



TUGAS AKHIR TF 141581

ANALISIS PERFORMANSI JEMBATAN RANGKA BAJA TIPE WARREN AKIBAT VARIASI BEBAN BERJALAN

Dhias Pratama Lazuarfy
NRP 2412 100 022

Dosen Pembimbing
Ir. Yerri Susatio, M.T.
Endah Wahyuni, S.T.,M.Sc.,Ph.D.

(Teknik Fisika ITS)
(Teknik Sipil ITS)

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT TF 141581

***PERFORMANCE ANALYSIS OF
WARREN TRUSS BRIDGE
DUE TO VARIATED MOVING LOAD***

Dhias Pratama Lazuarfy
NRP 2412 100 022

Adviser

Ir. Yerri Susatio, M.T.
Endah Wahyuni, S.T.,M.Sc.,Ph.D.

(Engineering Physics ITS)
(Civil Engineering ITS)

Engineering Physics Department
Faculty of Industrial Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

**LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS PERFORMANSI
JEMBATAN RANGKA BAJA TIPE WARREN
AKIBAT VARIASI BEBAN BERJALAN**

**TUGAS AKHIR
Oleh:**

**Dhias Pratama Lazuarfy
NRP : 2412 100 022**

Surabaya, Januari 2017

Pembimbing I

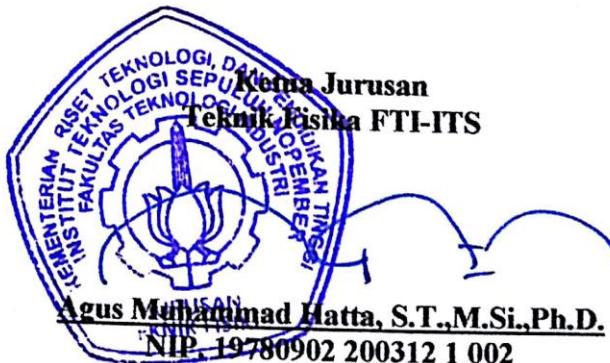


**Ir. Yerri Susanto, M.T.
NIP. 19541017198003 1 005**

Pembimbing II



**Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 19700201 199512 2 001**



**ANALISIS PERFORMANSI
JEMBATAN RANGKA BAJA TIPE WARREN
AKIBAT VARIASI BEBAN BERJALAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Vibrasi dan Akustik
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

DHIAS PRATAMA LAZUARFY
NRP : 2412 100 022

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Yerri Susatio, M.T. .....(Pembimbing I)
2. Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D. .....(Pembimbing II)
3. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc. .....(Ketua Penguji)
4. Dr. Dhany Arifianto, ST., M.Eng. .....(Penguji)
5. Ir. Tutug Dhanardono, M.T. .....(Penguji)

SURABAYA
Januari 2017

ANALISIS PERFORMANSI JEMBATAN RANGKA BAJA TIPE WARREN AKIBAT VARIASI BEBAN BERJALAN

Nama Mahasiswa : Dhias Pratama Lazuarfy
NRP : 2412100022
Jurusan : Teknik Fisika FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yerri Susatio, M.T.
Endah Wahyuni, S.T.,M.Sc.,Ph.D.

ABSTRAK

Jembatan merupakan infrastruktur vital dalam sistem transportasi, yaitu sebagai media penyeberangan sungai, maupun penghubung antar-tebing. Jembatan di berbagai negara mengalami penuaan secara cepat, kerusakan struktural ini diakibatkan oleh perubahan karakteristik beban dan gaya acak pada jembatan. Oleh karena itu dilakukan analisis terhadap jembatan *truss* yang paling umum di Indonesia, yaitu tipe Warren. Validasi matematis dan simulasi Ansys pada *beam*, *truss*, dan *modal analysis* menghasilkan nilai yang hampir mendekati, dengan *error* maksimum berturut-turut sebesar 0,72%, 1,078%, dan 0,35%. Setelah melakukan verifikasi kelayakan statis, diperoleh deformasi maksimum adalah 44,965 mm, dan tegangan maksimum adalah 134,32 MPa. Dengan demikian, jembatan ini sudah memenuhi kelayakan SNI. Pada simulasi dinamis, digunakan variasi jumlah kendaraan sebanyak 1, 2, 4, 6, 8, 10, dan 12 truk dengan kecepatan 5, 10, 20 m/s. Dari analisis modal, diperoleh frekuensi 2,6172 Hz sebagai frekuensi yang paling berpotensi mengguncang jembatan. Hasil simulasi dinamis menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum sebesar 0,4401 MPa terjadi pada beban 12 truk berkecepatan 5 m/s. Akselerasi maksimum ($767,97 \text{ mm/s}^2$) dan rata-rata ($82,42 \text{ mm/s}^2$) yang terbesar terjadi pada beban 12 truk berkecepatan 20 m/s. Hampir seluruh variasi menghasilkan nilai frekuensi jembatan yang jauh dari frekuensi natural, kecuali pada 2 truk berkecepatan 10 m/s yang menghasilkan frekuensi 2,641 Hz.

Kata kunci : beban berjalan, ansys, warren truss, AASHTO

**PERFORMANCE ANALYSIS OF
WARREN TRUSS BRIDGE
DUE TO VARIATED MOVING LOAD**

Name of student : Dhias Pratama Lazuarfy
NRP : 2412100022
Department : Teknik Fisika FTI – ITS
Adviser : Ir. Yerri Susatio, M.T.
Endah Wahyuni, S.T.,M.Sc.,Ph.D.

ABSTRACT

Bridge is the main infrastructure of transportation system, widely known as connector between rivers and cliffs. National bridges have been aged rapidly, this structural damage is caused by variated load characteristic and random forces on bridges. In that case, we conduct an analysis to the most used truss bridges type in Indonesia, Warren Truss. Validation of mathematical and simulation method on beams, trusses, and modal analysis gives similar results, with maximum error 0,72%, 1,078%, and 0,35%, consecutively. In static verification, it's known that maximum deformation is 44,965 mm and maximum combined stress is 134,32 MPa. From that result, we can conclude that this bridge is appropriate to National Standards of Indonesia. In dynamic simulations, we used variated number of trucks from 1, 2, 4, 6,8, 10, and 12 trucks, and variaated speed of 5, 10, and 20 m/s. From modal analysis, the natural frequency is 2,6172 Hz. Dynamic simulation showed the maximum stress of 0,4401 MPa is happened on 12 trucks with 5 m/s speed. Maximum acceleration ($767,97 \text{ mm/s}^2$) and average acceleration ($82,42 \text{ mm/s}^2$) is happened on 12 trucks with 20 m/s speed. Almost all variations generate frequencies that dissimilar to naural frequency, except on 2 trucks with 10 m/s speed which generates 2,641Hz.

Keywords : *moving load, ansys, warren truss, AASHTO*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **“Analisis Performansi Jembatan Rangka Baja Tipe Warren akibat Variasi Beban Berjalan”**.

Dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Agus M. Hatta, ST, M.Si., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc. selaku Kepala Laboratorium Vibrasi dan Akustik yang telah memfasilitasi kegiatan tugas akhir di semester ini.
3. Bapak Ir. Yerri Susatio, M.T. selaku pembimbing yang sangat sabar dan menyejukkan.
4. Ibu Endah Wahyuni, S.T.,M.Sc.,Ph.D. yang dengan senang hati membimbing mahasiswa awam di dunia sipil.
5. Bapak Dr. Dhany Arifianto, ST., M.Eng. dan Ir. Tutug Dhanardono, M.T. selaku anggota penguji yang memberikan kritik dan saran yang membangun.
6. Bapak Detak Yan Pratama, ST, M.Sc. selaku dosen wali saya.
7. Teman-teman seperjuangan TA di bidang minat Vibrasi dan Akustik, terutama Paklek dan Taufan “ndang nyusul rek”.
8. Teman-teman vibrastic 2012 yang sudah/hampir melepas status mahasiswanya, Ainun, Qomar, Ranti, Saptian, Ayuek, Nenni, Nita, Reva, Sucy, Amron.
9. Mas Farid, Fardan, dan Ayuek yang memberikan *finishing touch*, sehingga laporan ini bisa selesai pada waktunya.
10. Adek-adek dan mbak-mbak team vibrastic yang menuh-menuhin lab dengan hebohnya.
11. Keluarga di Sidoarjo, maaf jadi jarang pulang gara-gara TA hehe.

12. Semua pihak yang berjasa namun tidak bisa disebutkan satu persatu.

Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna perbaikan laporan kerja praktek ini. Semoga laporan ini bermanfaat bagi kita semua. Terakhir, sedikit cuplikan dari hymne ITS yang memberikan semangat bagi penulis untuk terus maju “Melangkah ke arah tujuan dengan tekadmu yang teguh. Menuju kesejahteraan bangsa dan umat manusia” dan sebuah salam yang mempersatukan Mahasiswa Teknik Fisika ITS.

Vivat TF! Vivat Solidarity! Together Forever!

Surabaya, 24 Januari 2017
Penulis,

Dhias Pratama Lazuarfy
2412100022

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar pengesahan	iii
Abstrak.....	v
Abstract.....	vi
Kata Pengantar.....	vii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel.....	xviii
BAB I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat	3
BAB II Tinjauan Pustaka	5
2.1 <i>Beam</i>	5
2.2 Jenis-jenis <i>Beam</i>	6
2.3 Pemodelan Beban.....	7
2.4 Matriks Kekakuan <i>Beam</i> dan <i>Truss</i>	9
2.5 Jembatan Rangka	10
BAB III Metodologi.....	13
3.1 Pengumpulan Data Dimensi dan Struktur Jembatan	14
3.1.1 Dimensi Jembatan.....	14
3.1.2 Struktur Jembatan	16
3.2 Desain Awal Jembatan Rangka Baja Tipe Warren	18
3.2.1 <i>Engineering Data</i>	18
3.2.2 <i>Design Modeler</i>	21
3.3 Penentuan Beban berdasarkan SNI	21
3.3.1 Beban Garis Terpusat	22
3.3.2 Beban Terbagi Rata	22

3.4	Pemodelan dan Analisis Struktur	22
3.4.1	Pemodelan Struktur	22
3.4.2	Analisis Struktur	25
3.5	Verifikasi Kelayakan Jembatan mengacu pada SNI	26
3.6	<i>Modal Analysis</i>	22
3.7	Pemberian Beban Berjalan Bervariasi.....	27
3.7.1	Desain Roda.....	27
BAB IV	Analisis Data dan Pembahasan	31
4.1	Validasi <i>Finite Element Method</i> dan Ansys	31
4.1.1	Validasi <i>Beam</i>	31
4.1.2	Validasi <i>Truss</i>	35
4.1.3	Validasi <i>Modal Analysis</i>	45
4.2	Verifikasi Kelayakan Jembatan menurut SNI	49
4.2.1	Verifikasi Kelayakan Jembatan berdasarkan Lendutan Maksimum	49
4.2.2	Verifikasi Kelayakan Jembatan berdasarkan Tegangan Maksimum	51
4.3	<i>Modal Analysis</i>	52
4.4	Respon Jembatan dengan 1 Truk Berjalan	53
4.4.1	1 Truk berkecepatan 5 m/s.....	53
4.4.2	1 Truk berkecepatan 10 m/s.....	55
4.4.3	1 Truk berkecepatan 20 m/s.....	56
4.5	Respon Jembatan dengan 2 Truk Berjalan	57
4.5.1	2 Truk berkecepatan 5 m/s.....	57
4.5.2	2 Truk berkecepatan 10 m/s.....	59
4.5.3	2 Truk berkecepatan 20 m/s.....	60
4.6	Respon Jembatan dengan 4 Truk Berjalan	61
4.6.1	4 Truk berkecepatan 5 m/s.....	61
4.6.2	4 Truk berkecepatan 10 m/s.....	63
4.6.3	4 Truk berkecepatan 20 m/s.....	64
4.7	Respon Jembatan dengan 6 Truk Berjalan	65
4.7.1	6 Truk berkecepatan 5 m/s.....	65
4.7.2	6 Truk berkecepatan 10 m/s.....	66
4.7.3	6 Truk berkecepatan 20 m/s.....	68

4.8 Respon Jembatan dengan 8 Truk Berjalan	69
4.8.1 8 Truk berkecepatan 5 m/s.....	69
4.8.2 8 Truk berkecepatan 10 m/s.....	70
4.8.3 8 Truk berkecepatan 20 m/s.....	71
4.9 Respon Jembatan dengan 10 Truk Berjalan	73
4.9.1 10 Truk berkecepatan 5 m/s.....	73
4.9.2 10 Truk berkecepatan 10 m/s.....	74
4.9.3 10 Truk berkecepatan 20 m/s.....	75
4.10 Respon Jembatan dengan 12 Truk Berjalan	76
4.10.1 12 Truk berkecepatan 5 m/s.....	76
4.10.2 12 Truk berkecepatan 10 m/s.....	78
4.10.3 12 Truk berkecepatan 20 m/s.....	79
4.11 Pembahasan Tegangan, Akselerasi, dan Frekuensi	80
4.11.1 Tegangan Maksimum	80
4.11.2 Akselerasi Maksimum dan Rata-Rata.....	81
4.11.3 Frekuensi Dominan.....	82
BAB V Penutup	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	85
Daftar Pustaka.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Representasi Skematik dari beam yang terkena defleksi planar.....	5
Gambar 2.2	Defleksi yang terjadi pada <i>beam</i> dengan batas kondisi khusus (a) <i>Beam</i> dengan penyangga sederhana (b) <i>Beam</i> dengan batas bergeser..	6
Gambar 2.3	Jenis-jenis kondisi dari kombinasi batas <i>beam</i> (a) beam dengan penyangga sederhana (b) <i>beam cantilever</i> (c) <i>beam</i> dengan penyangga bergeser.....	7
Gambar 2.4	Berbagai macam konsep muatan truk disertai detail beban muatan masing-masing sumbu.....	8
Gambar 2.5	Geometri (tampak samping) Truk kelas H dan HS sesuai standar	8
Gambar 2.6	Geometri (tampak belakang) Truk kelas H dan HS sesuai standar	9
Gambar 2.7	Gaya-gaya yang bekerja pada <i>beam</i>	10
Gambar 2.8	Bagian-bagian jembatan rangka	11
Gambar 2.9	Jenis-jenis <i>cross-section</i> rangka baja.....	11
Gambar 2.10	Geometri jembatan rangka yang telah umum digunakan	12
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.....	14
Gambar 3.2	Tampak samping jembatan.....	15
Gambar 3.3	Tampak atas jembatan	15
Gambar 3.4	Tampak depan jembatan.....	15
Gambar 3.5	Spesifikasi baja bentuk H.....	16
Gambar 3.6	Spesifikasi baja bentuk L.....	17
Gambar 3.7	<i>Outline</i> simulasi Ansys.....	18
Gambar 3.8	<i>Properties</i> dari material beton/ <i>concrete</i> ...	19
Gambar 3.9	<i>Properties</i> dari material baja/ <i>steel</i>	20
Gambar 3.10	Desain 3D jembatan	21

Gambar 3.11	Skema beban garis terpusat (BGT) dan beban terbagi rata (BTR).....	21
Gambar 3.12	Sambungan <i>contacts-bonded</i>	22
Gambar 3.13	Sambungan <i>joints-revolute</i>	23
Gambar 3.14	Tampilan 3D jembatan setelah <i>meshing</i> ...	23
Gambar 3.15	Peletakan titik <i>support</i> /pondasi	24
Gambar 3.16	Peletakan beban garis terpusat.....	24
Gambar 3.17	Peletakan beban terbagi rata.....	25
Gambar 3.18	Deformasi total yang dialami jembatan....	25
Gambar 3.19	Tegangan total yang dialami baja.....	26
Gambar 3.20	Detail geometri roda.....	27
Gambar 3.21	Desain geometri roda pada Ansys	27
Gambar 3.22	Tampilan 3 dimensi roda.....	28
Gambar 3.23	Tampilan 3 dimensi roda dalam keadaan penuh sesak.....	28
Gambar 3.24	Perhitungan massa jenis roda untuk simulasi.....	29
Gambar 4.1	Contoh <i>beam</i> yang dikenai gaya vertikal.....	31
Gambar 4.2	Simulasi <i>beam</i> yang dikenai gaya vertikal.....	32
Gambar 4.3	<i>Displacement</i> node 2 pada simulasi Ansys	33
Gambar 4.4	Gaya reaksi node 1 pada simulasi Ansys	33
Gambar 4.5	Momen gaya node 1 pada simulasi Ansys	34
Gambar 4.6	Contoh <i>truss</i> yang dikenai gaya vertikal dan horizontal	35
Gambar 4.7	Simulasi <i>truss</i> yang dikenai gaya vertikal dan horizontal.....	40
Gambar 4.8	<i>Displacement</i> q3 pada simulasi Ansys	40
Gambar 4.9	<i>Displacement</i> q5 pada simulasi Ansys	41
Gambar 4.10	<i>Displacement</i> q6 pada simulasi Ansys	41

Gambar 4.11	<i>Stress</i> elemen 2 dan 1 pada simulasi Ansys	42
Gambar 4.12	Reaksi tumpuan R1 pada simulasi Ansys	42
Gambar 4.13	Reaksi tumpuan R2 pada simulasi Ansys	43
Gambar 4.14	Reaksi tumpuan R4 pada simulasi Ansys	41
Gambar 4.15	Reaksi tumpuan R7 pada simulasi Ansys	44
Gambar 4.16	Reaksi tumpuan R8 pada simulasi Ansys	44
Gambar 4.17	Contoh <i>circular beam</i>	45
Gambar 4.18	Deformasi mode-1 pada Ansys	47
Gambar 4.19	Deformasi mode-3 pada Ansys	47
Gambar 4.20	Deformasi mode-5 pada Ansys	48
Gambar 4.21	Deformasi mode-7 pada Ansys	48
Gambar 4.22	Deformasi mode-9 pada Ansys	48
Gambar 4.23	Deformasi total yang dialami jembatan	50
Gambar 4.24	Hasil deformasi total dan deformasi arah Y	50
Gambar 4.25	Tegangan kombinasi maksimum yang dialami baja	51
Gambar 4.26	Hasil tegangan pada baja	52
Gambar 4.27	Guncangan yang terjadi pada mode-15	53
Gambar 4.28	Tegangan jembatan 1 truk, 5 m/s	54
Gambar 4.29	Deformasi jembatan 1 truk, 5 m/s	54
Gambar 4.30	Akselerasi jembatan 1 truk, 5 m/s	54
Gambar 4.31	Frekuensi jembatan 1 truk, 5 m/s	54
Gambar 4.32	Tegangan jembatan 1 truk, 10 m/s	55
Gambar 4.33	Deformasi jembatan 1 truk, 10 m/s	55
Gambar 4.34	Akselerasi jembatan 1 truk, 10 m/s	55
Gambar 4.35	Frekuensi jembatan 1 truk, 10 m/s	56
Gambar 4.36	Tegangan jembatan 1 truk, 20 m/s	56
Gambar 4.37	Deformasi jembatan 1 truk, 20 m/s	56

Gambar 4.38	Akselerasi jembatan 1 truk, 20 m/s	57
Gambar 4.39	Frekuensi jembatan 1 truk, 20 m/s.....	57
Gambar 4.40	Tegangan jembatan 2 truk, 5 m/s.....	57
Gambar 4.41	Deformasi jembatan 2 truk, 5 m/s	58
Gambar 4.42	Akselerasi jembatan 2 truk, 5 m/s	58
Gambar 4.43	Frekuensi jembatan 2 truk, 5 m/s.....	58
Gambar 4.44	Tegangan jembatan 2 truk, 10 m/s.....	59
Gambar 4.45	Deformasi jembatan 2 truk, 10 m/s	59
Gambar 4.46	Akselerasi jembatan 2 truk, 10 m/s	59
Gambar 4.47	Frekuensi jembatan 2 truk, 10 m/s.....	59
Gambar 4.48	Tegangan jembatan 2 truk, 20 m/s.....	60
Gambar 4.49	Deformasi jembatan 2 truk, 20 m/s	60
Gambar 4.50	Akselerasi jembatan 2 truk, 20 m/s	60
Gambar 4.51	Frekuensi jembatan 2 truk, 20 m/s.....	61
Gambar 4.52	Tegangan jembatan 4 truk, 5 m/s.....	61
Gambar 4.53	Deformasi jembatan 4 truk, 5 m/s	62
Gambar 4.54	Akselerasi jembatan 4 truk, 5 m/s	62
Gambar 4.55	Frekuensi jembatan 4 truk, 5 m/s.....	62
Gambar 4.56	Tegangan jembatan 4 truk, 10 m/s.....	63
Gambar 4.57	Deformasi jembatan 4 truk, 10 m/s	63
Gambar 4.58	Akselerasi jembatan 4 truk, 10 m/s	63
Gambar 4.59	Frekuensi jembatan 4 truk, 10 m/s.....	63
Gambar 4.60	Tegangan jembatan 4 truk, 20 m/s.....	64
Gambar 4.61	Deformasi jembatan 4 truk, 20 m/s	64
Gambar 4.62	Akselerasi jembatan 4 truk, 20 m/s	64
Gambar 4.63	Frekuensi jembatan 4 truk, 20 m/s.....	65
Gambar 4.64	Tegangan jembatan 6 truk, 5 m/s.....	65
Gambar 4.65	Deformasi jembatan 6 truk, 5 m/s	65
Gambar 4.66	Akselerasi jembatan 6 truk, 5 m/s	66
Gambar 4.67	Frekuensi jembatan 6 truk, 5 m/s.....	66
Gambar 4.68	Tegangan jembatan 6 truk, 10 m/s.....	66
Gambar 4.69	Deformasi jembatan 6 truk, 10 m/s	67
Gambar 4.70	Akselerasi jembatan 6 truk, 10 m/s	67
Gambar 4.71	Frekuensi jembatan 6 truk, 10 m/s.....	67
Gambar 4.72	Tegangan jembatan 6 truk, 20 m/s.....	68

