BJ-37	Mutu BJ-41
Modulus Elastisitas (MPa)	199582	200000
Rasio Poisson	0.3	0.3
True Stress (MPa)	Tabel 3.4	Tabel 3.3
True Strain (MPa)	Tabel 3.4	Tabel 3.3
Density (kg/m ³)	7850	7850

3.2 Analisis Nilai Eigen

Dalam analisis ini, jembatan terlebih dahulu dibagi menjadi 10 bagian. Kemudian dilakukan analisis nilai eigen sehingga mendapatkan dua nilai *mode shape* terbesar. Kemudian melakukan perhitungan koefisien dan dengan menggunakan rumus sebagai berikut ini:

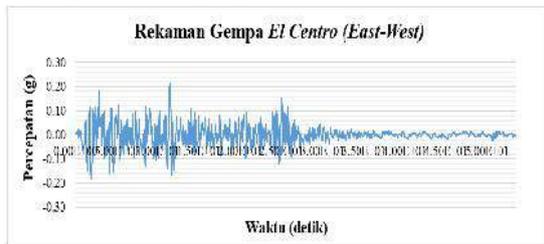
$$r = \frac{.2 \cdot \tilde{S}_1 \tilde{S}_2}{\tilde{S}_1 + \tilde{S}_2}$$

$$S = \frac{2}{\xi_1 + \xi_2}$$

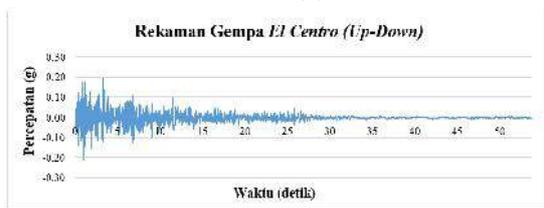
Dimana untuk frame baja digunakan $\xi = 2\%$

3.3 Analisis Dinamis

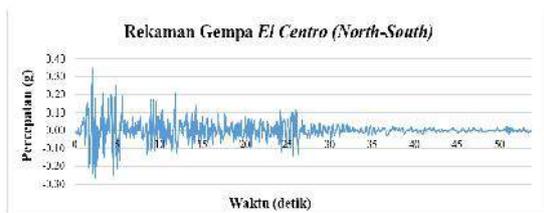
Analisis dinamis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah analisis riwayat waktu (*time history analysis*). Pada analisis ini, digunakan data gempa yang berupa percepatan dan waktu. Data gempa didapatkan dari data gempa El Centro pada tahun 1979 di California. Beban gempa yang digunakan akan diperbesar hingga jembatan mengalami keruntuhan untuk mengetahui tegangan dan regangan maksimum jembatan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.5 Rekaman gempa El Centro (1979) di California (a) Gempa arah East-West, (b) Gempa arah Up-Down, (c) Gempa arah North-South

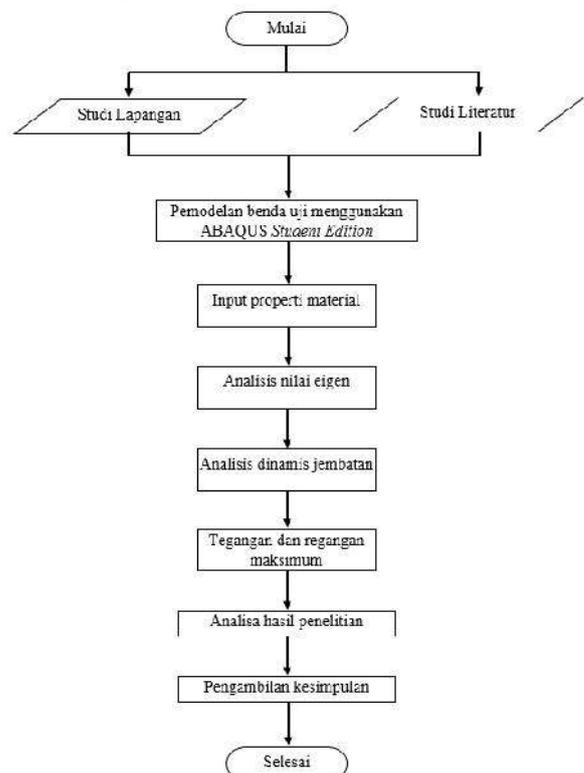
3.4 Metode Penelitian

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

1. Menentukan topik yang akan digunakan untuk penelitian.

2. Studi lapangan dan literatur. Penulis melakukan studi lapangan dan literatur sebagai dasar teori untuk menganalisis permasalahan. Selain itu, studi lapangan juga digunakan sebagai pemodelan struktur jembatan yang kemudian akan dianalisis lebih lanjut pada *software* ABAQUS *Student Edition*.
3. Melakukan pembuatan model jembatan rangka ke dalam *software* ABAQUS *Student Edition*.
4. Memasukkan input data *property* berupa material, profil dan *section assignment* 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 3.6.