Gambar 4.73	Deformasi jembatan 6 truk, 20 m/s	68
Gambar 4.74	Akselerasi jembatan 6 truk, 20 m/s	68
Gambar 4.75	Frekuensi jembatan 8 truk, 20 m/s.....	68
Gambar 4.76	Tegangan jembatan 8 truk, 5 m/s.....	69
Gambar 4.77	Deformasi jembatan 8 truk, 5 m/s	69
Gambar 4.78	Akselerasi jembatan 8 truk, 5 m/s	69
Gambar 4.79	Frekuensi jembatan 8 truk, 5 m/s.....	70
Gambar 4.80	Tegangan jembatan 8 truk, 10 m/s.....	70
Gambar 4.81	Deformasi jembatan 8 truk, 10 m/s	70
Gambar 4.82	Akselerasi jembatan 8 truk, 10 m/s	71
Gambar 4.83	Frekuensi jembatan 8 truk, 10 m/s.....	71
Gambar 4.84	Tegangan jembatan 8 truk, 20 m/s.....	71
Gambar 4.85	Deformasi jembatan 8 truk, 20 m/s	72
Gambar 4.86	Akselerasi jembatan 8 truk, 20 m/s	72
Gambar 4.87	Frekuensi jembatan 8 truk, 20 m/s.....	72
Gambar 4.88	Tegangan jembatan 10 truk, 5 m/s.....	73
Gambar 4.89	Deformasi jembatan 10 truk, 5 m/s	73
Gambar 4.90	Akselerasi jembatan 10 truk, 5 m/s	73
Gambar 4.91	Frekuensi jembatan 10 truk, 5 m/s.....	73
Gambar 4.92	Tegangan jembatan 10 truk, 10 m/s.....	74
Gambar 4.93	Deformasi jembatan 10 truk, 10 m/s	74
Gambar 4.94	Akselerasi jembatan 10 truk, 10 m/s	74
Gambar 4.95	Frekuensi jembatan 10 truk, 10 m/s.....	75
Gambar 4.96	Tegangan jembatan 10 truk, 20 m/s.....	75
Gambar 4.97	Deformasi jembatan 10 truk, 20 m/s	75
Gambar 4.98	Akselerasi jembatan 10 truk, 20 m/s	76
Gambar 4.99	Frekuensi jembatan 10 truk, 20 m/s.....	76
Gambar 4.100	Tegangan jembatan 12 truk, 5 m/s.....	76
Gambar 4.101	Deformasi jembatan 12 truk, 5 m/s	77
Gambar 4.102	Akselerasi jembatan 12 truk, 5 m/s	77
Gambar 4.103	Frekuensi jembatan 12 truk, 5 m/s.....	77
Gambar 4.104	Tegangan jembatan 12 truk, 10 m/s.....	78
Gambar 4.105	Deformasi jembatan 12 truk, 10 m/s	78
Gambar 4.106	Akselerasi jembatan 12 truk, 10 m/s	78
Gambar 4.107	Frekuensi jembatan 12 truk, 10 m/s.....	78

Gambar 4.108	Tegangan jembatan 12 truk, 20 m/s.....	79
Gambar 4.109	Deformasi jembatan 12 truk, 20 m/s	79
Gambar 4.110	Akselerasi jembatan 12 truk, 20 m/s	79
Gambar 4.111	Frekuensi jembatan 12 truk, 20 m/s.....	80

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Perbandingan nilai matematis dan simulasi pada <i>beam</i>	34
Tabel 4.2	Nilai panjang, cos, dan sin pada tiap elemen	35
Tabel 4.3	Perbandingan nilai matematis dan simulasi pada <i>truss</i>	45
Tabel 4.4	Nilai Kn pada mode 1-5	46
Tabel 4.5	Nilai frekuensi natural setelah memasukkan Kn	46
Tabel 4.6	Perbandingan nilai fn pada metode matematis dan simulasi.....	49
Tabel 4.7	Mode dan frekuensi yang timbul pada <i>modal analysis</i>	52
Tabel 4.8	Tegangan maksimum yang dialami jembatan pada berbagai variasi.....	80
Tabel 4.9	Data akselerasi maksimum pada berbagai variasi.....	81
Tabel 4.10	Data akselerasi rata-rata pada berbagai variasi dinamis.....	82
Tabel 4.11	Frekuensi dominan pertama pada berbagai variasi dinamis.....	82
Tabel 4.11	Frekuensi dominan kedua pada berbagai variasi dinamis.....	83

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jembatan merupakan infrastruktur vital dalam sistem transportasi, yaitu sebagai media penyeberangan sungai, maupun penghubung antar-tebing. Jembatan di berbagai negara mengalami penuaan secara cepat, kerusakan struktural ini diakibatkan oleh perubahan karakteristik beban dan gaya acak pada jembatan (Hoi Wai, 2011). Kerusakan jembatan umumnya dibagi menjadi dua bagian, yaitu kerusakan pada bagian atas (badan) dan kerusakan pada bagian bawah (pilar) jembatan. Kerusakan pada badan jembatan dapat terjadi sebagai akibat dari retak struktural, lendutan, goyangan (angin, dll), kerusakan lantai kendaraan dan tumpuan/bearing, oleh gaya-gaya yang bekerja pada jembatan seperti kelebihan beban, kecelakaan, tumbukan, gempa, korosi, aliran debris, dan lain-lain. Sedangkan kerusakan pada pangkal dan pilar jembatan dapat rusak karena gerusan yang ditimbulkan oleh arus, aliran debris, maupun pergerakan pondasi.

Gaya-gaya yang bekerja pada badan jembatan dapat menyebabkan kerusakan apabila melebihi batas yang diijinkan. Gaya-gaya tersebut berasal dari beban kendaraan yang ditransmisikan melalui permukaan ban. Pada penelitian sebelumnya diketahui bahwa perbedaan jarak antar ban depan dan belakang mampu menghasilkan vibrasi tambahan pada beam jembatan (Alinda, 2016). Penelitian tersebut memodelkan jembatan beam yang dilalui oleh beban berjalan berupa kendaraan setengah mobil. Jembatan beam merupakan jenis jembatan yang paling sederhana, namun jembatan beam memiliki kelemahan yaitu tidak mampu mendistribusikan beban pada suatu titik ke seluruh bagian jembatan.

Seiring berkembangnya ilmu konstruksi jembatan, muncul jenis-jenis jembatan lainnya, yaitu jembatan truss, suspension, cable-stayed, dan lain-lain. Jembatan truss adalah jembatan yang memiliki sistem struktur yang tersusun atas trusses, yang cocok untuk simple atau continuous span antara 40-400 m (Ellobody,

2014). Di Indonesia, jembatan truss didominasi oleh tipe warren, hal ini disebabkan oleh warisan dari zaman Belanda.

Perencanaan jembatan tentunya tidak lepas dari pertimbangan beban yang melaluinya. Namun, di Indonesia sering ditemui truk dengan muatan melebihi klasifikasi beban muatan sumbu maksimum. Dari hasil penelitian yang dilakukan dengan Metode Analisa Komponen diketahui bahwa telah terjadi penyimpangan beban kendaraan truk dari 8 ton menjadi 9,28 ton, kendaraan truk 2 sumbu dari 13 ton menjadi 14,93 ton, dan kendaraan truk 3 sumbu dari 20 ton menjadi 22,20 ton (Agustinus, 2012). Beban-beban yang berlebih tersebut cukup mendekati nilai beban yang ada pada standar internasional (AASHTO).

Permasalahan yang telah dipaparkan sebelumnya mengarah pada judul penelitian yang diusulkan yaitu “Analisis Performansi Jembatan Rangka Baja Tipe Warren akibat Variasi Beban Berjalan” yang diharapkan mampu menunjukkan performansi jembatan rangka yang umum digunakan di Indonesia apabila dikenai variasi beban berjalan sesuai standar internasional.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah bagaimanakah performansi jembatan rangka apabila dikenai beban yang bervariasi.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari meluasnya permasalahan, maka batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah:

- a. Struktur jembatan yang dibahas yaitu bagian *beam* dan *truss*
- b. Variabel kontrol yang digunakan adalah :
 - Dimensi elemen *beam* dan *truss* yang digunakan.
 - Jumlah *contact nodes* antara *beam* dan *truss*.
- c. Konfigurasi *truss* yang akan digunakan sebagai objek analisis yaitu tipe Warren.
- d. Truk yang dipakai dalam analisis adalah truk dua sumbu roda yang ada pada AASHTO.

- e. Terdapat empat titik tumpu pada model kendaraan yaitu pada roda depan dan roda belakang, dalam laporan ini akan dimodelkan sebagai roda yang berpindah secara horizontal.
- f. Pemodelan menggunakan *software* ANSYS WORKBENCH 17.1.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah memperoleh hasil analisis performansi jembatan rangka setelah dikenakan beban yang bervariasi.

1.5 Manfaat

Penelitian ini diharapkan mampu menjadi salah satu bahan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam bidang vibrasi struktur, terutama dalam bidang jembatan.

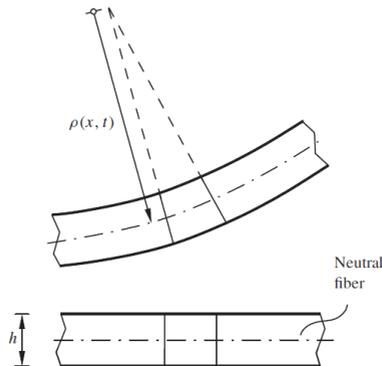
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

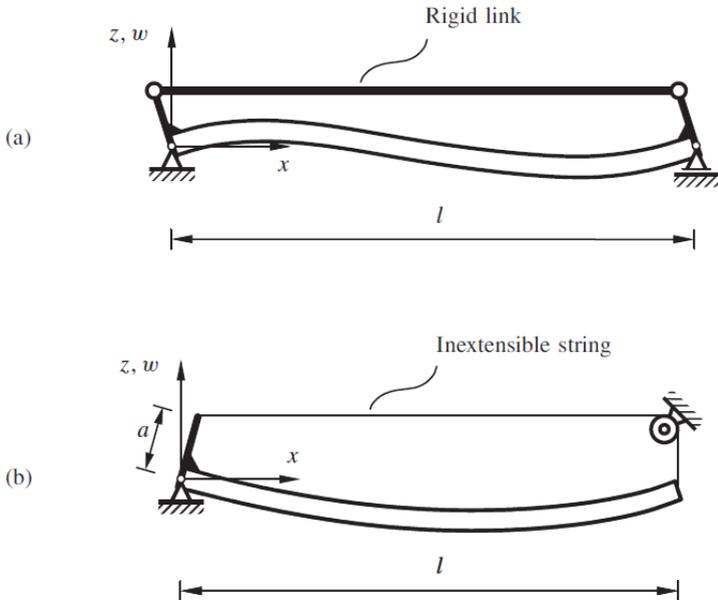
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Beam*

Beam merupakan suatu objek elastis yang ditujukan untuk menerima beban getaran transversal yang mengakibatkan pembengkokan atau patahan dari objek tersebut (Hagedorn, 2007). *Beam* biasanya ditemui dalam beberapa mesin atau struktur bangunan tertentu dengan transmisi vibrasi yang besar. Perbedaan *beam* dengan objek elastis lainnya adalah arah elastisitas apabila dikenai suatu beban atau gaya. *Beam* tidak hanya membengkok (melengkung) namun juga patah. Jadi, ketika suatu *beam* dikenai suatu beban atau gaya, perpindahan posisi *beam* berupa derajat kelengkungan yang disebut juga defleksi planar dan panjang displacement atau penurunan atau kenaikan dari posisi awal. Salah satu contoh dari *beam* sederhana terdapat pada salah satu bagian dari struktur jembatan yaitu batang atau jalan tempat kendaraan melewati jembatan tersebut. Penjelasan di atas dapat dilihat pada gambar 2.1 dan 2.2.



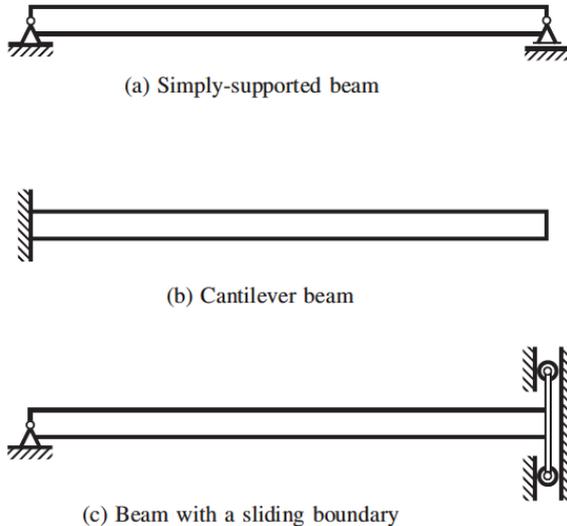
Gambar 2.1 Representasi Skematik dari *beam* yang terkena defleksi planar (Hagedorn, 2007)



Gambar 2.2 Defleksi yang terjadi pada *beam* dengan batas kondisi khusus (a) *Beam* dengan penyangga sederhana (b) *Beam* dengan batas bergeser (Hagedorn, 2007)

2.2 Jenis-Jenis Beam

Penggolongan jenis beam dilakukan berdasarkan perbedaan kondisi penyangga yang dimilikinya. beberapa keadaan yang biasa ditemui pada penyangga beam adalah kombinasi dari dijepit, diapit, bebas dan bergeser (Hagedorn, 2007). Perbedaan dari kombinasi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.3.



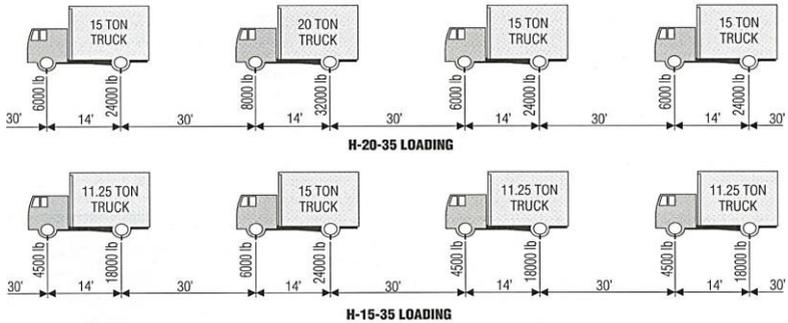
Gambar 2.3 Jenis-jenis kondisi dari kombinasi batas *beam* (a) *beam* dengan penyangga sederhana (b) *beam cantilever* (c) *beam* dengan penyangga bergeser (Hagedorn, 2007)

Pada penelitian ini, akan digunakan 2 jenis *beam* sekaligus, yaitu *simply-supported beams* yang dikombinasikan dengan *sliding beams*.

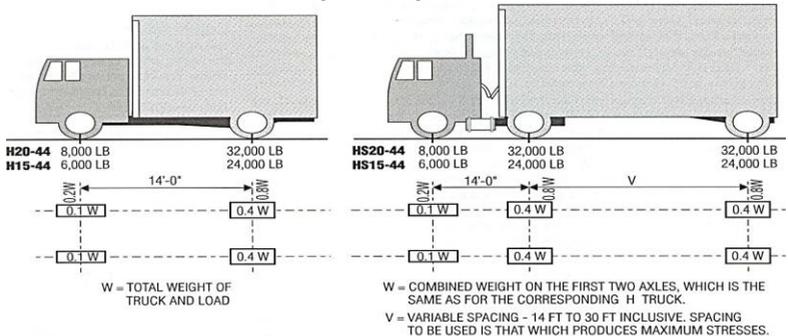
2.3 Pemodelan Beban

Parameter desain yang utama dari jembatan adalah pembebanan truk. Berdasarkan beban muatan sumbu, jalan di Indonesia diklasifikasikan ke dalam 5 kelas (jalan kelas I, II, IIIA, IIIB, IIIC). Dari kelima kelas tersebut, beban muatan sumbu maksimum yang diijinkan adalah 10 ton (kelas I dan II) (UU RI no.22, 2009). Dari hasil penelitian yang dilakukan dengan Metode Analisis Komponen diketahui bahwa telah terjadi penyimpangan beban kendaraan ringan dari 2 ton menjadi 2,90 ton, kendaraan truk dari 8 ton menjadi 9,28 ton, kendaraan truk 2 sumbu dari 13 ton menjadi 14,93 ton, dan kendaraan truk 3 sumbu dari 20 ton menjadi 22,20 ton (Agustinus, 2012).

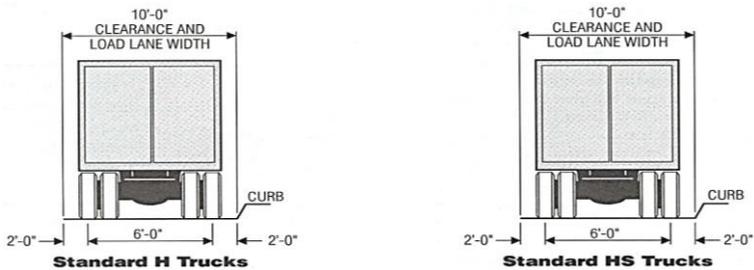
Menurut standar internasional, *American Association of State and Highway Transportation Officials* (AASHTO) telah dikembangkan konsep *hypothetical trucks*, terdapat dua kelas besar dalam konsep ini, yaitu “H” (jika memiliki 2 sumbu roda) dan “HS” (jika memiliki 3 sumbu roda). Detail beban truk pada standar tersebut dapat dilihat pada gambar 2.4, 2.5, dan 2.6.



Gambar 2.4 Berbagai macam konsep muatan truk disertai detail beban muatan masing-masing sumbu (AASHTO, 1935)



Gambar 2.5 Geometri (tampak samping) Truk kelas H dan HS sesuai standar (AASHTO)



Gambar 2.6 Geometri (tampak belakang) Truk kelas H dan HS sesuai standar (AASHTO)

2.4 Matriks Kekakuan *Beam* dan *Truss*

Persamaan gerak dari kendaraan yang melewati *beam* adalah sebagai berikut :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{D}} + \mathbf{K}\mathbf{D} = \mathbf{N}_1^T \mathbf{f}_1 + \mathbf{N}_2^T \mathbf{f}_2 \quad (1)$$

Dengan \mathbf{K} merupakan matriks kekakuan dari *beam*, \mathbf{M} merupakan matriks massa dari sistem kendaraan setengah mobil serta \mathbf{N} adalah *shape function*.

Matrik kekakuan \mathbf{k} berpengaruh pada gaya potong dan gaya kelengkungan dari *beam*. Pada gambar 2.6, terlihat bahwa *beam* mengalami kedua gaya secara bersamaan yang menghasilkan defleksi dan rotasi. Untuk mengetahui besarnya defleksi dan rotasi dari *beam*, dapat dilihat pada matriks kekakuan lokal berikut ini.

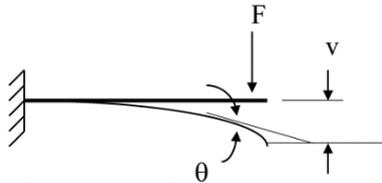
$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \theta_1 \\ \Delta_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Matriks ini adalah matriks 4x4 yang telah diturunkan sebelumnya dari persamaan :

$$\mathbf{F} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{x} \quad (3)$$

Defleksi \mathbf{x} merupakan parameter yang nilainya akan dicari untuk melihat respon jembatan terhadap beban berjalan. Setelah \mathbf{k} dihitung dari masing-masing *node*, diperoleh matriks kekakuan selanjutnya yang dapat digunakan untuk mengetahui defleksi dan rotasi dari *beam*.

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = (EI) \begin{bmatrix} 12/L^3 & 6/L^2 & -12/L^3 & 6/L^2 \\ 6/L^2 & 4/L & -6/L^2 & 2/L \\ -12/L^3 & -6/L^2 & 12/L^3 & -6/L^2 \\ 6/L^2 & 2/L & -6/L^2 & 4/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \theta_1 \\ \Delta_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$



Gambar 2.7 Gaya-gaya yang bekerja pada *beam*
Matriks kekakuan *truss* adalah sebagai berikut :

$$k = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dimana :

E : Modulus Young material

A : *Cross-sectional Area* dari elemen

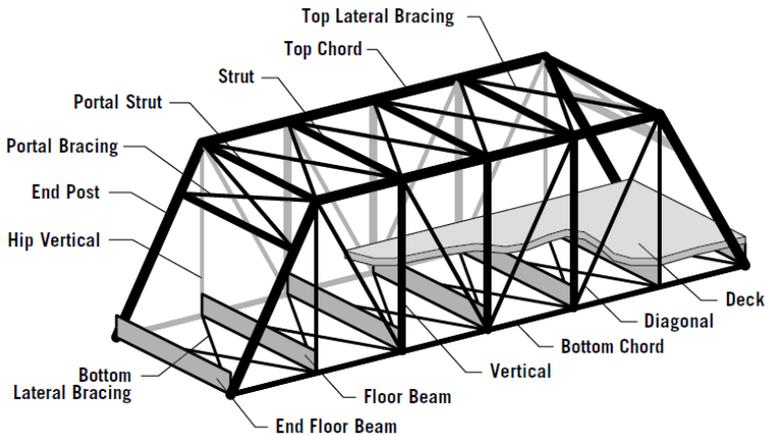
L : Panjang elemen

c : $\cos \theta$

s : $\sin \theta$

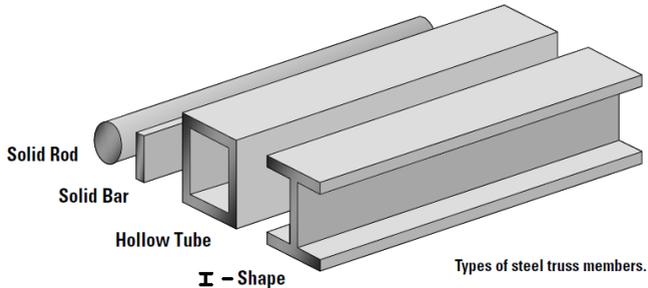
2.5 Jembatan Rangka

Rangka (*truss*) adalah struktur yang tersusun atas member-member baja yang dihubungkan untuk membentuk ikatan yang kokoh. Member-member adalah komponen yang menahan beban sebuah struktur. Pada umumnya, member-member tersebut disusun bertumpukan menjadi bentuk segitiga. Komponen-komponen dari jembatan adalah sebagai berikut.



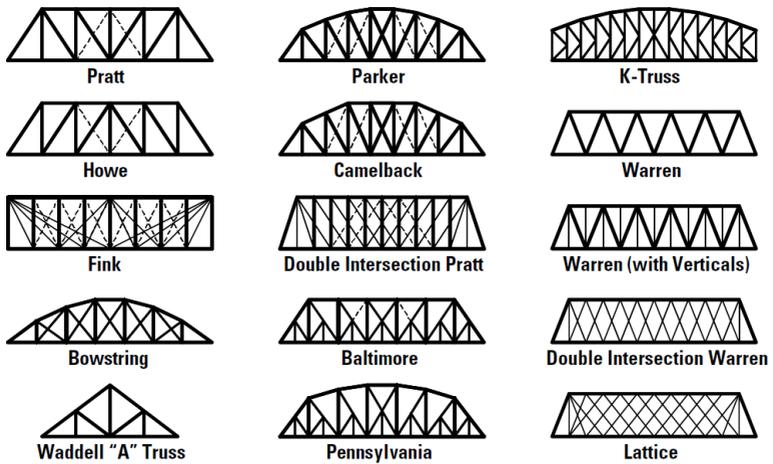
Gambar 2.8 Bagian-bagian jembatan rangka (Ressler, 2001)

Rangka jembatan memiliki banyak variasi bentuk *cross-section*, seperti tertera pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.9 Jenis-jenis *cross-section* rangka baja (Ressler, 2001)

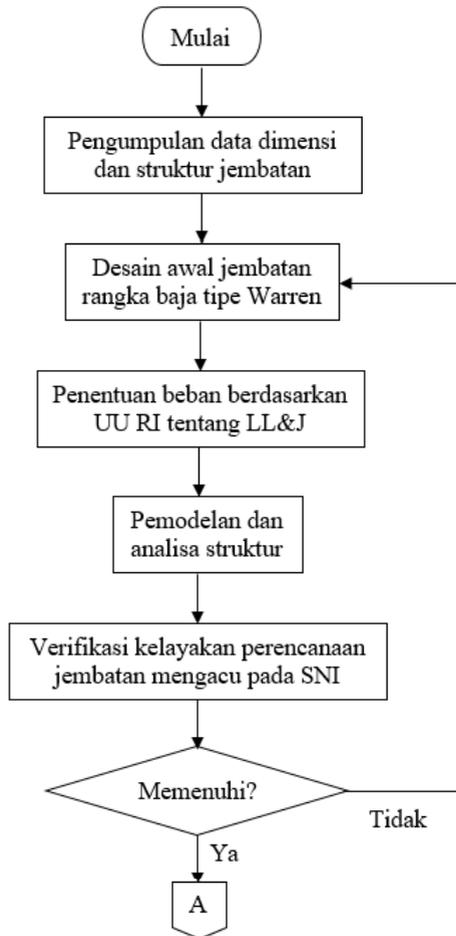
Berdasarkan lokasi *deck* dan *top chord*, jembatan rangka dibagi atas tiga kategori, yaitu *through truss*, *pony truss*, dan *deck truss*. Sedangkan berdasarkan susunan geometri rangka, ada 15 geometri yang telah umum digunakan [10], 15 geometri tersebut tersaji pada gambar di bawah.

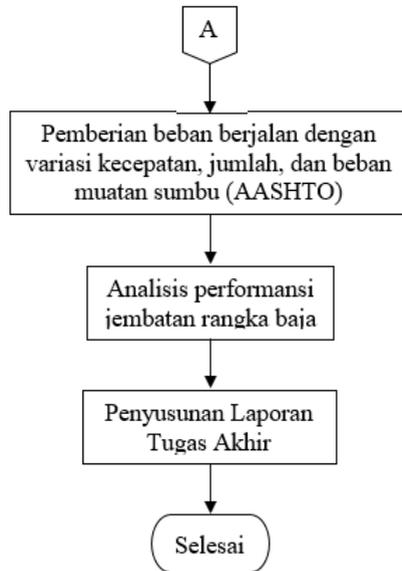


Gambar 2.10 Geometri jembatan rangka yang telah umum digunakan (Ressler, 2001)

BAB III METODOLOGI

Pada bab ini akan dijabarkan metode yang disusun dan digunakan dalam penyelesaian permasalahan seperti pada gambar berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

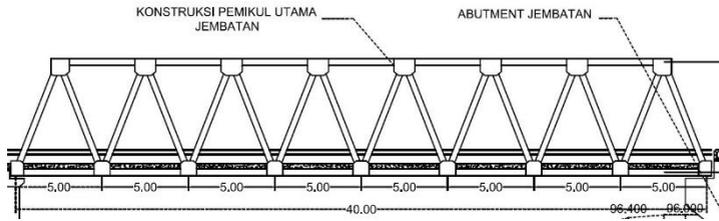
Gambar 3.1 menjelaskan bagaimana penelitian ini berjalan. Terdapat dua proses inti yang dilakukan pada tugas akhir ini, yaitu proses verifikasi statis jembatan, dan analisis respon dinamis jembatan.

3.1. Pengumpulan data dimensi dan struktur jembatan

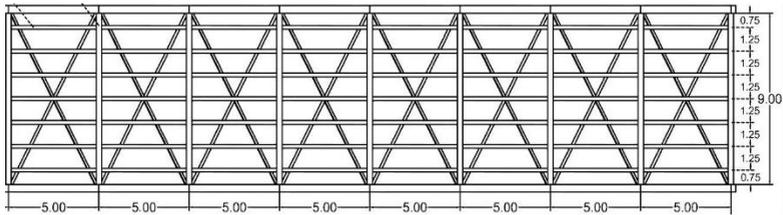
3.1.1. Dimensi jembatan

Tahap pertama pada proses verifikasi statis jembatan adalah mengumpulkan data dimensi jembatan, seperti panjang, lebar, tinggi rangka, jarak antar tumpuan, dan lain sebagainya.

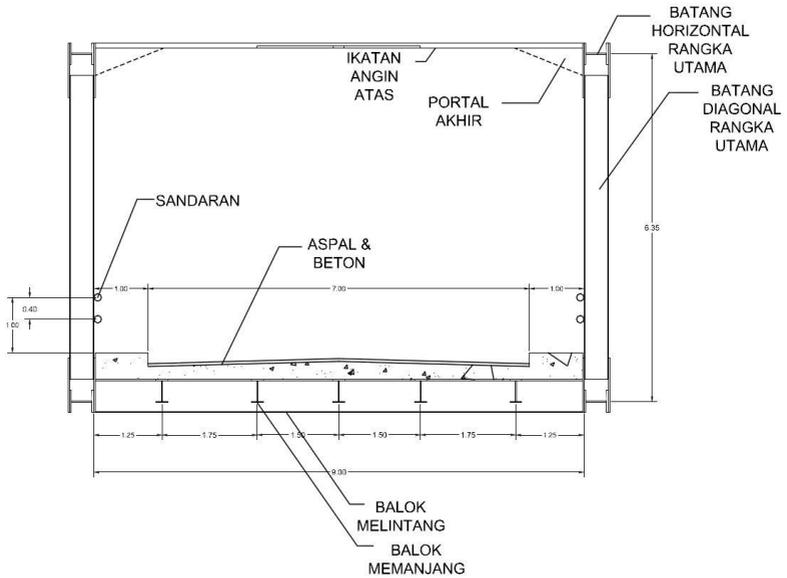
Jembatan yang menjadi acuan dalam penelitian ini adalah desain dari penelitian Rizqi, 2015. Jembatan tersebut memiliki struktur rangka tipe Warren, dan terdiri atas dua bentang.



Gambar 3.2 Tampak samping jembatan (Basalamah, 2015)



Gambar 3.3 Tampak atas jembatan (Basalamah, 2015)



Gambar 3.4 Tampak depan jembatan (Basalamah, 2015)

Bagian yang diambil pada penelitian ini adalah bentang kecil jembatan. Sehingga dimensi yang akan diteliti adalah sebagai berikut.

Panjang	: 40 m
Lebar	: 9 m
Tinggi	: 6 m
Jarak antar baja melintang	: 5 m
Jarak antar baja memanjang	: 1 m

3.1.2. Struktur jembatan

Struktur jembatan rangka baja terdiri atas beton, pondasi / tumpuan, dan kerangka baja. Beton yang umum digunakan adalah beton dengan tebal 0,2 m.

Kerangka baja yang digunakan terdiri atas dua bentuk penampang (*cross-section*), yaitu bentuk *H-beam* dan *L-beam*. Bentuk H diperoleh dari *H-beam Specifications* PT Cigading Habeam Centre, sedangkan bentuk L diperoleh dari *L-profile Online Metal Marketplace*.

SIZE OF H-BEAM (mm)		
DEPTH x WIDTH	↑ WEB	↑ FLANGE
H x B	t1	t2
400 X 400	6	9
	6	12
	6	14
	9	12
	9	14
	9	16
	12	16
	12	19
	12	22
	12	25
	16	22
	16	25
	16	28
	16	32

Gambar 3.5 Spesifikasi baja bentuk H (Cigading Habeam Centre, 1999)

Nominal dimensions		
$a \times b \times t$	r_1	r_2
mm	mm	mm
100x50x6	8	4.0
100x50x8	8	4.0
100x65x7	10	4.8
100x65x8	10	4.8
100x65x10	10	4.8
100x75x8	10	4.8
100x75x10	10	4.8

The diagram illustrates the geometry of an L-shaped steel section. It shows the overall dimensions: a (width), b (height), and t (thickness). The inner fillet radius is r_1 and the outer fillet radius is r_2 . The centroidal axes are labeled x and y . The diagram also includes the website address www.b2bmetal.eu.

Gambar 3.6 Spesifikasi baja bentuk L (b2bmetal, 1995)

Secara rinci, detail struktur jembatan yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tebal beton	: 0.2 m
Tumpuan	: Kombinasi <i>slider</i> dan <i>simply supported</i>
Baja atas	: 100 x 75 x 8 mm (a x b x t)
Baja samping	: 400 x 400 x 6 x 12 mm (H x B x t1 x t2)
Baja bawah	: 400 x 400 x 6 x 12 mm (H x B x t1 x t2)

3.2. Desain awal jembatan rangka baja tipe Warren

Pendesainan jembatan pada penelitian ini menggunakan *software* Ansys Workbench 17.1. Modul yang digunakan untuk mendesain adalah *Design Modeler* pada *Static Structural*.



Warren perencanaan statis

Gambar 3.7 *Outline* simulasi Ansys

3.2.1 *Engineering Data*

Engineering Data berfungsi untuk memilih material apa saja yang akan digunakan dalam simulasi. Selain itu, dalam menu ini dapat dilakukan manipulasi/asumsi dari suatu jenis material, misalkan mengubah massa jenis sesuai kebutuhan. Dalam verifikasi statis, material yang digunakan hanya *concrete* dan BJ41 *steel*.

Properties of Outline Row 4: Concrete				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2	Density	2300	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.4E-05	C ⁻¹	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
5	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	3E+10	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.18		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.5625E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	1.2712E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
12	Tensile Yield Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
13	Compressive Yield Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
14	Tensile Ultimate Strength	5E+06	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
15	Compressive Ultimate Strength	4.1E+07	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

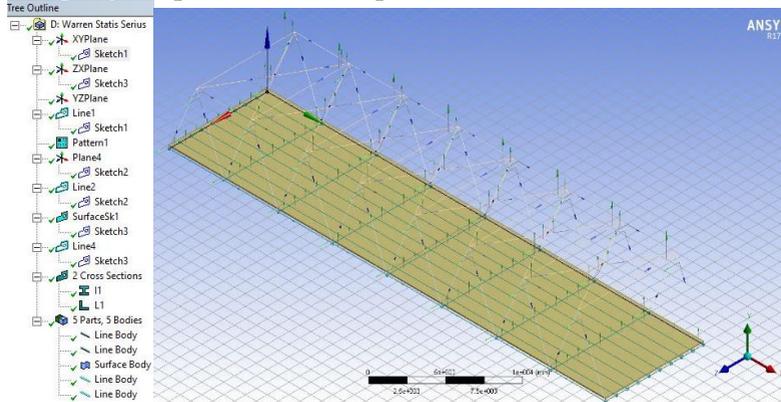
Gambar 3.8 *Properties* dari material beton/concrete

Properties of Outline Row 3: BJ41					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m ⁻³		<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹		<input type="checkbox"/>
5	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C		<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modu...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.3			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Interpolation	Log-Log			
14	Scale	1			<input type="checkbox"/>
15	Offset	0	Pa		<input type="checkbox"/>
16	Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Display Curve Type	Strain-Life			
18	Strength Coefficient	9.2E+08	Pa		<input type="checkbox"/>
19	Strength Exponent	-0.106			<input type="checkbox"/>
20	Ductility Coefficient	0.213			<input type="checkbox"/>
21	Ductility Exponent	-0.47			<input type="checkbox"/>
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2			<input type="checkbox"/>
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		<input type="checkbox"/>
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		<input type="checkbox"/>
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		<input type="checkbox"/>
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		<input type="checkbox"/>

Gambar 3.9 *Properties* dari material baja/steel

3.2.2 Design Modeler

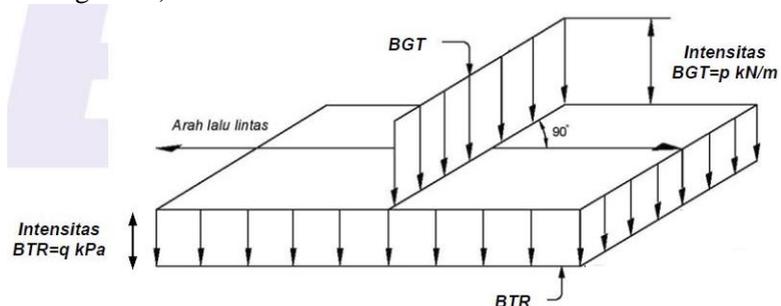
Design modeler adalah modul/tools untuk menggambar model 3D pada Ansys. Dengan menggunakan berbagai fitur *sketch*, *extrude*, *translate*, *pattern*, *cross-section*, dan lain sebagainya, diperoleh desain seperti berikut.



Gambar 3.10 Desain 3D jembatan.

3.3. Penentuan beban berdasarkan SNI

Pemberian beban untuk verifikasi kelayakan statis dapat mengacu pada SNI 1725-2016. Beban yang akan aplikasikan ada dua macam, yaitu BGT (Beban Garis Terpusat) dan BTR (Beban Terbagi Rata).



Gambar 3.11 Skema beban garis terpusat (BGT) dan beban terbagi rata (BTR) (SNI 1725, 2016)

3.3.1. Beban Garis Terpusat

Menurut SNI 1725-2016, beban garis terpusat adalah beban berbentuk garis yang diaplikasikan pada bagian tengah jembatan. Intensitas beban yang diaplikasikan adalah 49 kN/m. Dengan lebar jembatan yang berukuran 9 m, maka BGT bernilai $49 \times 9 = 441$ kN.

3.3.2. Beban Terbagi Rata

Menurut SNI 1725-2016, beban terbagi rata adalah beban berbentuk luasan yang diaplikasikan pada seluruh bagian jembatan. Intensitas beban yang diaplikasikan adalah sebagai berikut.

Jika $L \leq 30$ m $\rightarrow q = 9$ kPa

Jika $L > 30$ m $\rightarrow q = 9 (0,5 + 15/L)$ kPa

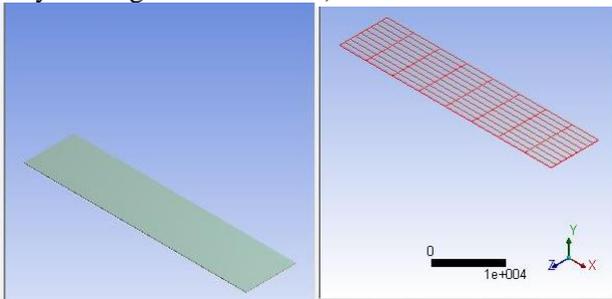
Panjang jembatan pada penelitian ini adalah 40 m. Maka BTR yang diaplikasikan adalah $9 (0,5 + 15/40)$ kPa = 7,87 kPa

3.4. Pemodelan dan Analisis Struktur

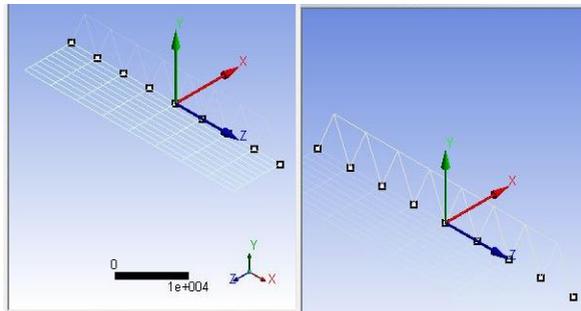
3.4.1. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dilakukan pada modul Ansys Mechanical. Pada modul ini, ada beberapa langkah untuk memodelkan jembatan secara utuh.

Pada menu *geometry*, material yang akan digunakan dideklarasikan pada masing-masing geometri secara spesifik. Pada menu *connections*, dilakukan deklarasi sambungan antar material, ada dua jenis sambungan, yaitu *contacts-bonded* (untuk menghubungkan beton dan baja bawah, lalu *joints-revolute* (untuk menyambungkan antar beton).