Gambar 3.6 Diagram alir penelitian

3.5 Pemodelan dengan Software ABAQUS

- 1. Pemodelan Benda Uji (*Create Part*).**
Langkah pertama adalah menentukan sistem satuan yang akan digunakan, karena dalam memasukkan data pada ABAQUS *Student Edition* diperlukan satuan yang konsisten dan spesifik. Kemudian memodelkan benda uji dengan membuat koordinat-koordinat. Setelah itu, digabungkan hingga terbentuk jembatan rangka yang akan digunakan (tipe *warren*).
- 2. Memasukkan Data Property.**
Jembatan rangka yang telah terbentuk dimasukkan data berupa material, profil dan *section assignment*.
- 3. Input Tumpuan.**
Tumpuan yang digunakan untuk menganalisis benda uji berjumlah 4, yaitu 2 sendi dan 2 roll.
- 4. Assembly.**
Langkah *assembly* merupakan modul untuk menggabungkan part-part menjadi satu bentuk atau model.
- 5. Meshing.**
Jembatan 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.**
Analisis eigen akan didapatkan frekuensi natural (f) yang merupakan bahan untuk mencari nilai α () dan β (). Kemudian dianalisis dengan data *time history*.
- 7. Memasukkan Beban Berat Struktur dan Beban Gempa pada ABAQUS Student Edition.**
- 8. Menentukan Output.**
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

Output yang didapatkan yaitu tegangan, regangan, reaksi tumpuan dan perpindahan. Sehingga dapat diketahui kinerja model struktur jembatan rangka yang diuji.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulasi Numerik Jembatan Rangka Tipe Warren

Terlebih dahulu harus dilakukan analisis nilai eigen. Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai *damping ratio* sebagai input analisis dinamis struktur. Analisis nilai eigen juga menghasilkan data periode alami dan rasio massa efektif. Hasil tersebut didapatkan dari setiap mode yang dominan, kemudian dianalisis untuk mengetahui karakteristik dinamis yang utama pada struktur jembatan. Rasio massa efektif yang maksimum pada sumbu X, Y, dan Z akan berpengaruh terhadap posisi dari periode alami struktur.

Tabel 4.1 di bawah merupakan hasil perhitungan analisis nilai eigen. Berdasarkan tabel dibawah ini menggambarkan frekuensi alami, periode alami dan rasio massa efektif pada setiap mode yang dominan.

Tabel 4.1
Hasil Analisis Eigen pada Struktur Jembatan Rangka

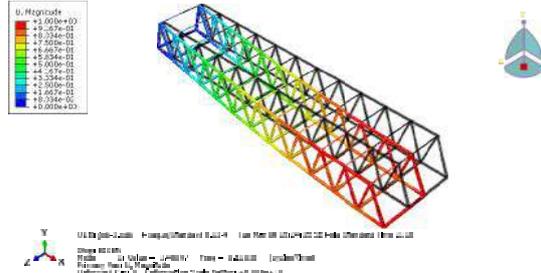
Mode	Frekuensi		T (sec)	Rasio Massa Efektif (%)		
	f (Hz)	$\omega = 2\pi f$ (rad/sec)		X	Y	Z
1	0.110	0.694	9.060	0.00	0.00	84.00
2	0.310	1.948	3.225	0.00	0.00	10.63
3	0.494	3.105	2.023	0.00	0.00	0.89
4	0.546	3.428	1.835	0.00	0.00	1.73
5	0.732	4.599	1.366	0.00	0.00	0.07
6	0.845	5.297	1.186	0.00	0.00	1.62
7	1.090	6.847	0.918	0.00	0.00	0.04
8	1.247	7.855	0.802	0.00	0.00	0.99
9	1.420	8.921	0.704	100.00	100.00	0.00
10	1.536	9.652	0.651	0.00	0.00	0.02