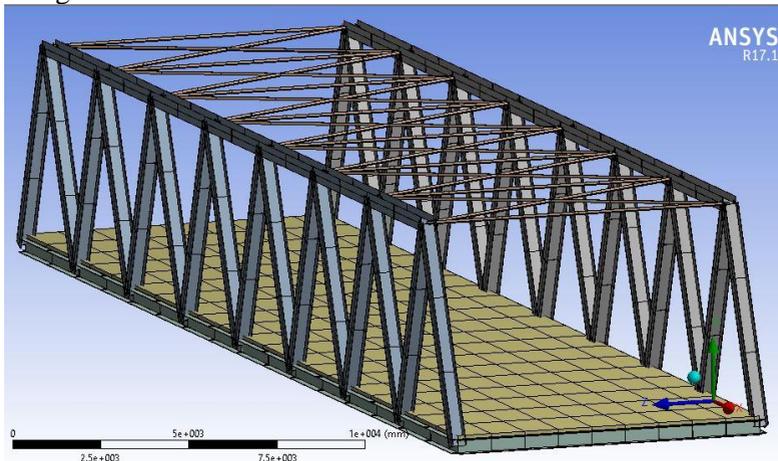


Gambar 3.12 Sambungan *contacts-bonded*



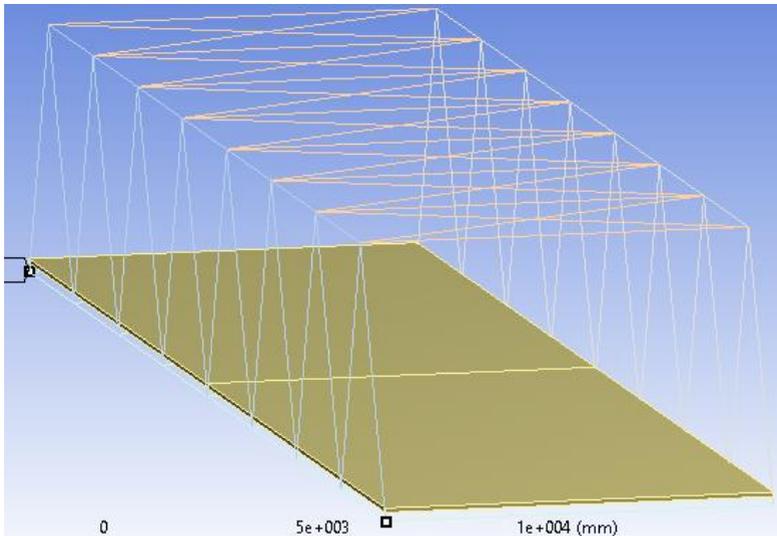
Gambar 3.13 Sambungan *joints-revolute*

Setelah dilakukan *meshing*, tampilan jembatan adalah sebagai berikut.



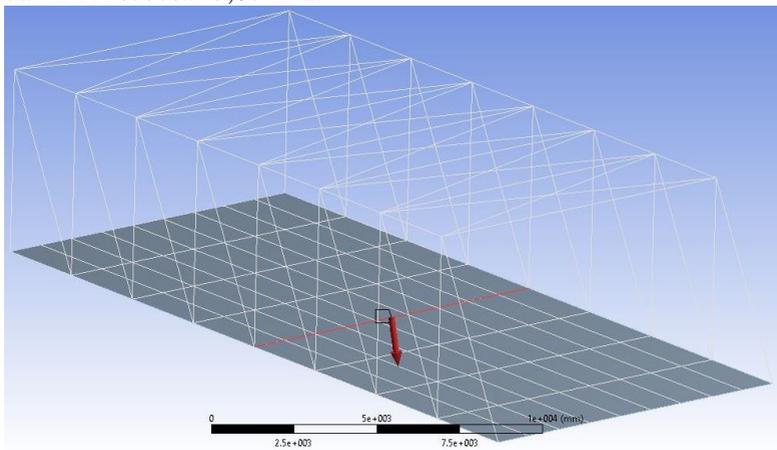
Gambar 3.14 Tampilan 3D jembatan setelah *meshing*

Untuk memberikan tumpuan kombinasi *slider* dan *simply supported*, masukkan support melalui Ansys dengan klik kanan, *insert*, pilih *displacement* dan *simply supported*. Khusus support *displacement*, bebaskan pergerakan hanya pada sumbu x dan z, hal ini dilakukan agar pondasi tidak bergeser pada sumbu y. Deklarasikan 2 titik sebagai pondasi *slider*, dan 2 titik lainnya sebagai pondasi *simply supported*.

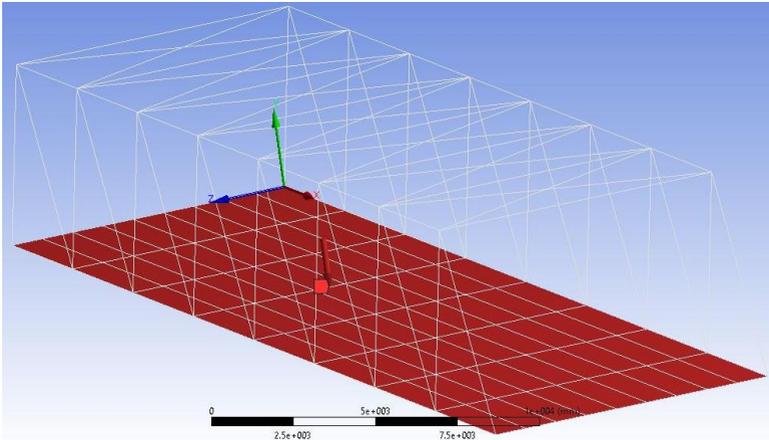


Gambar 3.15 Peletakan titik *support*/pondasi

Hal terakhir yang dilakukan dalam pemodelan adalah memasukkan beban garis terpusat dan beban terbagi rata, nilai ini diperoleh pada bahasan sebelumnya, yaitu BGT sebesar 441 kN dan BTR sebesar 7,87 kPa.



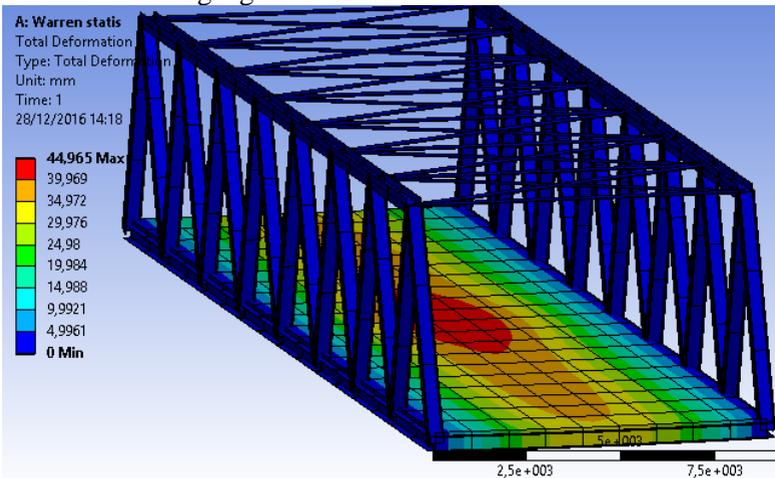
Gambar 3.16 Peletakan beban garis terpusat



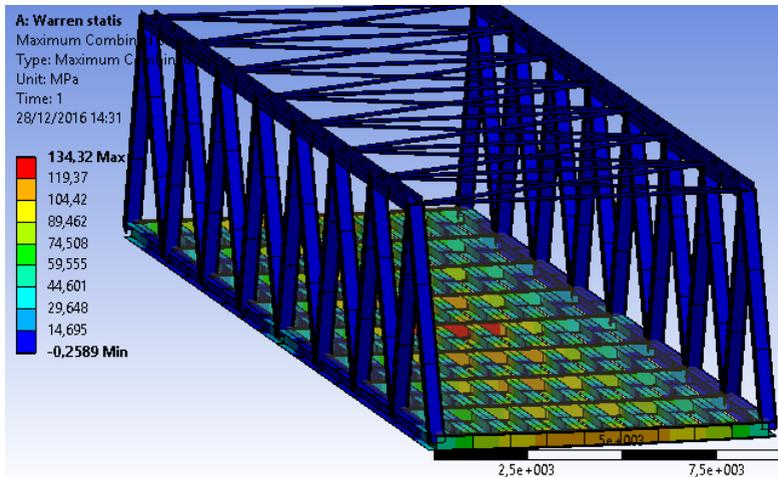
Gambar 3.17 Peletakan beban terbagi rata

3.4.2. Analisis Struktur

Analisis struktur dapat dilakukan pada menu *solution*. Untuk memverifikasi kelayakan jembatan, diperlukan solusi berupa deformasi dan tegangan maksimum.



Gambar 3.18 Deformasi total yang dialami jembatan



Gambar 3.19 Tegangan total yang dialami baja

3.5. Verifikasi kelayakan jembatan mengacu pada SNI

Ada dua parameter yang dijadikan acuan dalam kelayakan, acuan pertama yaitu deformasi/lendutan maksimum, acuan kedua yaitu tegangan maksimum.

Lendutan maksimum yang diijinkan adalah $L/800$, dengan L adalah panjang bentang jembatan. Panjang jembatan adalah 40 m, maka lendutan maksimum yang diijinkan adalah 50 mm. Sedangkan tegangan maksimum baja yang diijinkan pada jenis baja BJ41 adalah 250 MPa. Setelah terpenuhinya syarat verifikasi statis, maka penelitian dapat dilanjutkan ke analisis dinamis.

3.6. Modal Analysis

Modal Analysis adalah studi dari sifat dinamis suatu struktur akibat eksitasi vibrasi. Hal ini diperlukan untuk menemukan frekuensi tertentu yang akan menyebabkan struktur beresonansi, yang lebih dikenal dengan istilah frekuensi natural. Pada Ansys, dapat digunakan modul *Modal Analysis*. Dalam modul tersebut, struktur akan diuji dengan berbagai frekuensi pengganggu. Frekuensi yang mampu mengguncang struktur baja-lah yang akan diambil sebagai nilai frekuensi natural.

3.7. Pemberian beban berjalan dengan variasi kecepatan dan jumlah kendaraan

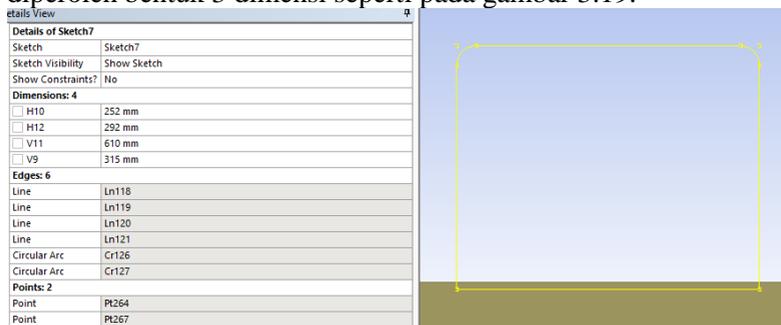
3.7.1. Desain Roda

Beban yang diaplikasikan pada pengujian dinamis adalah beban truk AASHTO H-20 44 seberat 20 ton. Pada penelitian ini, hanya bagian roda yang akan dimodelkan sebagai beban. Ukuran roda yang dijadikan bahan penelitian adalah 315/80R23.

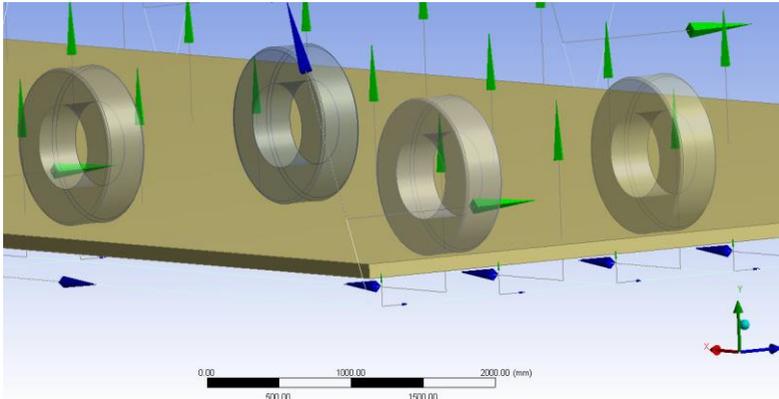


Gambar 3.20 Detail geometri roda (Tyre Size Calculator)

Geometri tersebut digambarkan pada Ansys dengan bentuk persegi dengan ujung tumpul (*fillet*) seperti pada gambar 3.18. Lalu dengan teknik *revolve*, *pattern*, *translate*, dan *mirror* diperoleh bentuk 3 dimensi seperti pada gambar 3.19.

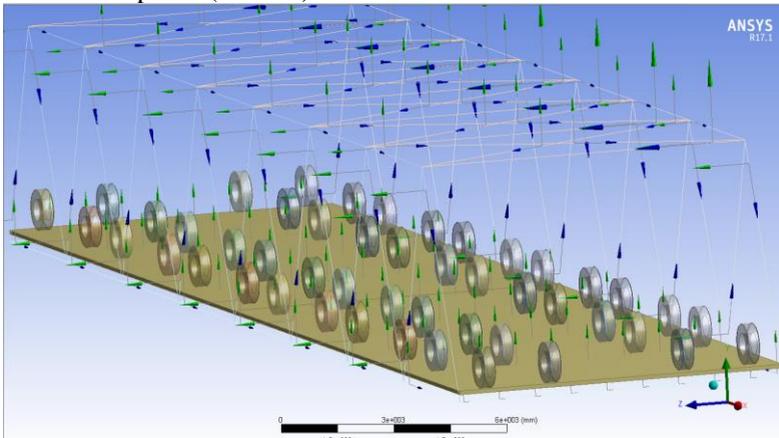


Gambar 3.21 Desain geometri roda pada Ansys



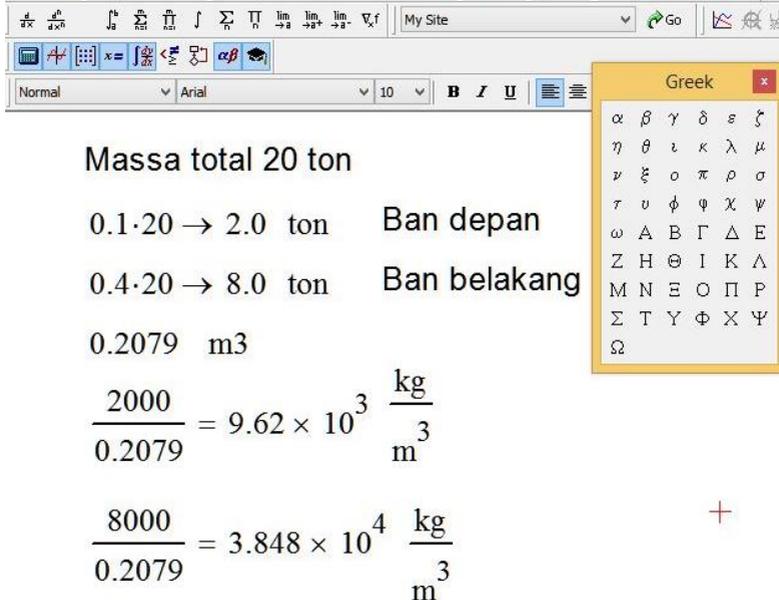
Gambar 3.22 Tampilan 3 dimensi roda

Pada penelitian ini, jumlah kendaraan yang akan digunakan bervariasi mulai dari 1-12 truk, hal ini untuk menganalisis respon jembatan mulai keadaan sepi (1 truk) hingga keadaan terpadat (12 truk)



Gambar 3.23 Tampilan 3 dimensi roda dalam keadaan penuh sesak

Karena desain truk secara utuh tidak memungkinkan, maka roda-roda tersebut bisa dimodifikasi massa jenisnya sehingga mewakili beban truk yang sesungguhnya. Dengan massa roda depan 2 ton, dan roda belakang 8 ton, maka perhitungan massa jenis roda pada simulasi ini disajikan pada gambar berikut.



Normal Arial 10 B I U

Massa total 20 ton

0.1 · 20 → 2.0 ton Ban depan

0.4 · 20 → 8.0 ton Ban belakang

0.2079 m³

$$\frac{2000}{0.2079} = 9.62 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{8000}{0.2079} = 3.848 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

+

Greek

α	β	γ	δ	ε	ζ
η	θ	ι	κ	λ	μ
ν	ξ	ο	π	ρ	σ
τ	υ	φ	ψ	χ	ψ
ω	Α	Β	Γ	Δ	Ε
Ζ	Η	Θ	Ι	Κ	Λ
Μ	Ν	Ξ	Ο	Π	Ρ
Σ	Τ	Υ	Φ	Χ	Ψ
Ω					

Gambar 3.24 Perhitungan massa jenis roda untuk simulasi

Dengan demikian, 2 jenis material baru dibuat dengan bahan karet namun bermassa jenis $9.62 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (roda depan) dan $3.848 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$ (roda belakang). Langkah terakhir pada simulasi dinamis yaitu memberikan kecepatan konstan pada semua roda, digunakan 3 nilai kecepatan, yaitu 5 m/s, 10 m/s, dan 20 m/s.

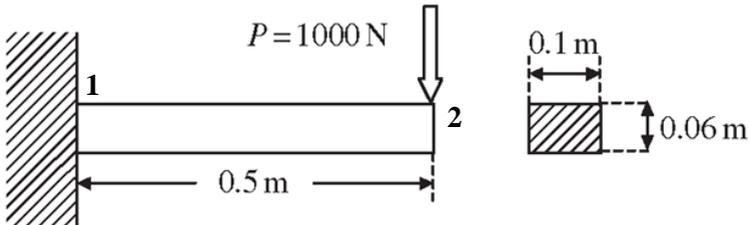
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dibahas hasil dari implementasi masing-masing tahap yang telah dijabarkan dalam BAB III.

4.1. Validasi *Finite Element Method* dan Ansys

4.1.1. Validasi *Beam*



Gambar 4.1. Contoh *beam* yang dikenai gaya vertikal

Modulus young pada *beam* ini adalah 69 Gpa dengan dimensi dan gaya luar seperti pada gambar 4.1.

Finite Element (Matematis)

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}(0,1)(0,06)^3 = 1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = (EI) \begin{bmatrix} 12/L^3 & 6/L^2 & -12/L^3 & 6/L^2 \\ 6/L^2 & 4/L & -6/L^2 & 2/L \\ -12/L^3 & -6/L^2 & 12/L^3 & -6/L^2 \\ 6/L^2 & 2/L & -6/L^2 & 4/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \theta_1 \\ \Delta_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}$$

V_1 : Gaya node 1

M_1 : Momen node 1

V_2 : Gaya node 2

M_2 : Momen node 2

$$\begin{pmatrix} V1 \\ M1 \\ V2 \\ M2 \end{pmatrix} = (69 \cdot 10^9) \cdot (1,8 \cdot 10^{-6}) \cdot \begin{pmatrix} 96,0 & 24,0 & -96,0 & 24,0 \\ 24,0 & 8,0 & -24,0 & 4,0 \\ -96,0 & -24,0 & 96,0 & -24,0 \\ 24,0 & 4,0 & -24,0 & 8,0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta 1 \\ \theta 1 \\ \Delta 2 \\ \theta 2 \end{pmatrix}$$

Karena Δ_1 dan θ_1 bernilai 0, maka baris-kolom 1 dan 2 pada matriks dapat diabaikan untuk mencari Δ_2 dan θ_2 . Diketahui $V_2 = P = -1000$, $M_2 = 0$

$$\begin{pmatrix} -1000 \\ 0 \end{pmatrix} = (69 \cdot 10^9) \cdot (1.8 \cdot 10^{-6}) \cdot \begin{pmatrix} 96.0 & -24.0 \\ -24.0 & 8.0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -1000 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.19232e7\Delta_2 + -2.9808e6\theta_2 \\ -2.9808e6\Delta_2 + 993600.0\theta_2 \end{pmatrix}$$

Dengan metode substitusi, diperoleh :

$$\begin{pmatrix} \Delta_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.355 \times 10^{-4} \\ -1.006 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

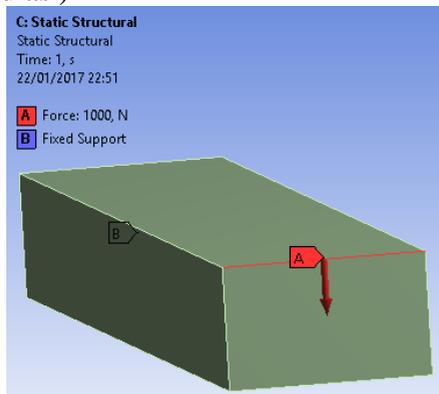
Setelah Δ_2 dan θ_2 diketahui, kembali ke matriks awal.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ M_1 \\ -1000 \\ 0 \end{pmatrix} = (69 \cdot 10^9) \cdot (1.8 \cdot 10^{-6}) \cdot \begin{pmatrix} 96.0 & 24.0 & -96.0 & 24.0 \\ 24.0 & 8.0 & -24.0 & 4.0 \\ -96.0 & -24.0 & 96.0 & -24.0 \\ 24.0 & 4.0 & -24.0 & 8.0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.355 \times 10^{-4} \\ -1.006 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Dari hasil perkalian matriks, diperoleh hasil :

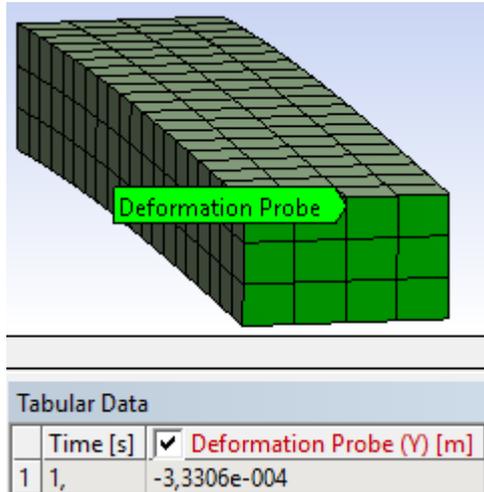
$$\begin{pmatrix} V_1 \\ M_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.002 \times 10^3 \\ 500.278 \end{pmatrix}$$

ANSYS (Simulasi)



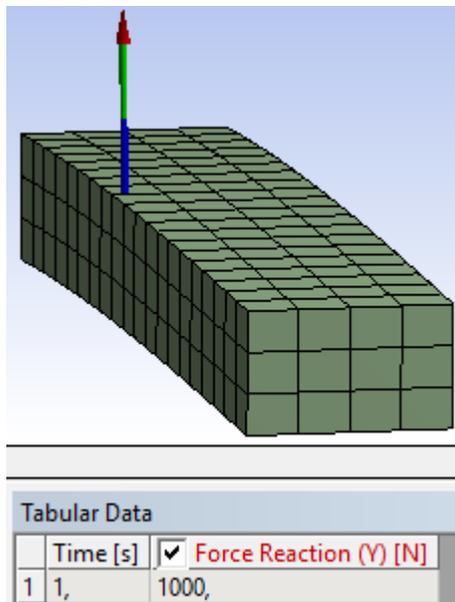
Gambar 4.2 Simulasi beam yang dikenai gaya vertikal

- Displacement node 2



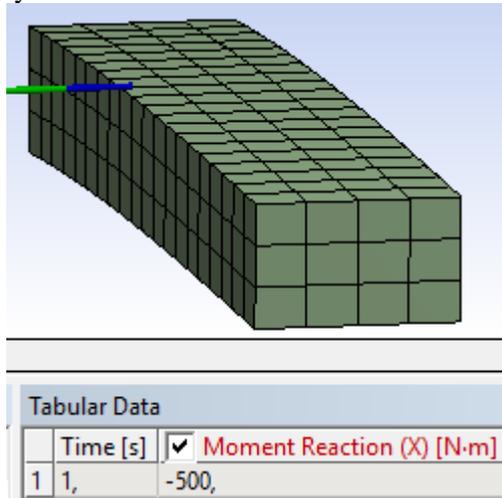
Gambar 4.3 Displacement node 2 pada simulasi Ansys

- Gaya reaksi node 1



Gambar 4.4 Gaya reaksi node 1 pada simulasi Ansys

- Momen gaya node 1



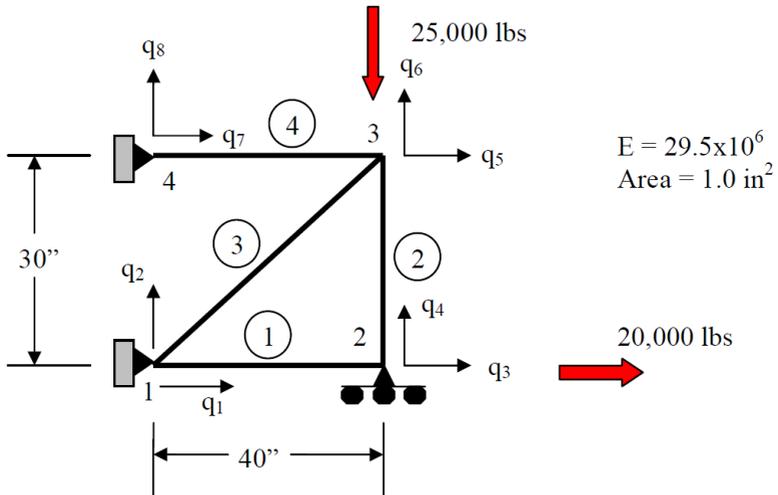
Gambar 4.5 Momen gaya node 1 pada simulasi Ansys

Nilai *displacement*, gaya reaksi, dan momen gaya pada metode matematis maupun simulasi Ansys memberikan nilai yang mendekati, perbandingan ketiga nilai tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.1 Perbandingan nilai matematis dan simulasi pada *beam*

Hasil	Metode		Selisih	Error (%)
	Matematis	Simulasi		
$\Delta 2$	-3.355E-04 m	-3,33E-04 m	-2,44E-06	0,727273
V1	1002 N	1000 N	2 N	0,199601
M1	500.278 Nm	500 Nm	0,278 Nm	0,055569

4.1.2. Validasi *Truss*



Gambar 4.6 Contoh *truss* yang dikenai gaya vertikal dan horizontal

Finite Element (Matematis)

Panjang, cos, sin tiap-tiap elemen disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.2 Nilai panjang, cos, dan sin pada tiap elemen

Elemen	Panjang	Cos	Sin
1	40	1	0
2	30	0	-1
3	50	0,8	0,6
4	40	1	0

Seperti pada dasar teori, matriks kekakuan masing-masing elemen berbeda-beda, bergantung pada panjang dan sudut yang dibentuk (cos dan sin).

$$k = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = \frac{29.5 \times 10^6}{40} \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$k_2 = \frac{29.5 \times 10^6}{30} \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 6 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$k_3 = \frac{29.5 \times 10^6}{50} \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} .64 & .48 & -.64 & -.48 \\ .48 & .36 & -.48 & -.36 \\ -.64 & -.48 & .64 & .48 \\ -.48 & -.36 & .48 & .36 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$k_4 = \frac{29.5 \times 10^6}{40} \begin{matrix} & \begin{matrix} 7 & 8 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Untuk menggabungkan (*assembly*) matriks kekakuan lokal ke dalam matriks kekakuan global, perlu dilakukan penyamaan penyebut, sehingga matriks kekakuan lokal tiap-tiap elemen menjadi seperti berikut.

$$k_1 = \frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 15 & 0 & -15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -15 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$k_2 = \frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 6 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 5 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$k_3 = \frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 7.68 & 5.76 & -7.68 & -5.76 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$k_4 = \frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{matrix} & \begin{matrix} 7 & 8 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 15 & 0 & -15 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}$$

Pada saat penggabungan, sesuaikan baris dan kolom matriks, lalu jumlahkan matriks yang sebaris dan sekolom. Sehingga matriks kekakuan global adalah sebagai berikut.

$$K = \frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 22.68 & 5.76 & -15.0 & 0 & -7.68 & -5.76 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} \end{matrix}$$

Karena $KQ = F$, maka

$$\frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{bmatrix} 22.68 & 5.76 & -15.0 & 0 & -7.68 & -5.76 & 0 & 0 \\ 5.76 & 4.32 & 0 & 0 & -5.76 & -4.32 & 0 & 0 \\ -15.0 & 0 & 15.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20.0 & 0 & -20.0 & 0 & 0 \\ -7.68 & -5.76 & 0 & 0 & 22.68 & 5.76 & -15 & 0 \\ -5.76 & 4.32 & 0 & -20.0 & 5.76 & 24.32 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -15.0 & 0 & 15.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 20,000 \\ 0 \\ 0 \\ -25,000 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Tinjau kembali gambar 4.2, pada gambar tersebut, hanya node 3, 5, dan 6 yang dapat melakukan pergeseran/*displacement*. Sehingga beberapa baris dan kolom yang tidak berkaitan bisa diabaikan, sehingga hanya tersisa matriks berikut.

$$\frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 \\ 0 & 22.68 & 5.76 \\ 0 & 5.76 & 24.32 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_3 \\ q_5 \\ q_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 20,000 \\ 0 \\ -25,000 \end{Bmatrix}$$

$$\frac{29.5 \times 10^6}{600} \cdot \begin{pmatrix} 15 & 0 & 0 \\ 0 & 22.68 & 5.76 \\ 0 & 5.76 & 24.32 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.375 \times 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 1.115 \times 10^6 & 2.832 \times 10^5 \\ 0 & 2.832 \times 10^5 & 1.196 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

Untuk mencari q_3 , q_5 , dan q_6 diperlukan invers matriks di atas.

$$\begin{pmatrix} 7.375 \times 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 1.115 \times 10^6 & 2.832 \times 10^5 \\ 0 & 2.832 \times 10^5 & 1.196 \times 10^6 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 20000 \\ 0 \\ -25000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.027 \\ 5.649 \times 10^{-3} \\ -0.022 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} q_3 \\ q_5 \\ q_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.027 \\ 5.649 \times 10^{-3} \\ -0.022 \end{pmatrix}$$

Untuk mencari tegangan/*stress*, menggunakan persamaan :

$$\sigma = \frac{E}{L} \{-c \quad -s \quad c \quad s\}q$$

$$\sigma_1 = \frac{29.5 \times 10^6}{40} \{-1 \quad 0 \quad 1 \quad 0\} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 27.12 \times 10^{-3} \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix}$$

Sehingga nilai $\sigma_1 = 20.000$ psi

$$\sigma_2 = \frac{29.5 \times 10^6}{30} \{0 \quad 1 \quad 0 \quad -1\} \begin{Bmatrix} 5.65 \times 10^{-3} \\ -22.25 \times 10^{-3} \\ -27.12 \times 10^{-3} \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{matrix} 5 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \end{matrix}$$

Sehingga nilai $\sigma_2 = -21.875$ psi

Untuk mencari reaksi tumpuan, menggunakan persamaan :

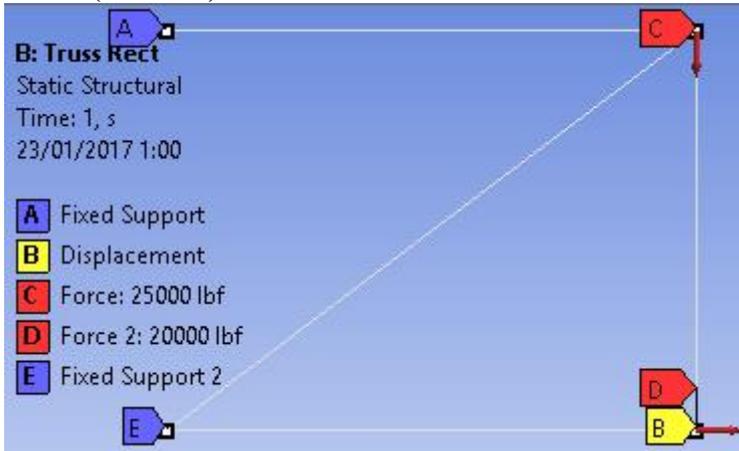
$$R = KQ$$

$$\begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_4 \\ R_7 \\ R_8 \end{Bmatrix} = \frac{29.5 \times 10^6}{600} \begin{bmatrix} 22.68 & 5.76 & -15.0 & 0 & -7.68 & -5.76 & 0 & 0 \\ 5.76 & 4.32 & 0 & 0 & -5.76 & -4.32 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & -20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -15.0 & 0 & 15.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 27.12 \times 10^{-3} \\ 0 \\ 5.65 \times 10^{-3} \\ -22.25 \times 10^{-3} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Sehingga reaksi pada tumpuan adalah sebagai berikut.

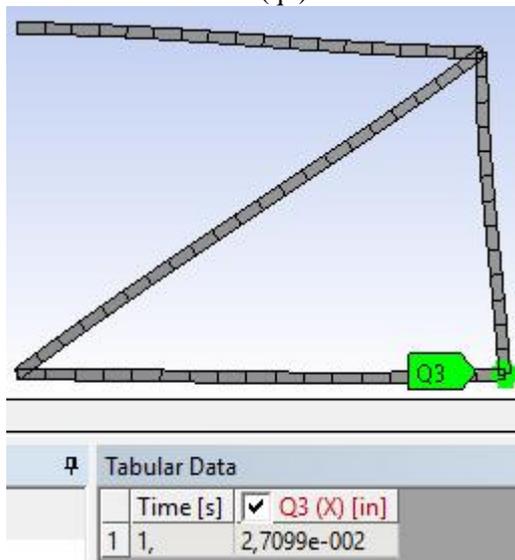
$$\begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_4 \\ R_7 \\ R_8 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -15,833.3 \\ 3,126 \\ 21,879 \\ -4,167 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

ANSYS (Simulasi)



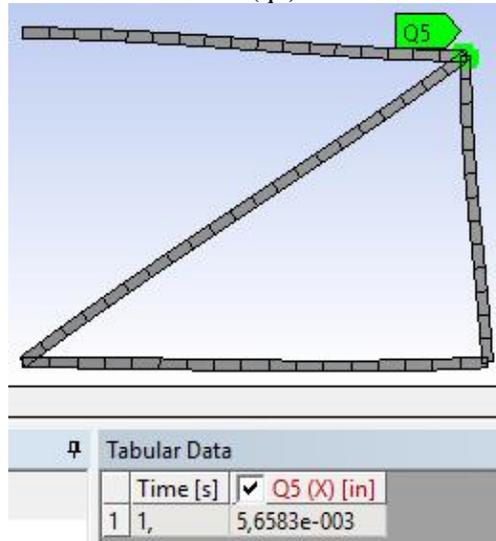
Gambar 4.7 Simulasi *truss* yang dikenai gaya vertikal dan horizontal

- *Displacement* node 2 sumbu x (q3)



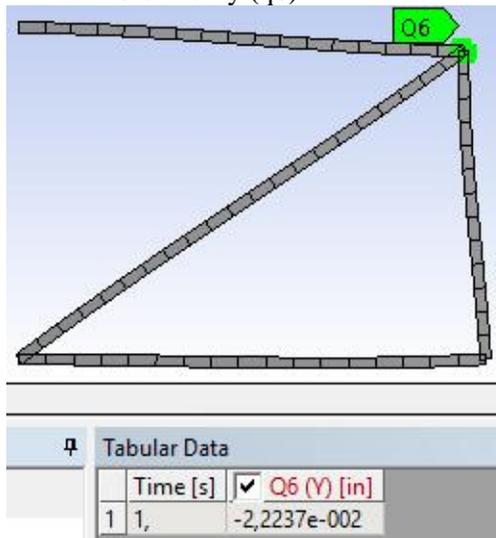
Gambar 4.8 *Displacement* q3 pada simulasi Ansys

- Displacement node 3 sumbu x (q5)



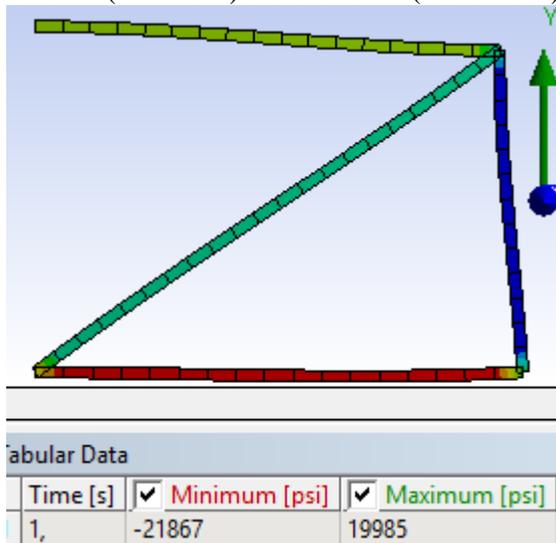
Gambar 4.9 Displacement q5 pada simulasi Ansys

- Displacement node 3 sumbu y (q6)



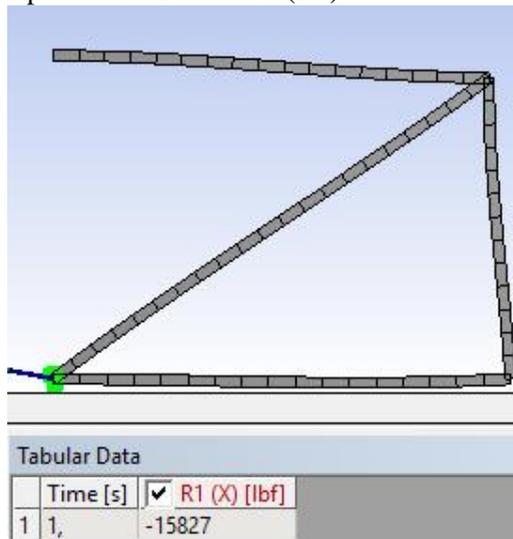
Gambar 4.10 Displacement q6 pada simulasi Ansys

- *Stress* elemen 2 (minimum) dan elemen 1 (maksimum)



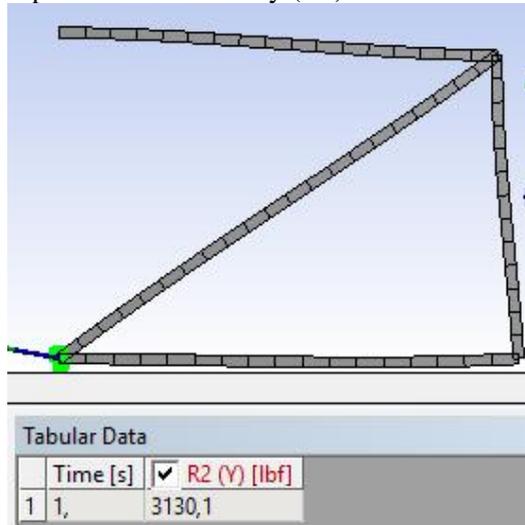
Gambar 4.11 *Stress* elemen 2 dan 1 pada simulasi Ansys

- Reaksi tumpuan node 1 sumbu x (R1)



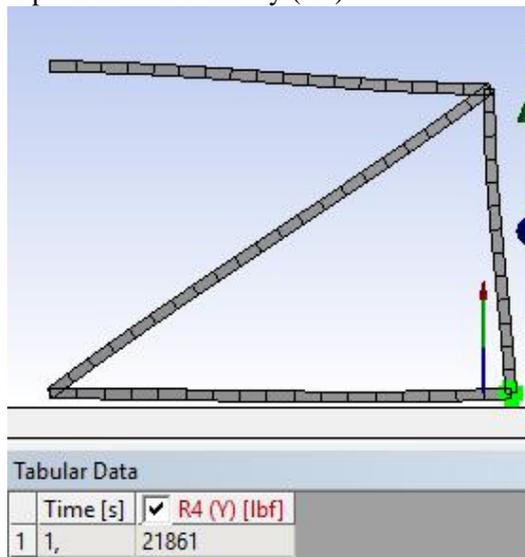
Gambar 4.12 Reaksi tumpuan R1 pada simulasi Ansys

- Reaksi tumpuan node 1 sumbu y (R2)



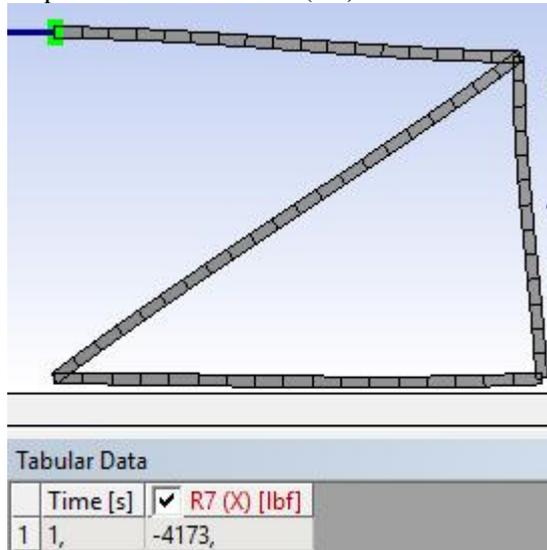
Gambar 4.13 Reaksi tumpuan R2 pada simulasi Ansys

- Reaksi tumpuan node 2 sumbu y (R4)



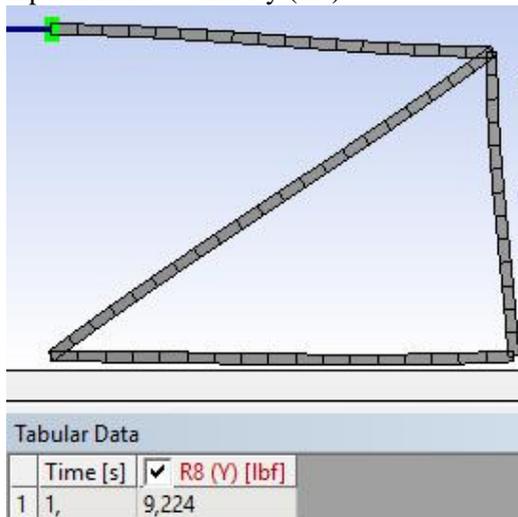
Gambar 4.14 Reaksi tumpuan R4 pada simulasi Ansys

- Reaksi tumpuan node 4 sumbu x (R7)



Gambar 4.15 Reaksi tumpuan R7 pada simulasi Ansys

- Reaksi tumpuan node 4 sumbu y (R8)



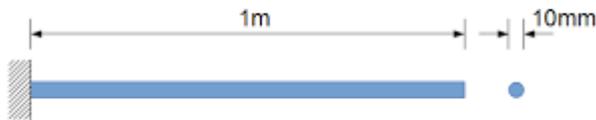
Gambar 4.16 Reaksi tumpuan R8 pada simulasi Ansys

Nilai *displacement*, tegangan, dan reaksi tumpuan pada metode matematis maupun simulasi Ansys memberikan nilai yang mendekati, perbandingan nilai-nilai tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.3 Perbandingan nilai matematis dan simulasi pada *truss*

Hasil	Metode		Selisih	Error (%)
	Matematis	Simulasi		
q ₃	0,027	0,027099	-9,9E-05	-0,36667
q ₅	0,005649	0,005658	-9,3E-06	-0,16463
q ₆	-0,022	-0,02224	0,000237	-1,07727
σ ₁	20000	19985	15	0,075
σ ₂	-21875	-21867	-8	0,036571
R ₁	-15833,3	-15827	-6,3	0,03979
R ₂	3126	3130,1	-4,1	-0,13116
R ₄	21,879	21861	-21839,1	0,08227
R ₇	-4167	-4173	6	-0,14399
R ₈	0	9,224	-9,224	-

4.1.3. Validasi Modal Analysis



Gambar 4.17 Contoh *circular beam*

Misalkan sebuah *beam* dengan penampang lingkaran berdiameter 10 mm, memiliki sifat :

- Luas penampang (A) = 7.8537e-5m
- Momen Inersia (I) = 4.909e-10m⁴
- Massa jenis (rho) = 2700kg/m³
- Modulus Young (E) = 72 Gpa
- Kecepatan gravitasi = 9.81 m/s²

Matematis

Menurut *Roark's Formula for Stress and Strain*.
Persamaan untuk mencari frekuensi natural dari tiap-tiap mode

bergantung pada jenis tumpuannya. Untuk uniform *beam* yang memiliki tumpuan *fixed* dan *free* (cantilever), persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$f_n = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}$$

Dengan :

f_n : frekuensi natural pada mode ke-n, Hz

K_n : Konstanta pada mode ke-n

w : Beban per unit panjang ($A \cdot \rho \cdot g$) N/m

Dengan memasukkan nilai-nilai yang diketahui, diperoleh

hasil :

$$\frac{K_n}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{w \cdot l^4}} = 2.055 K_n$$

Nilai K_n berubah-ubah pada tiap-tiap modes, dengan menggunakan tabel dari Roark, akan diperoleh frekuensi natural tiap-tiap mode.