Dari hasil mode yang dominan, maka didapatkan koefisien dan sebagai berikut:

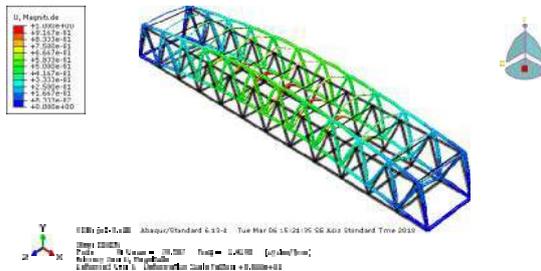
$$r = 0.02 \times 2 \times \frac{0.694 \times 8.921}{0.694 + 8.921} = 0.0258$$

$$s = 0.02 \times \frac{2}{0.694 + 8.921} = 0.0042$$

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

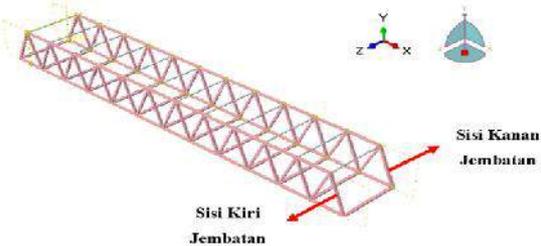


Gambar 4.1 Bentuk mode 1 jembatan rangka



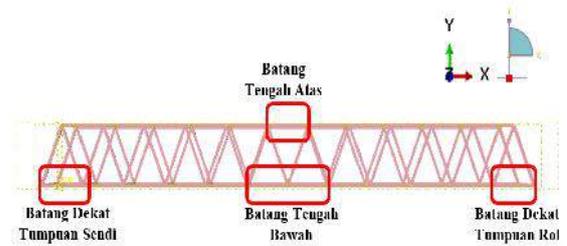
Gambar 4.2 Bentuk mode 9 jembatan rangka

Untuk mengetahui riwayat kurva tegangan dan regangan dari awal pembebanan hingga 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 4.3**.



Gambar 4.3 Sisi kanan dan sisi kiri jembatan

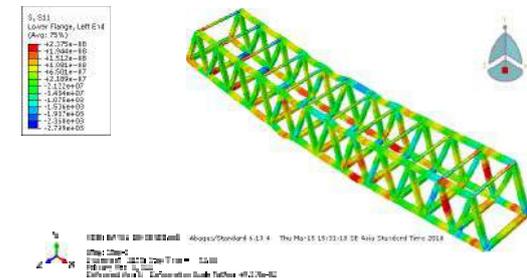
Setiap sisi jembatan dibagi menjadi lima bagian, antara lain batang dekat tumpuan sendi, batang dekat tumpuan rol, batang tengah bawah, batang tengah atas dan batang pembeding dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.



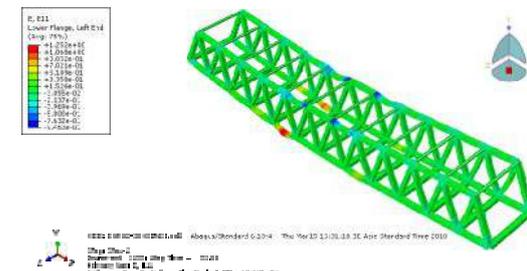
Gambar 4.4 Pembagian tiap batang pada struktur jembatan rangka

4.2 Respon Struktur Akibat Beban Gempa Dua Arah

Keadaan arah gempa utara-selatan (*north-south*) merupakan beban gempa pada arah jembatan sumbu X dan arah gempa timur-barat (*east-west*) merupakan beban gempa pada arah jembatan sumbu Z. Dimana keadaan tersebut merupakan keadaan saat jembatan mengalami efek terbesar akibat adanya beban gempa. Keadaan tersebut diterapkan pada tumpuan sendi, sedangkan pada tumpuan rol keadaan arah gempa timur-barat (*east-west*) saja yang diberikan pada arah jembatan sumbu Z.

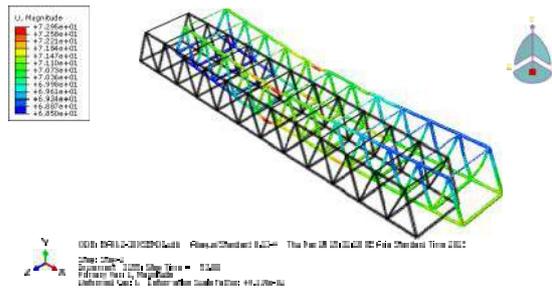


Gambar 4.5 Distribusi tegangan aksial akibat beban gempa dua arah



Gambar 4.6 Distribusi regangan aksial akibat beban gempa dua arah

Displacement akan dilihat baik dari arah X, Y, maupun Z. U1 menunjukkan nilai *displacement* pada arah X, U2 menunjukkan nilai *displacement* pada arah Y, serta U3 menunjukkan nilai *displacement* pada arah Z.



Gambar 4.7 Displacement akibat beban gempa dua arah

Hasil analisis numerik menunjukkan nilai tegangan dan regangan maksimum pada tiap batang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

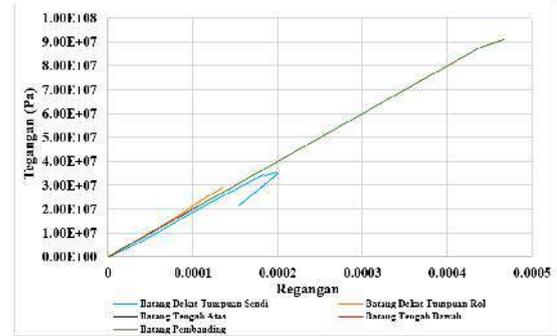
Tabel 4.2

Rekapitulasi Nilai Tegangan dan Regangan Maksimum Akibat Beban Gempa Dua Arah

No.	Nama Batang	Tegangan Maksimum (MPa)	Keterangan Tegangan	Regangan Maksimum	Keterangan Regangan
1.	Batang Dekat Tumpuan Sendi	240.503024	Tegangan Tarik	0.0249	Regangan Tarik
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	228.907728	Tegangan Tarik	0.0359	Regangan Tarik
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	288.315	Tegangan Tekan	0.00157614	Regangan Tekan
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	332.39312	Tegangan Tarik	0.002125	Regangan Tarik
5.	Batang Pembending	240.503024	Tegangan Tarik	0.478	Regangan Tarik

Berdasarkan tabel di atas, diperoleh hasil analisis dari model jembatan rangka tipe warren akibat beban gempa dua arah menggunakan software ABAQUS Student Edition berupa tegangan maksimum terdapat pada batang segmen tengah bagian bawah, yaitu sebesar 332.39312 MPa, yang merupakan tegangan tarik. Sedangkan, regangan maksimum terdapat pada batang pembending. Dimana nilai regangan maksimum pada batang pembending sebesar 0.478 yang merupakan regangan tarik.

Perbandingan Tegangan dan Regangan antar Batang yang Ditinjau



Gambar 4.8 Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama akibat beban gempa dua arah

Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat batang segmen tengah bagian atas dan batang segmen tengah bagian bawah mempunyai kecondongan garis yang saling berimpit satu sama lain. Sehingga tidak terlihat secara jelas. Hal ini menunjukkan bahwa kedua batang tersebut mempunyai kekakuan yang sama.

Berbeda dengan ketiga batang lainnya, yaitu batang dekat tumpuan sendi, batang dekat tumpuan rol dan batang pembending. Dimana ketiga batang tersebut merupakan batang yang paling condong. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga batang tersebut tidak lebih kaku jika dibandingkan dengan batang segmen tengah bagian atas dan bawah.