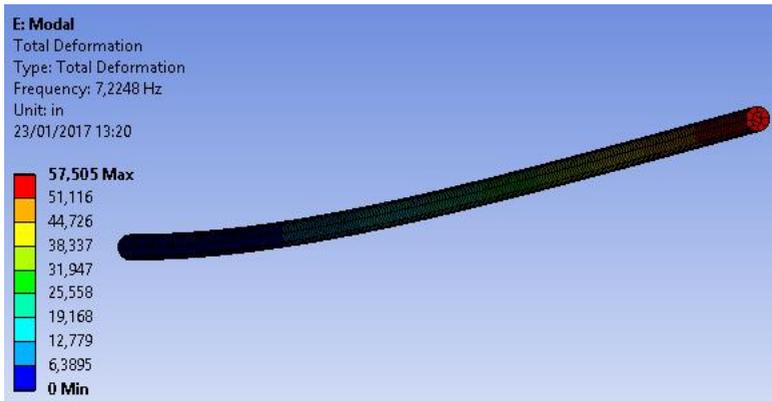
Tabel 4.4 Nilai K_n pada mode 1-5

Mode	K_n	Nodal position/ l					
1	3.52	0.0					
2	22.0	0.0	0.783				
3	61.7	0.0	0.504	0.868			
4	121	0.0	0.358	0.644	0.905		
5	200	0.0	0.279	0.500	0.723	0.926	

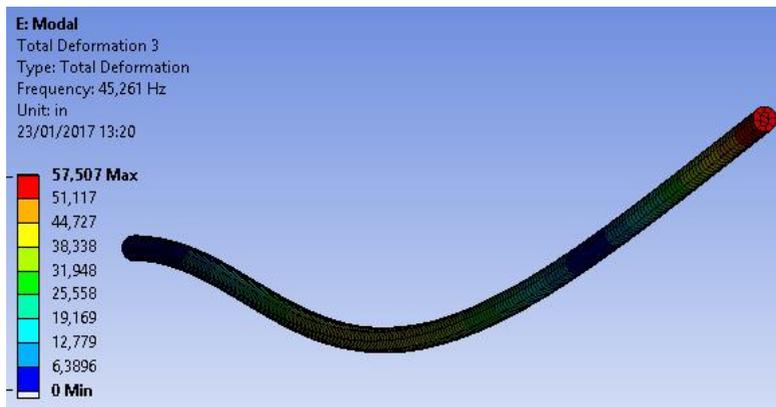
Tabel 4.5 Nilai frekuensi natural setelah memasukkan K_n

Mode	K_n	F_n (Hz)
1	3.52	7.234
2	22	45.21
3	61.7	126.794
4	121	248.655
5	200	411

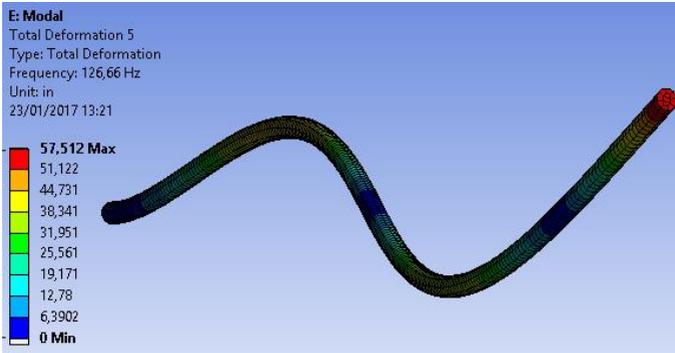
ANSYS (Simulasi)



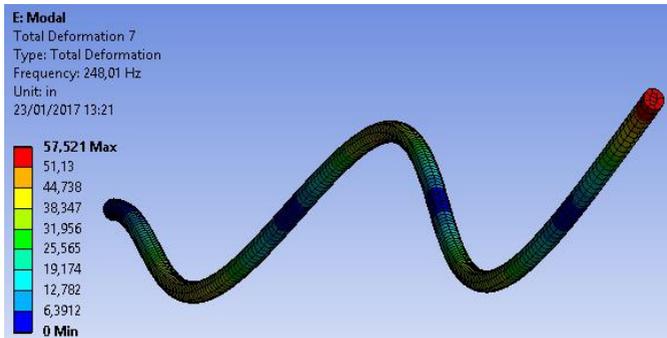
Gambar 4.18 Deformasi mode-1 pada Ansys



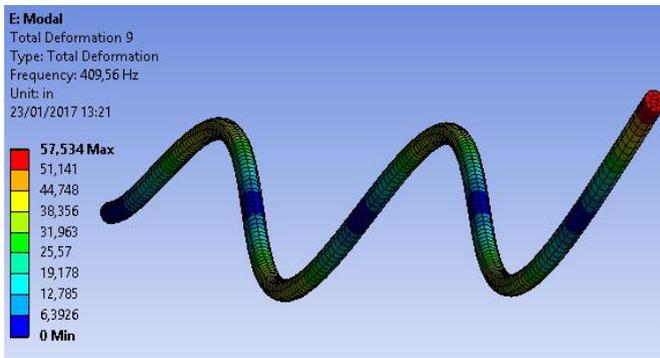
Gambar 4.19 Deformasi mode-3 pada Ansys



Gambar 4.20 Deformasi mode-5 pada Ansys



Gambar 4.21 Deformasi mode-7 pada Ansys



Gambar 4.22 Deformasi mode-9 pada Ansys

Pada Ansys, mode 1 dan 2, 3 dan 4, 5 dan 6, dan seterusnya memiliki frekuensi yang serupa, hal ini dikarenakan Ansys mencari dua mode sejenis dalam koordinat X dan Y. Perbandingan frekuensi pada metode matematis dan simulasi disajikan pada tabel berikut.

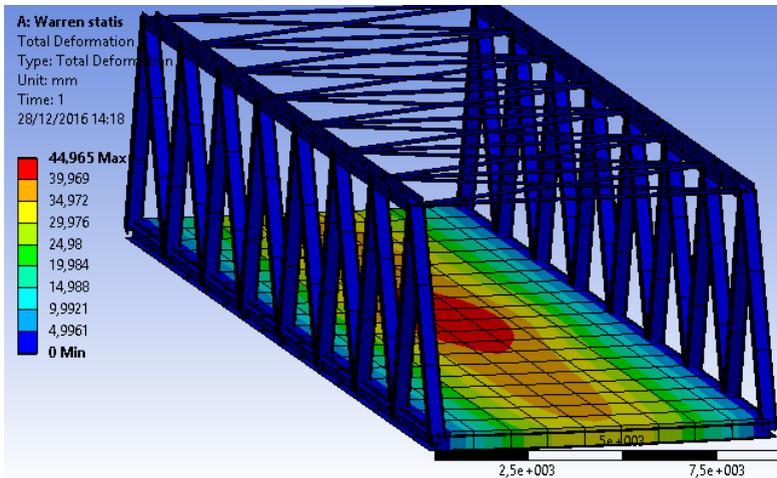
Tabel 4.6 Perbandingan nilai fn pada metode matematis dan simulasi

Mode	Frekuensi Natural (Hz)		Selisih	Error (%)
	Matematis	Simulasi		
1	7,234	7,2248	0,0092	0,127177
2	7,234	7,2262	0,0078	0,107824
3	45,21	45,261	-0,051	-0,11281
4	45,21	45,27	-0,06	-0,13271
5	126,794	126,66	0,134	0,105683
6	126,794	126,69	0,104	0,082023
7	248,655	248,01	0,645	0,259396
8	248,655	248,06	0,595	0,239287
9	411	409,56	1,44	0,350365
10	411	409,64	1,36	0,3309

4.2. Verifikasi Kelayakan Jembatan Menurut SNI

4.2.1. Verifikasi Kelayakan berdasarkan Lendutan Maksimum

Pada modul *static structural*, telah diuji jembatan dengan beban yang ditentukan dalam SNI (BTR dan BGT). Lendutan maksimum dapat diperoleh dengan memasukkan output berupa deformasi total. Pada geometri jembatan tersebut akan tampak skala warna biru (minimum) hingga merah (maksimum) yang mewakili nilai deformasi dalam satuan mm.



Gambar 4.23 Deformasi total yang dialami jembatan

Object Name	Total Deformation	Directional Deformation
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Directional Deformation
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Orientation	Y Axis	
Coordinate System	Global Coordinate System	
Results		
Minimum	0. mm	-44.961 mm
Maximum	44.965 mm	1.0399e-003 mm
Minimum Occurs On	Bawah	beton
Maximum Occurs On	beton	

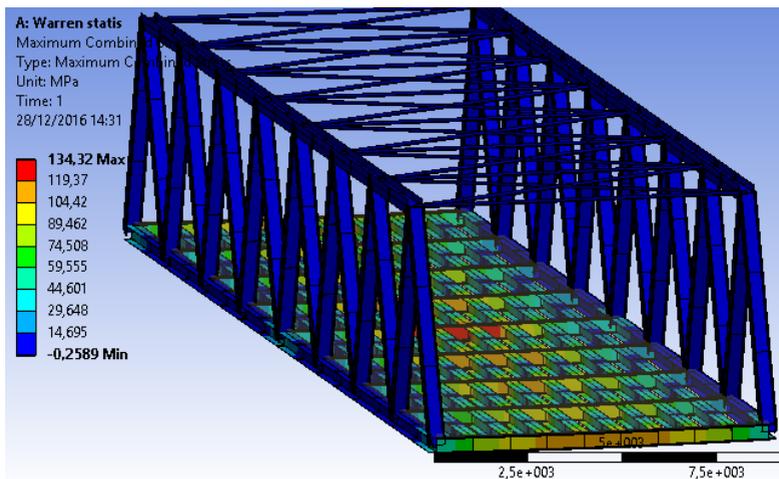
Gambar 4.24 Hasil deformasi total dan deformasi arah Y

Dari data-data di atas, dapat disimpulkan bahwa lendutan maksimum yang dialami jembatan adalah 44.965 mm, sedangkan

lendutan maksimum yang diijinkan adalah $L/800 = 50$ mm. Berarti desain ini masih dalam batas ijin.

4.2.2. Verifikasi Kelayakan Berdasarkan Tegangan Maksimum

Hampir sama dengan verifikasi sebelumnya, namun output yang akan dihasilkan adalah tegangan (*stress*). Gunakan *beam-tool*, masukkan *output direct stress* dan *maximum combined stress*. Pada verifikasi ini, hanya tegangan baja yang akan dijadikan acuan dalam menentukan kelayakan. Pada geometri jembatan tersebut akan tampak skala warna biru (minimum) hingga merah (maksimum) yang mewakili nilai deformasi dalam satuan mm.



Gambar 4.25 Tegangan kombinasi maksimum yang dialami baja

Dalam angka, nilai tegangan langsung dan kombinasi disajikan pada gambar berikut.

Object Name	Direct Stress	Maximum Combined Stress
State	Solved	
Definition		
Type	Direct Stress	Maximum Combined Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Results		
Minimum	-0.66407 MPa	-0.2589 MPa
Maximum	21.469 MPa	134.32 MPa
Minimum Occurs On	Bawah	
Maximum Occurs On	Bawah	

Gambar 4.26 Hasil tegangan pada baja

Dari data-data di atas, dapat disimpulkan bahwa tegangan maksimum yang dialami jembatan adalah 134.32 MPa.

4.3. Modal Analysis

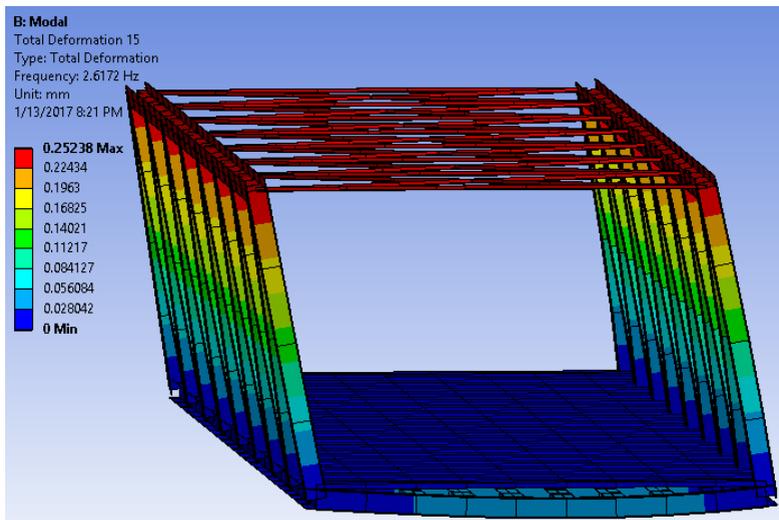
Hasil simulasi *modal analysis* pada struktur jembatan ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4.7 Mode dan frekuensi yang timbul pada *modal analysis*.

Mode	Frekuensi (Hz)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0.23226
8	0.64153
9	0.65685

10	1.26
11	1.3479
12	1.8059
13	2.0859
14	2.1059
15	2.6172
16	dst.

Analisis dihentikan pada mode ke-15 karena pada mode tersebut, struktur baja berguncang secara penuh. Mode inilah yang dijadikan nilai frekuensi natural dengan nilai $f = 2.6172$ Hz.

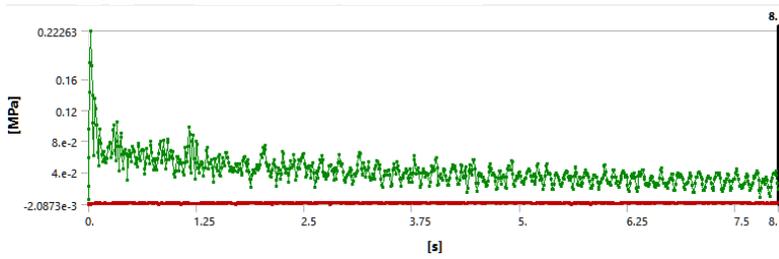


Gambar 4.27 Guncangan yang terjadi pada mode ke-15

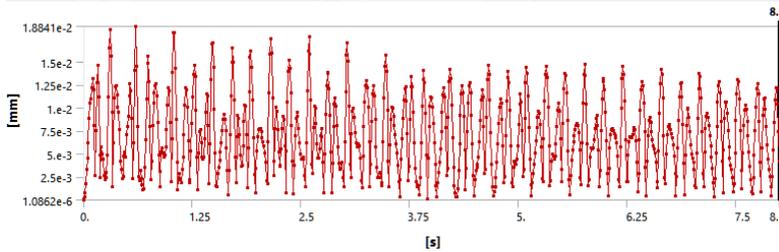
4.4. Respon Jembatan dengan 1 Truk Berjalan

4.4.1. 1 Truk berkecepatan 5 m/s

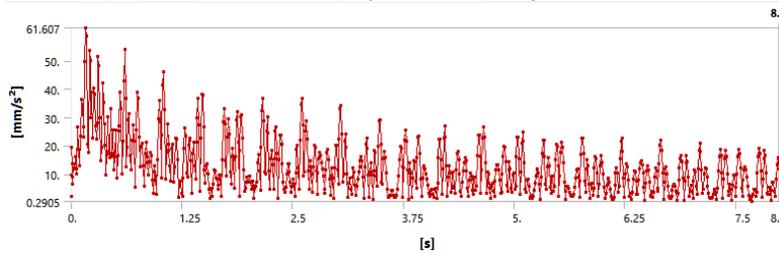
Tegangan, deformasi, akselerasi, dan frekuensi yang dialami jembatan jika dikenai beban 1 truk berkecepatan 5 m/s disajikan pada gambar-gambar berikut.



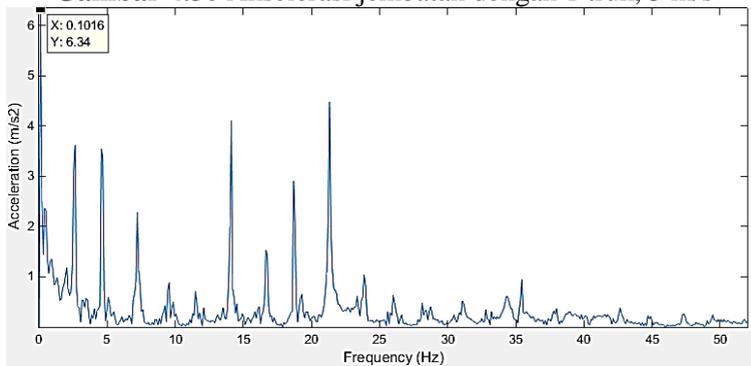
Gambar 4.28 Tegangan jembatan dengan 1 truk, 5 m/s



Gambar 4.29 Deformasi jembatan dengan 1 truk, 5 m/s



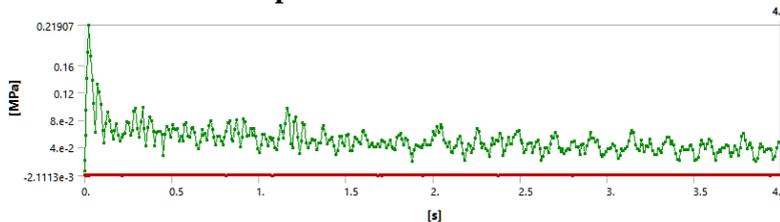
Gambar 4.30 Akselerasi jembatan dengan 1 truk, 5 m/s



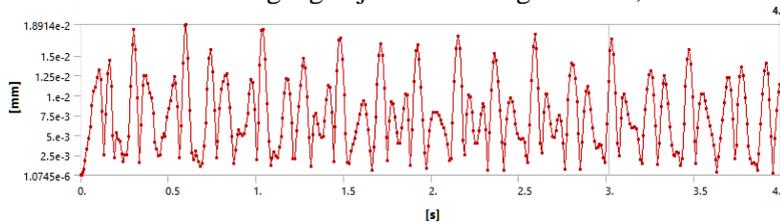
Gambar 4.31 Frekuensi jembatan dengan 1 truk, 5 m/s

Dengan beban 1 truk berkecepatan 5 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,22263 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 61,607 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 12,60309 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 0,1016 Hz dan 21,33 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

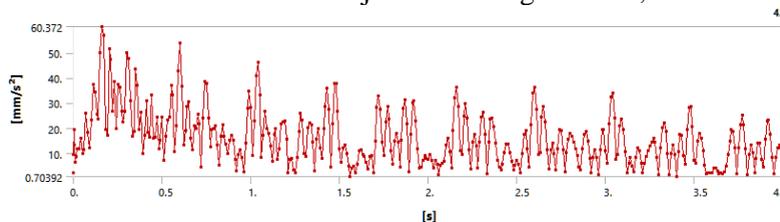
4.4.2. 1 Truk berkecepatan 10 m/s



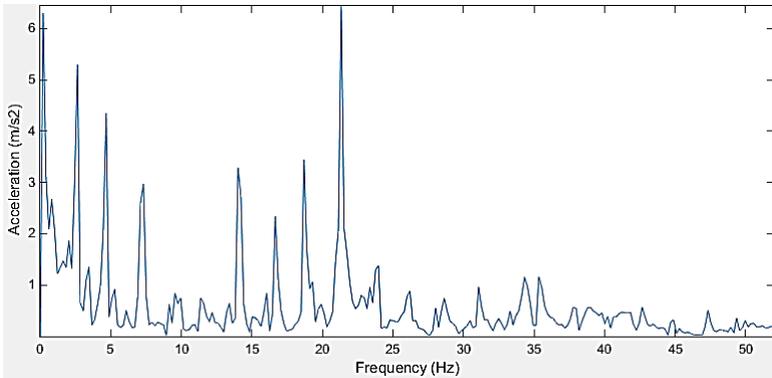
Gambar 4.32 Tegangan jembatan dengan 1 truk, 10 m/s