Tabel 4.3

Rekapitulasi Nilai Tegangan, Regangan dan Modulus Elastisitas Tiap Batang

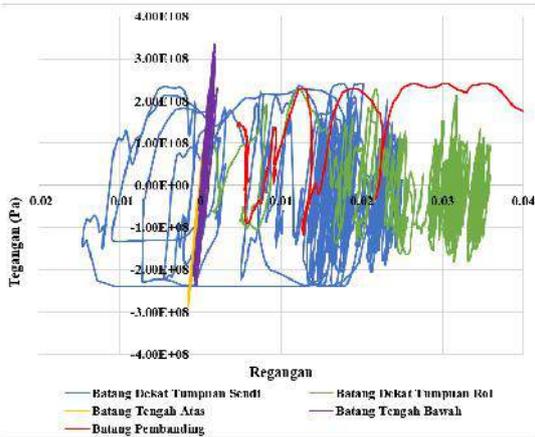
No.	Nama Batang	Tegangan (MPa)	Regangan	Modulus Elastisitas (Pa)	Modulus Elastisitas (MPa)
1.	Batang Dekat Tumpuan Sendi	82.132	0.000989809	82977624980	82977.62
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	18.6277	0.000671539	27738820830	27738.82
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	151.701	0.00075850	200601318391.56	200601.32
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	202.121	0.00101060	200600989511.18	200600.99
5.	Batang Pembending	88.6495	0.00591654	1498333485	14983.33

Dapat dilihat pada Tabel 4.3 diatas, bahwa pengaruh terbesar adanya beban gempa dua arah terhadap elastisitas atau kekakuan terdapat pada batang pembending dengan nilai sebesar 14983.33 MPa. Apabila dipresentasikan besarnya penurunan modulus

elastisitas pada batang pembanding akibat adanya beban gempa dua arah adalah sebesar 92.4926%. **Tabel 4.4** dibawah ini menunjukkan, besarnya penurunan modulus elastisitas (kekakuan) pada tiap-tiap batang akibat adanya beban gempa dua arah.

Tabel 4.4
Presentase Penurunan Modulus Elastisitas Tiap Batang

No.	Nama Batang	Tegangan (MPa)	Regangan	Modulus Elastisitas (MPa)	Modulus Elastisitas (Seharusnya) (MPa)	Presentase Penurunan
1.	Batang Dekat Tumpuan Sendi	82.132	0.0009898	82977.62	199582	58.4243%
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	18.6277	0.0006715	27738.82	199582	86.1015%
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	151.701	0.0007585	200000	200000	0%
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	202.121	0.0010105	200000	200000	0%
5.	Batang Pembanding	88.6492	0.0009165	14983.33	199582	92.4926%



Gambar 4.9 Perbandingan grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau akibat beban gempa dua arah

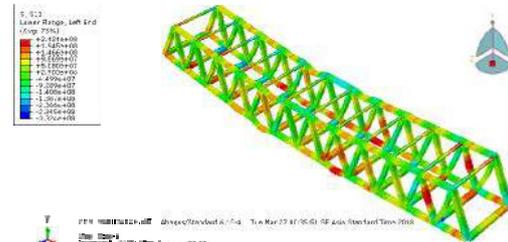
Daktilitas merupakan kemampuan material mengalami deformasi (meregang) yang besar akibat dari pengaruh tegangan tarik tanpa hancur atau putus. Hasil perhitungan didapatkan, selisih regangan paling besar terdapat pada batang pembanding sebesar 0.47207436. Hal ini menunjukkan bahwa batang pembanding mempunyai tingkat daktilitas material yang tinggi dibandingkan dengan batang yang lain.

Tabel 4.5
Rekapitulasi Selisih Nilai Regangan Tiap Batang

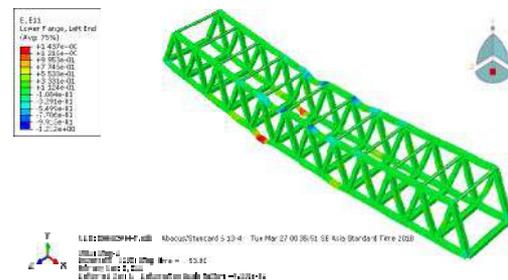
No.	Nama Batang	Regangan Lelah	Regangan Maksimum	Selisih Regangan
1.	Batang Dekat Tumpuan Sendi	0.000989809	0.0249445	0.023954691
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	0.000671539	0.035892	0.035220461
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	0.0007585	0.0015761	0.0008176
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	0.0010106	0.0021249	0.0011143
5.	Batang Pembanding	0.00091654	0.4779909	0.47207436

4.3 Respon Struktur Akibat Beban Gempa Tiga Arah

Keadaan arah gempa utara-selatan (*north-south*) merupakan beban gempa pada arah jembatan sumbu X dan arah gempa atas-bawah (*up-down*) merupakan beban gempa pada arah jembatan sumbu Y. Kemudian untuk arah gempa timur-barat (*east-west*) merupakan beban gempa pada arah jembatan sumbu Z. Dimana keadaan tersebut merupakan keadaan saat jembatan mengalami efek terbesar akibat adanya beban gempa. Keadaan tersebut diterapkan pada tumpuan sendi. Sedangkan pada tumpuan rol keadaan arah gempa atas-bawah (*up-down*) diberikan pada arah jembatan sumbu Y dan arah gempa timur-barat (*east-west*) diberikan pada arah jembatan sumbu Z.



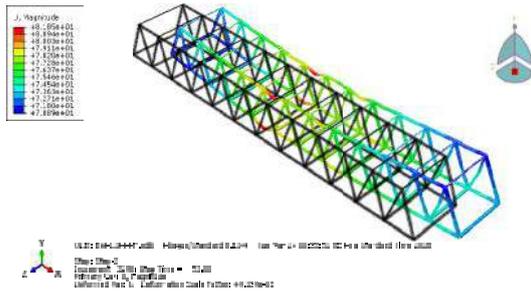
Gambar 4.10 Distribusi tegangan aksial akibat beban gempa tiga arah



Gambar 4.11 Distribusi regangan aksial akibat beban gempa tiga arah

Displacement akan dilihat baik dari arah X, Y, maupun Z. U1 menunjukkan nilai *displacement* pada arah X, U2 menunjukkan

nilai *displacement* pada arah Y, serta U3 menunjukkan nilai *displacement* pada arah Z.



Gambar 4.12 *Displacement* akibat beban gempa tiga arah

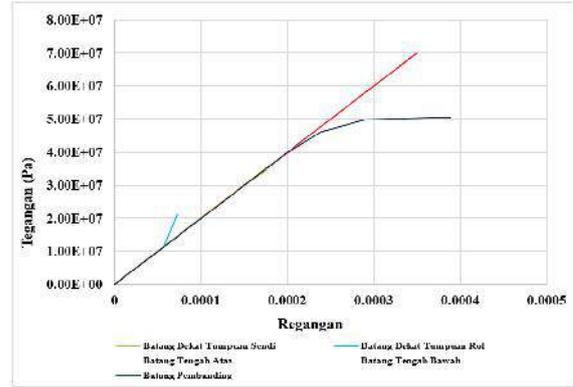
Hasil analisis numerik menunjukkan nilai tegangan dan regangan maksimum pada tiap batang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6
Rekapitulasi Nilai Tegangan dan Regangan Maksimum Akibat Beban Gempa Tiga Arah

No.	Nama Batang	Tegangan Maksimum (MPa)	Keterangan Tegangan	Regangan Maksimum	Keterangan Regangan
1.	Batang Dekat Tumpuan Sandi	240.503024	Tegangan Tarik	0.0225	Regangan Tarik
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	233.696304	Tegangan Tarik	0.0142	Regangan Tekan
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	273.831392	Tegangan Tekan	0.001587	Regangan Tekan
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	312.705536	Tegangan Tarik	0.0021307	Regangan Tarik
5.	Batang Pembanding	240.503024	Tegangan Tarik	0.5328211	Regangan Tarik

Berdasarkan tabel di atas, diperoleh hasil analisis dari model jembatan rangka tipe *warren* akibat beban gempa tiga arah menggunakan *software* ABAQUS *Student Edition* berupa tegangan maksimum terdapat pada batang segmen tengah bagian bawah, yaitu sebesar 312.705536 MPa, yang merupakan tegangan tarik. Sedangkan, regangan maksimum terdapat pada batang pembanding. Dimana nilai regangan maksimum pada batang pembanding sebesar 0.5328211 yang merupakan regangan tarik.

Perbandingan Tegangan dan Regangan antar Batang yang Ditinjau



Gambar 4.13 Grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau pada seperempat siklus pertama akibat beban gempa tiga arah

Terlihat pada Gambar 4.13 di atas, bahwa tiap-tiap bagian jembatan memiliki kemiringan atau kecondongan garis yang hampir sama pada seperempat siklus pertama grafik hubungan tegangan-regangan. Dapat dilihat bahwa grafik tiap batang saling berhimpit satu dengan yang lainnya. Hanya terdapat sedikit perbedaan kemiringan yang tidak seberapa signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi penurunan kekakuan yang signifikan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.7 di bawah ini:

Tabel 4.7
Rekapitulasi Nilai Tegangan, Regangan dan Modulus Elastisitas Tiap Batang