Gambar 4.33 Deformasi jembatan dengan 1 truk, 10 m/s



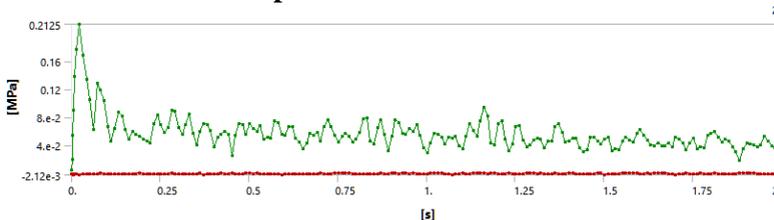
Gambar 4.34 Akselerasi jembatan dengan 1 truk, 10 m/s



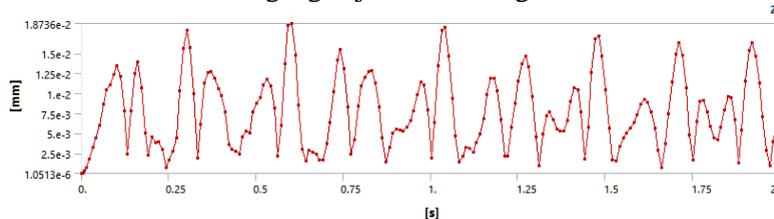
Gambar 4.35 Frekuensi jembatan dengan 1 truk, 10 m/s

Dengan beban 1 truk berkecepatan 10 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,21907 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar $60,372 \text{ mm/s}^2$. Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar $15,877 \text{ mm/s}^2$. Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 21,33 Hz dan 0,2031 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

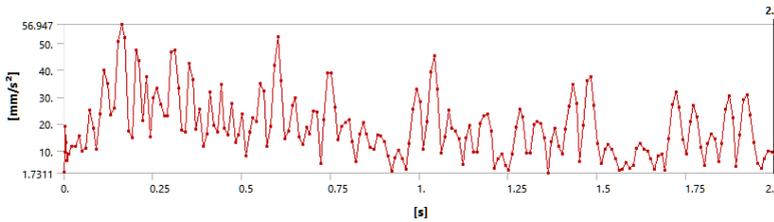
4.4.3. 1 Truk berkecepatan 20 m/s



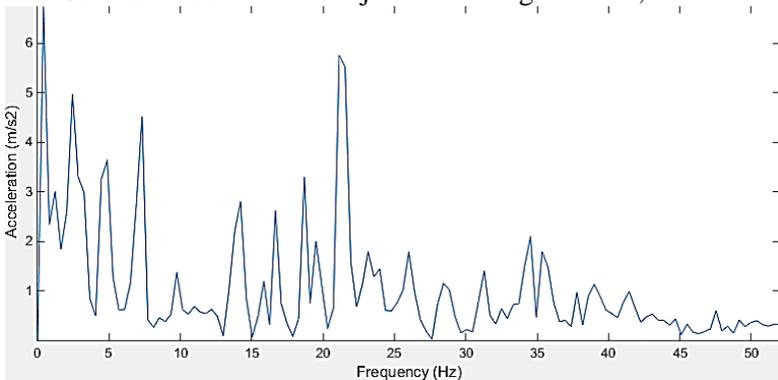
Gambar 4.36 Tegangan jembatan dengan 1 truk, 20 m/s



Gambar 4.37 Deformasi jembatan dengan 1 truk, 20 m/s



Gambar 4.38 Akselerasi jembatan dengan 1 truk, 20 m/s

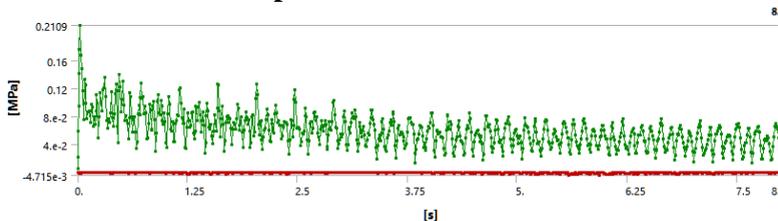


Gambar 4.39 Frekuensi jembatan dengan 1 truk, 20 m/s

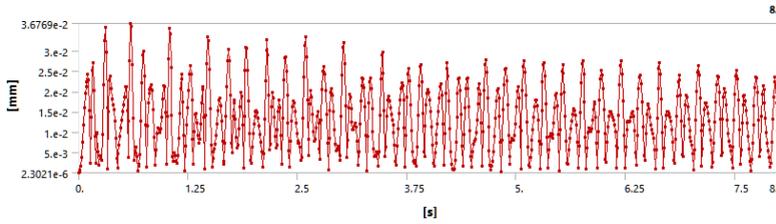
Dengan beban 1 truk berkecepatan 20 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2125 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 56,947 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 18,8053 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 0,4063 Hz dan 21,13 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

4.5. Respon Jembatan dengan 2 Truk Berjalan

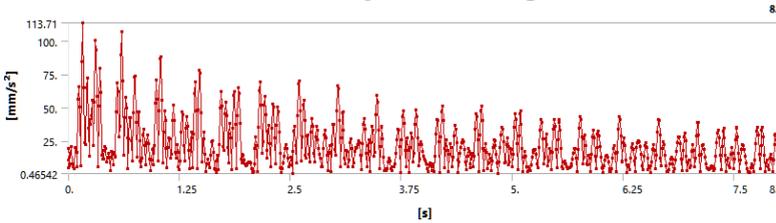
4.5.1. 2 Truk berkecepatan 5 m/s



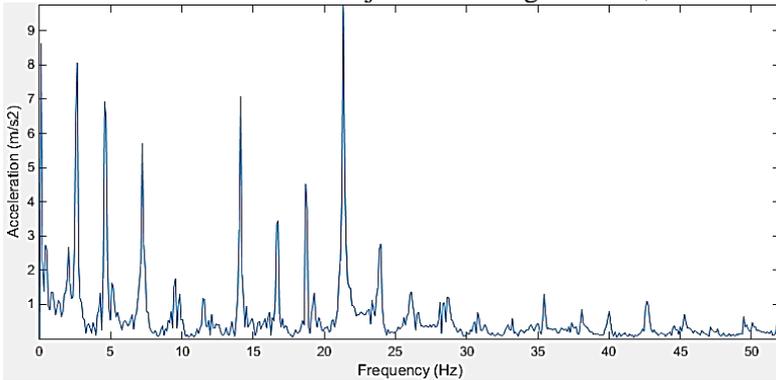
Gambar 4.40 Tegangan jembatan dengan 2 truk, 5 m/s



Gambar 4.41 Deformasi jembatan dengan 2 truk, 5 m/s



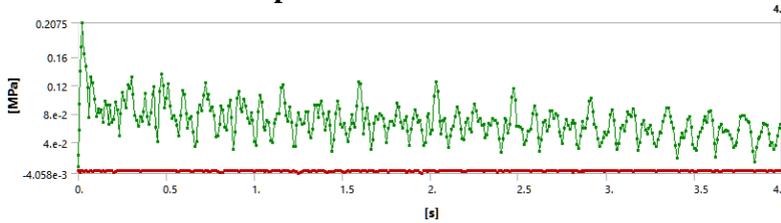
Gambar 4.42 Akselerasi jembatan dengan 2 truk, 5 m/s



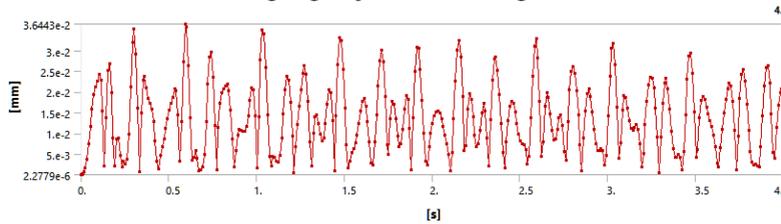
Gambar 4.43 Frekuensi jembatan dengan 2 truk, 5 m/s

Dengan beban 2 truk berkecepatan 5 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2109 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 113,71 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 21,90586 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 21,33 Hz dan 0,1016 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

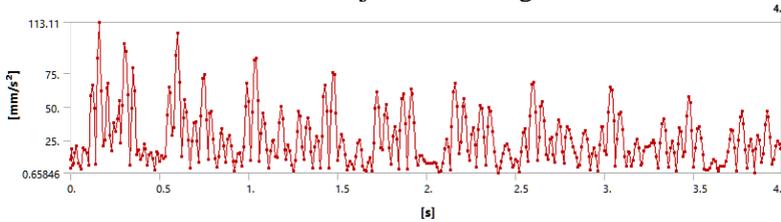
4.5.2. 2 Truk berkecepatan 10 m/s



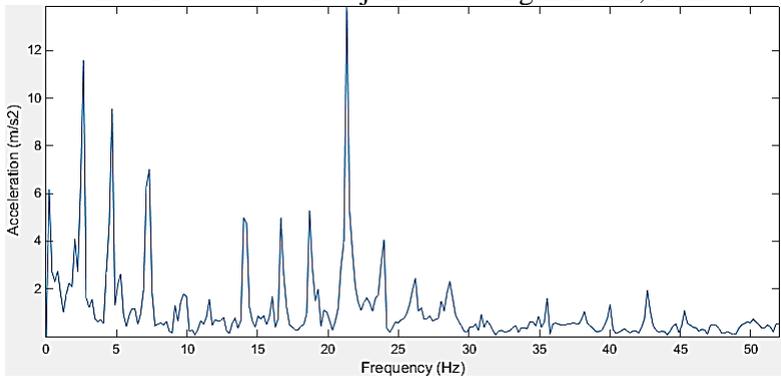
Gambar 4.44 Tegangan jembatan dengan 2 truk, 10 m/s



Gambar 4.45 Deformasi jembatan dengan 2 truk, 10 m/s



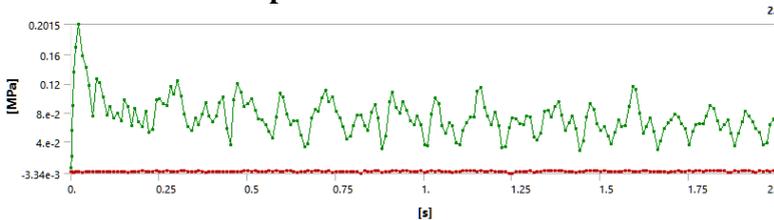
Gambar 4.46 Akselerasi jembatan dengan 2 truk, 10 m/s



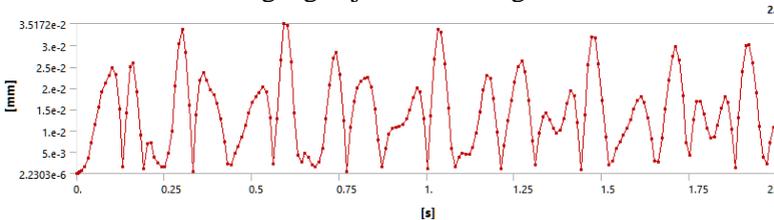
Gambar 4.47 Frekuensi jembatan dengan 2 truk, 10 m/s

Dengan beban 2 truk berkecepatan 10 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2075 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 113,11 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 26,15907 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 21,33 Hz dan **2,641 Hz**. Pada variasi ini, terdapat frekuensi yang cukup mendekati frekuensi natural (memiliki potensi beresonansi).

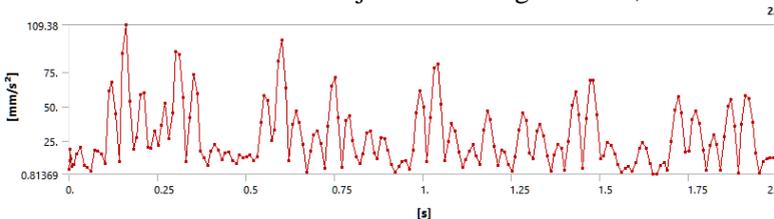
4.5.3. 2 Truk berkecepatan 20 m/s



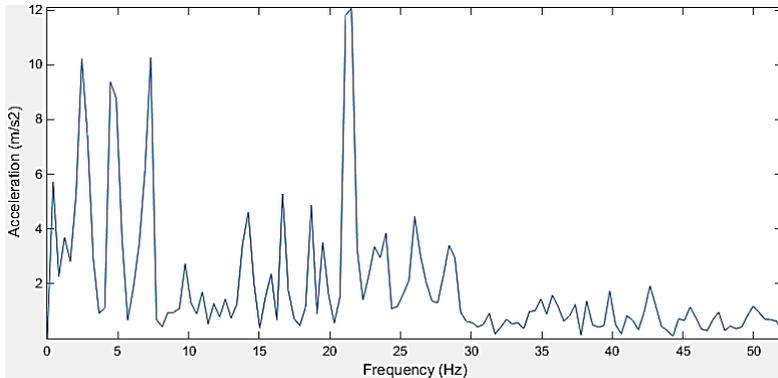
Gambar 4.48 Tegangan jembatan dengan 2 truk, 20 m/s



Gambar 4.49 Deformasi jembatan dengan 2 truk, 20 m/s



Gambar 4.50 Akselerasi jembatan dengan 2 truk, 20 m/s

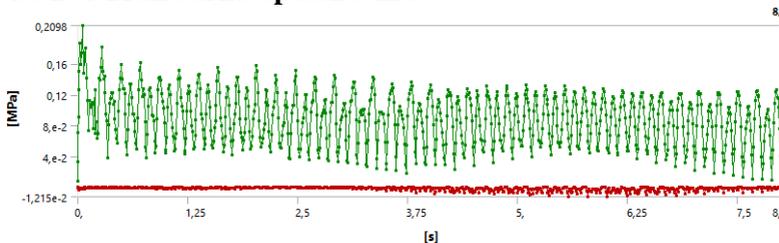


Gambar 4.51 Frekuensi jembatan dengan 2 truk, 20 m/s

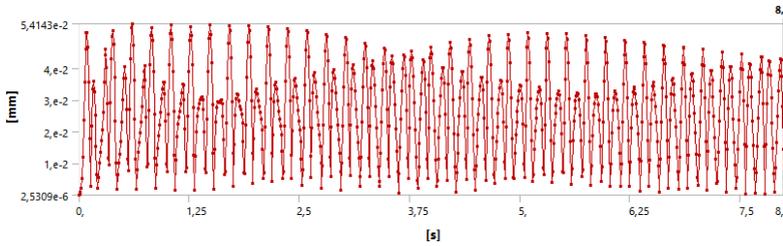
Dengan beban 2 truk berkecepatan 20 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2015 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar $109,38 \text{ mm/s}^2$. Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar $27,44753 \text{ mm/s}^2$. Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 31,53 Hz dan 7,313 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

4.6. Respon Jembatan dengan 4 Truk Berjalan

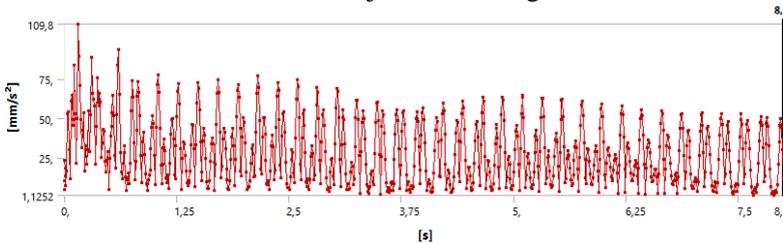
4.6.1. 4 Truk berkecepatan 5 m/s



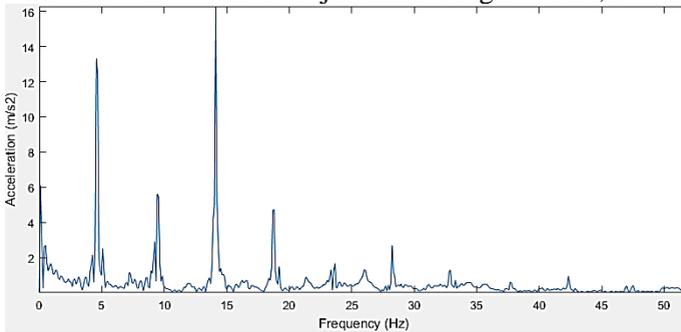
Gambar 4.52 Tegangan jembatan dengan 4 truk, 5 m/s



Gambar 4.53 Deformasi jembatan dengan 4 truk, 5 m/s



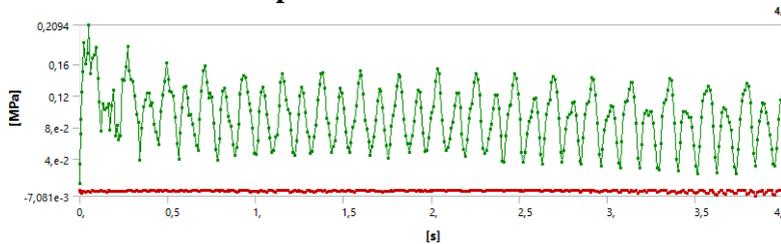
Gambar 4.54 Akselerasi jembatan dengan 4 truk, 5 m/s



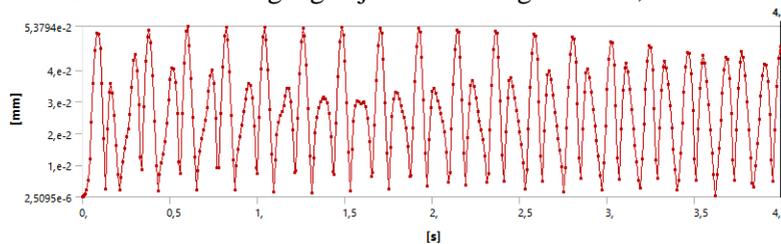
Gambar 4.55 Frekuensi jembatan dengan 4 truk, 5 m/s

Dengan beban 4 truk berkecepatan 5 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2098 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 109,8 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 28,92358 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 14,12 Hz dan 4,57 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

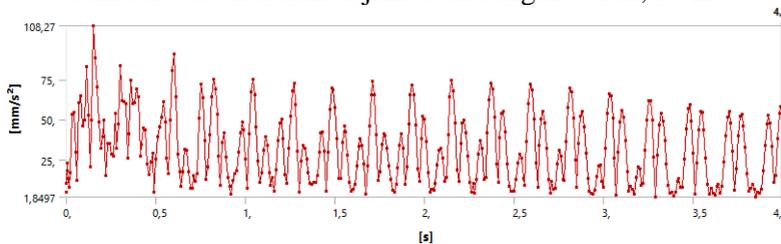
4.6.2. 4 Truk berkecepatan 10 m/s



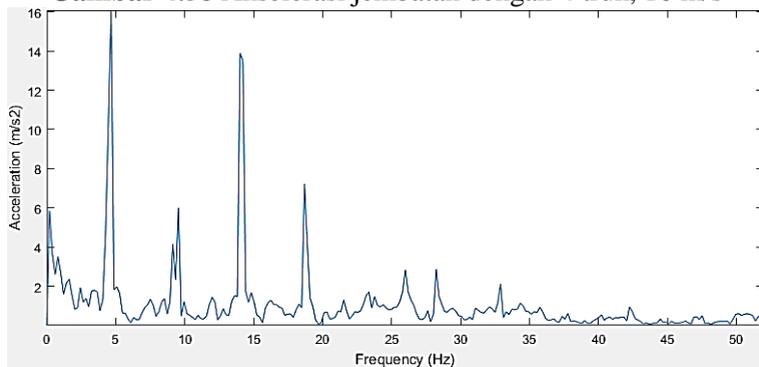
Gambar 4.56 Tegangan jembatan dengan 4 truk, 10 m/s



Gambar 4.57 Deformasi jembatan dengan 4 truk, 10 m/s



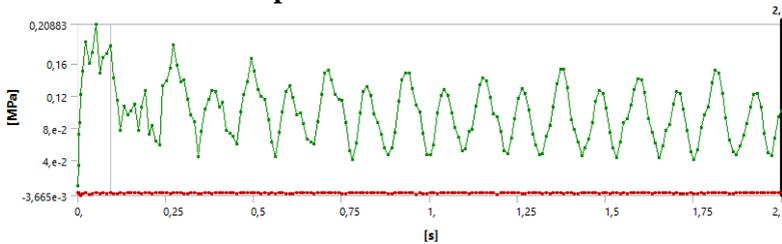
Gambar 4.58 Akselerasi jembatan dengan 4 truk, 10 m/s