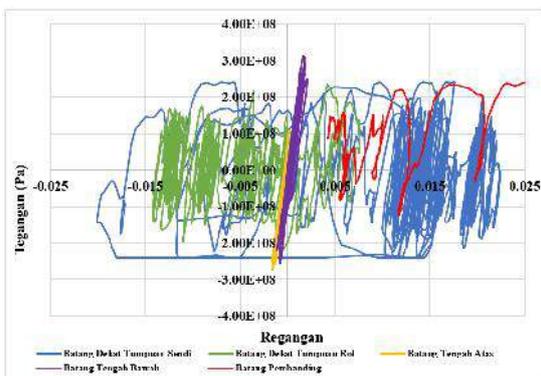
No.	Nama Batang	Tegangan (MPa)	Regangan	Modulus Elastisitas (Pa)	Modulus Elastisitas (MPa)
1.	Batang Dekat Tumpuan Sandi	82.2786	0.000933093	83693607828	83693.60783
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	20.191	0.000393137	51358686666	51358.68667
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	95.7364	0.000478682	200000000000	200000
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	145.621	0.000728107	200000000000	200000
5.	Batang Pembanding	135.639	0.0045246	29794660469	29794.6604

Penurunan modulus elastisitas (kekakuan) paling besar akibat adanya beban gempa tiga arah terdapat pada batang pembanding dengan nilai sebesar 29794.6604 MPa. Apabila dipresentasikan besarnya penurunan modulus elastisitas pada batang pembanding akibat adanya beban gempa tiga arah adalah sebesar 85.0715%. Hal ini

menunjukkan bahwa batang mengalami penurunan kekakuan akibat adanya beban gempa tiga arah. **Tabel 4.8** dibawah ini menunjukkan, besarnya penurunan modulus elastisitas pada tiap-tiap batang akibat adanya beban gempa tiga arah.

Tabel 4.8
Presentase Penurunan Modulus Elastisitas Tiap Batang

No.	Nama Batang	Tegangan (MPa)	Regangan	Modulus Elastisitas (MPa)	Modulus Elastisitas (Scharusnya) (MPa)	Modulus Elastisitas (Scharusnya) (%)
1.	Batang Dekat Tumpuan Sendi	82.2786	0.0009831	83693.608	199582	58.0656%
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	20.191	0.0003931	51358.687	199582	74.2669%
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	95.7367	0.000787	200000	200000	0%
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	145.621	0.0007281	200000	200000	0%
5.	Batang Perbandingan	135.639	0.0045525	29794.650	199582	85.0715%



Gambar 4.14 Perbandingan grafik hubungan tegangan-regangan antar batang yang ditinjau akibat beban gempa tiga arah

Daktilitas merupakan kemampuan material mengalami deformasi (meregang) yang besar akibat dari pengaruh tegangan tarik tanpa hancur atau putus. Hasil perhitungan didapatkan, selisih regangan paling besar terdapat pada batang perbandingan sebesar 0.5283. Hal ini menunjukkan bahwa batang perbandingan mempunyai tingkat daktilitas material yang tinggi dibandingkan dengan batang yang lain.

Tabel 4.9
Rekapitulasi Selisih Nilai Regangan Tiap Batang

No.	Nama Batang	Regangan Leleh	Regangan Maksimum	Selisih Regangan
1.	Batang Dekat Tumpuan Sendi	0.000983093	0.022484	0.021500907
2.	Batang Dekat Tumpuan Rol	0.000393137	0.0141765	0.013783363
3.	Batang Segmen Tengah Bagian Atas	0.000478682	0.001587	0.001108318
4.	Batang Segmen Tengah Bagian Bawah	0.000728107	0.0021307	0.001402593
5.	Batang Perbandingan	0.00455246	0.5328211	0.52826864

Berdasarkan data diatas, didapatkan tegangan maksimum akibat beban gempa dua arah terdapat pada batang segmen tengah bagian bawah sebesar 332.39312 MPa dan tegangan maksimum akibat beban gempa tiga arah sebesar 312.705536 MPa. Oleh karena itu, dapat dihitung nilai presentase selisih modulus elastisitas pada batang segmen tengah bagian bawah struktur jembatan rangka tipe warren dengan mutu tidak seragam akibat beban gempa dua arah dan tiga arah terhadap modulus elastisitas struktur jembatan akibat beban gempa dua arah sebagai berikut:

$$\frac{(156420.29 - 146761.88)}{156420.29} \times 100\% = 6.1747\%$$

Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa peningkatan beban gempa dua arah menjadi beban gempa tiga arah mengakibatkan terjadinya penurunan terhadap modulus elastisitas struktur jembatan rangka tipe warren sebesar 6.1747% dari modulus elastisitas jembatan akibat beban gempa dua arah.

4.4 Perbandingan Respon Struktur Jembatan dengan Mutu Seragam dan Tidak Seragam Akibat Beban Gempa Dua Arah

Hasil tegangan dan regangan maksimum pada tiap-tiap batang dengan menggunakan mutu seragam dan tidak seragam, maka dapat diketahui nilai modulus elastisitas tiap-tiap batang. Selanjutnya dapat dipresentasikan penurunan modulus elastisitas tersebut terhadap modulus elastisitas awal batang.

Oleh karena itu, dapat dihitung nilai presentase selisih modulus elastisitas pada batang segmen tengah bagian bawah struktur jembatan rangka tipe warren dengan mutu

seragam dan tidak seragam akibat beban gempa dua arah terhadap modulus elastisitas pada batang segmen tengah bagian bawah dengan mutu seragam sebagai berikut:

$$\frac{(199990.3132 - 156420.29)}{199990.3132} \times 100\% = 21.79\%$$

Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa dari penggunaan mutu material baja seragam menjadi tidak seragam pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah menyebabkan penurunan modulus elastisitas sebesar 21.79% dari modulus elastisitas pada batang segmen tengah bagian bawah dengan mutu baja seragam.

Berdasarkan hasil perhitungan presentase diatas, menunjukkan bahwa penggunaan mutu tidak seragam mempengaruhi kekuatan yang mampu ditampung oleh struktur jembatan tersebut.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis dari model jembatan rangka tipe *warren* akibat beban gempa dua arah dan tiga arah dengan mutu baja yang tidak seragam menggunakan *software ABAQUS Student Edition*, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas yang mampu dipikul oleh struktur jembatan rangka tipe *warren* dengan mutu baja yang tidak seragam dalam menahan beban gempa dua arah dan tiga arah didasarkan pada nilai tegangan maksimum. Dimana akibat beban gempa dua arah diperoleh tegangan maksimum terdapat pada batang segmen tengah bagian bawah sebesar 332.39312 MPa. Sedangkan, akibat beban gempa tiga arah diperoleh tegangan maksimum terdapat pada batang segmen tengah bagian bawah sebesar 312.705536 MPa.

Penggunaan beban gempa dua arah dan tiga arah pada struktur jembatan rangka tipe *warren* dengan mutu baja tidak

seragam mengakibatkan terjadinya penurunan kekakuan pada tiap-tiap batang yang berkisar antara 5%-10%. Berdasarkan nilai tegangan maksimum, peningkatan beban gempa dua arah menjadi beban gempa tiga arah mengakibatkan terjadinya penurunan terhadap modulus elastisitas struktur jembatan rangka tipe *warren* sebesar 6.1747% dari modulus elastisitas jembatan akibat beban gempa dua arah.

Penggunaan mutu material baja seragam menjadi tidak seragam pada batang segmen tengah bagian bawah akibat beban gempa dua arah menyebabkan penurunan modulus elastisitas sebesar 21.79% dari modulus elastisitas pada batang segmen tengah bagian bawah dengan mutu baja seragam. Presentase tersebut menunjukkan bahwa, penggunaan mutu material baja yang tidak seragam pada struktur jembatan rangka tipe *warren* 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.

2. Batang pembanding merupakan batang yang memiliki tingkat daktilitas yang paling tinggi dibandingkan dengan batang lainnya, baik akibat beban gempa dua arah maupun tiga arah. Terlihat akibat beban gempa dua arah, jarak regangan leleh hingga regangan putus besarnya melebihi batang jembatan yang lain sebesar 0.4721. Begitu juga, akibat beban gempa tiga arah, jarak regangan leleh hingga regangan putus besarnya melebihi batang jembatan yang lain sebesar 0.5283.

5.2 Saran

1. Dapat menggunakan konfigurasi jembatan rangka maupun jenis jembatan yang berbeda pada analisis selanjutnya.

2. Pada analisis selanjutnya, dalam 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 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.