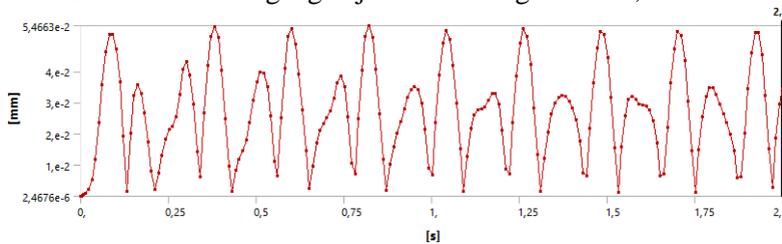
Gambar 4.59 Frekuensi jembatan dengan 4 truk, 10 m/s

Dengan beban 4 truk berkecepatan 10 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2094 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 108,27 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 32,16101 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 4,672 Hz dan 14,02 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

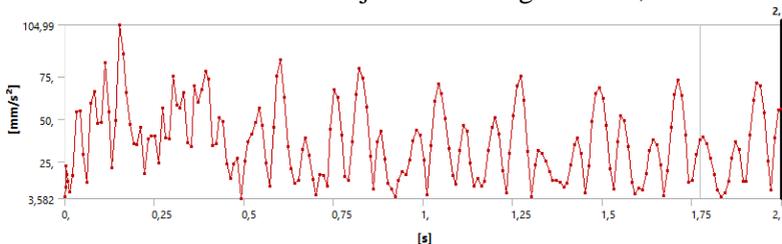
4.6.3. 4 Truk berkecepatan 20 m/s



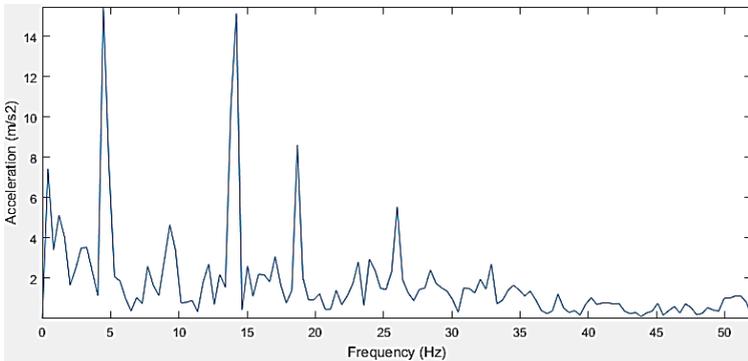
Gambar 4.60 Tegangan jembatan dengan 4 truk, 20 m/s



Gambar 4.61 Deformasi jembatan dengan 4 truk, 20 m/s



Gambar 4.62 Akselerasi jembatan dengan 4 truk, 20 m/s

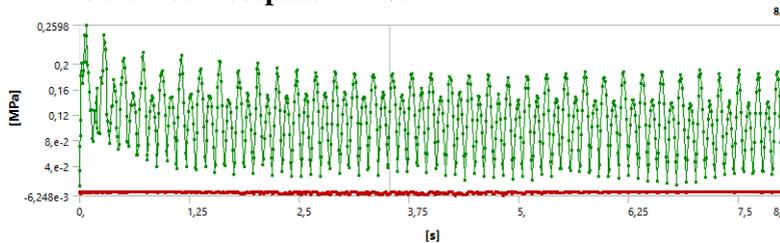


Gambar 4.63 Frekuensi jembatan dengan 4 truk, 20 m/s

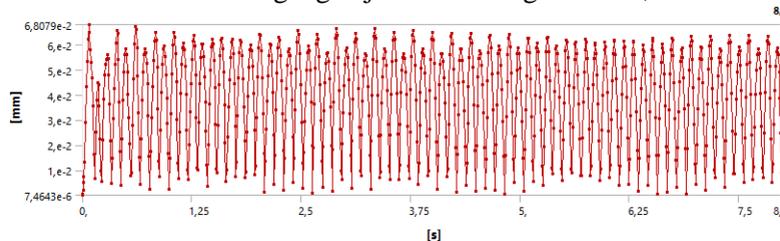
Dengan beban 4 truk berkecepatan 20 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,20883 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 104,99 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 35,85406 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 4,469 Hz dan 14,22 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

4.7. Respon Jembatan dengan 6 Truk Berjalan

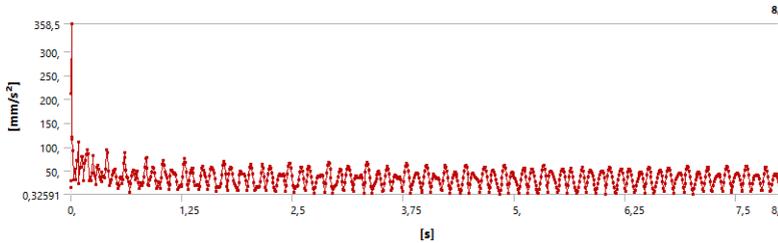
4.7.1. 6 truk berkecepatan 5 m/s



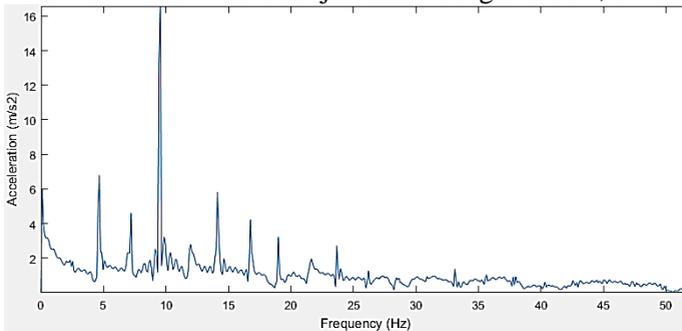
Gambar 4.64 Tegangan jembatan dengan 6 truk, 5 m/s



Gambar 4.65 Deformasi jembatan dengan 6 truk, 5 m/s



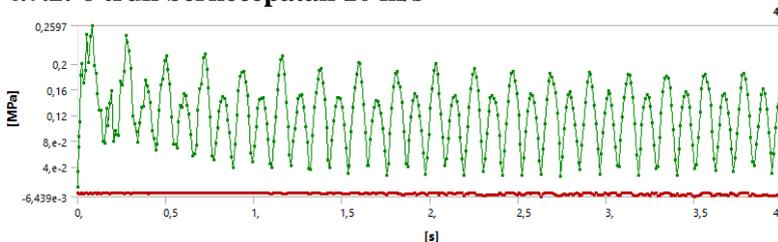
Gambar 4.66 Akselerasi jembatan dengan 6 truk, 5 m/s



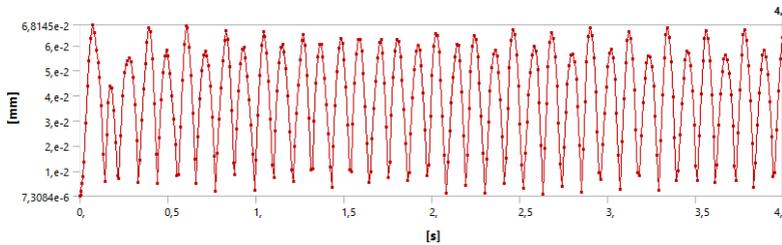
Gambar 4.67 Frekuensi jembatan dengan 6 truk, 5 m/s

Dengan beban 6 truk berkecepatan 5 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2598 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 358,5 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 35,51284 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,547 Hz dan 4,672 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

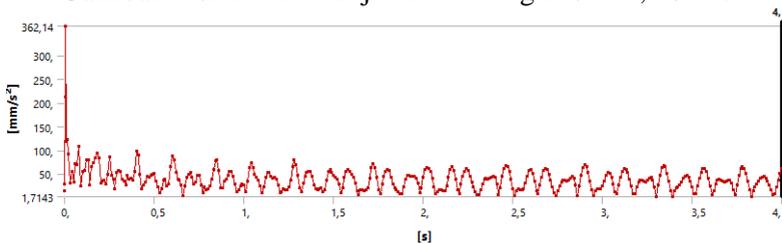
4.7.2. 6 truk berkecepatan 10 m/s



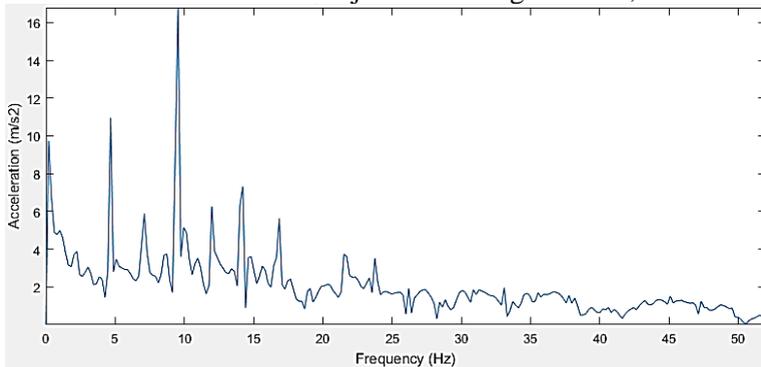
Gambar 4.68 Tegangan jembatan dengan 6 truk, 10 m/s



Gambar 4.69 Deformasi jembatan dengan 6 truk, 10 m/s



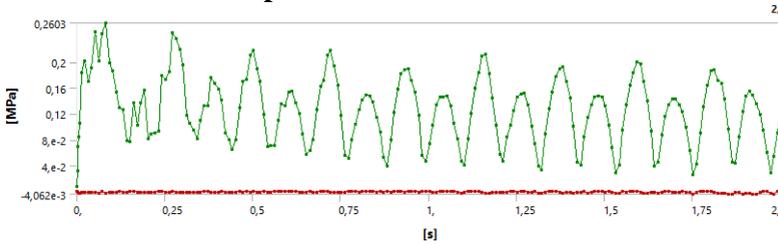
Gambar 4.70 Akselerasi jembatan dengan 6 truk, 10 m/s



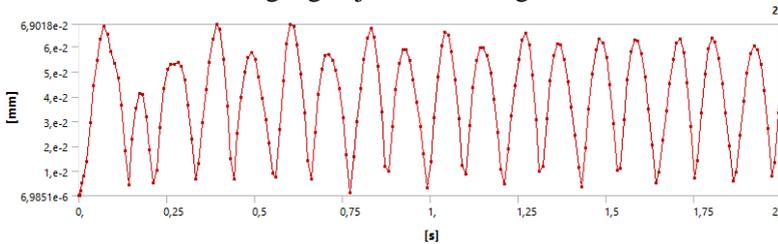
Gambar 4.71 Frekuensi jembatan dengan 6 truk, 10 m/s

Dengan beban 6 truk berkecepatan 10 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2597 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 362,14 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 38,57242 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,547 Hz dan 4,672 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

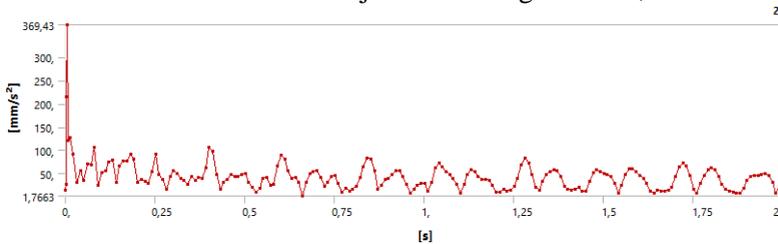
4.7.3. 6 truk berkecepatan 20 m/s



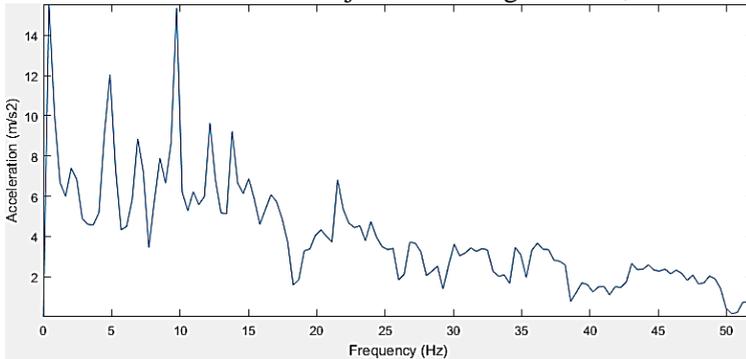
Gambar 4.72 Tegangan jembatan dengan 6 truk, 20 m/s



Gambar 4.73 Deformasi jembatan dengan 6 truk, 20 m/s



Gambar 4.74 Akselerasi jembatan dengan 6 truk, 20 m/s

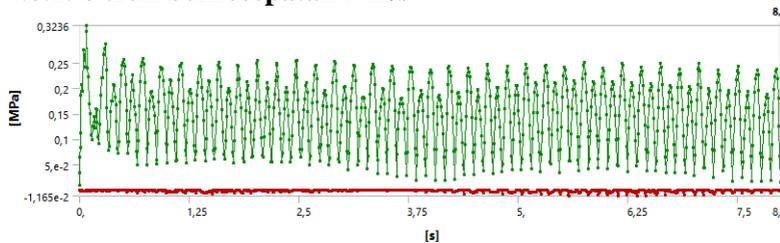


Gambar 4.75 Frekuensi jembatan dengan 6 truk, 20 m/s

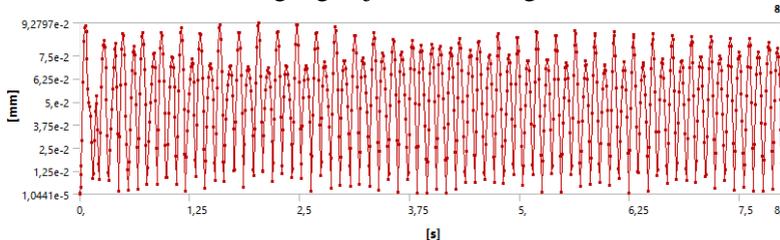
Dengan beban 6 truk berkecepatan 20 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,2603 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 369,43 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 43,56972 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 0,4063 Hz dan 9,75 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

4.8. Respon Jembatan dengan 8 Truk Berjalan

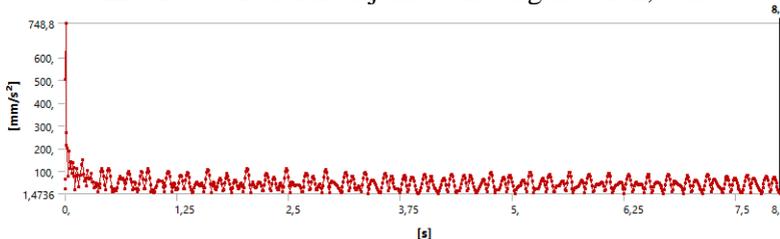
4.8.1. 8 truk berkecepatan 5 m/s



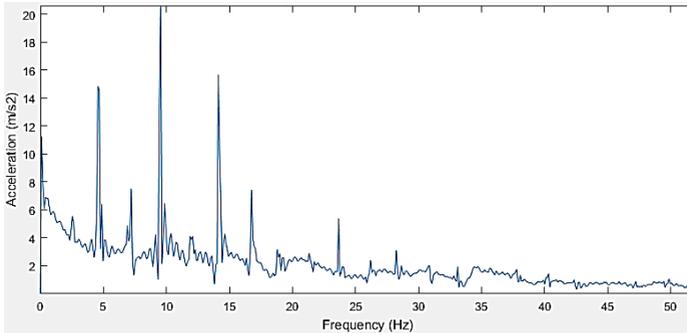
Gambar 4.76 Tegangan jembatan dengan 8 truk, 5 m/s



Gambar 4.77 Deformasi jembatan dengan 8 truk, 5 m/s



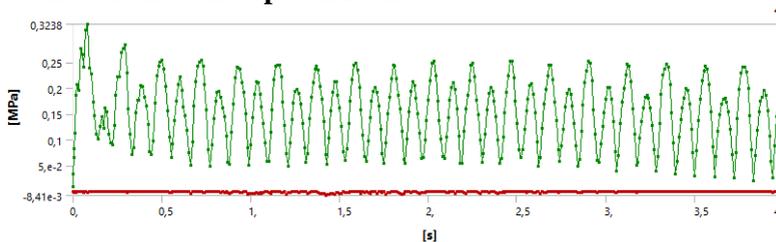
Gambar 4.78 Akselerasi jembatan dengan 8 truk, 5 m/s



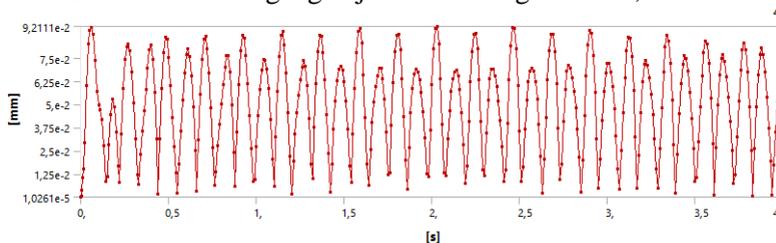
Gambar 4.79 Frekuensi jembatan dengan 8 truk, 5 m/s

Dengan beban 8 truk berkecepatan 5 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,3236 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 748,8 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 49,08276 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,547 Hz dan 14,12 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

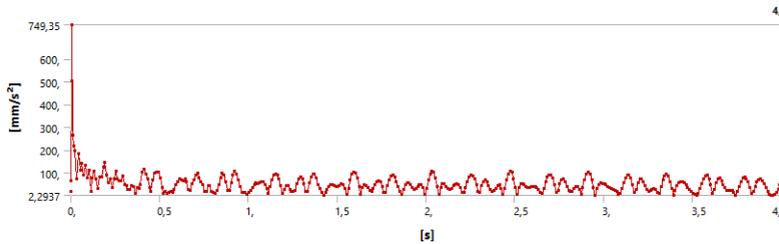
4.8.2. 8 truk berkecepatan 10 m/s



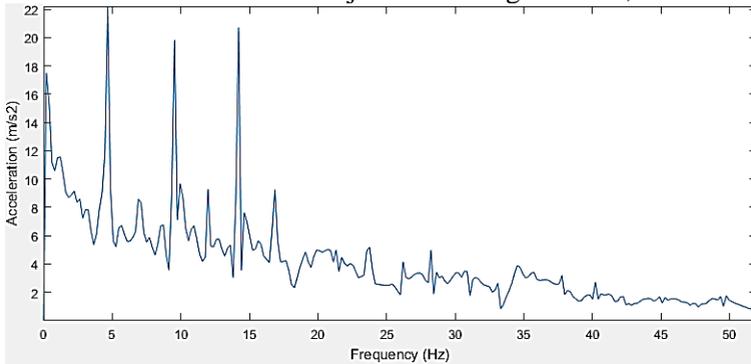
Gambar 4.80 Tegangan jembatan dengan 8 truk, 10 m/s



Gambar 4.81 Deformasi jembatan dengan 8 truk, 10 m/s



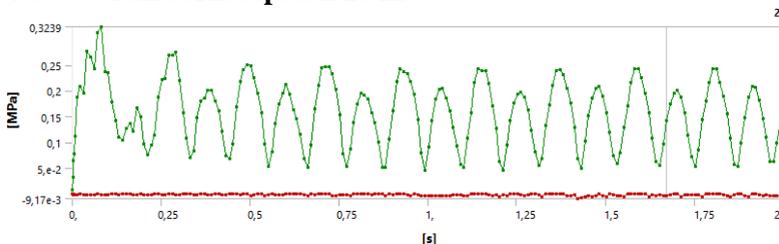
Gambar 4.82 Akselerasi jembatan dengan 8 truk, 10 m/s



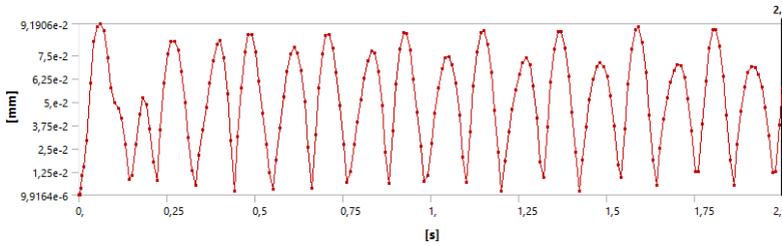
Gambar 4.83 Frekuensi jembatan dengan 8 truk, 10 m/s

Dengan beban 8 truk berkecepatan 10 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,3238 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar $749,35 \text{ mm/s}^2$. Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar $54,312 \text{ mm/s}^2$. Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 4,672 Hz dan 14,22 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

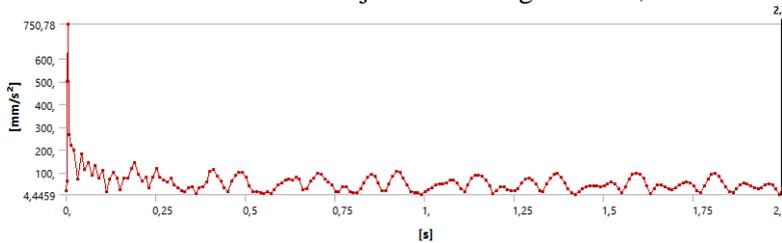
4.8.3. 8 truk berkecepatan 20 m/s



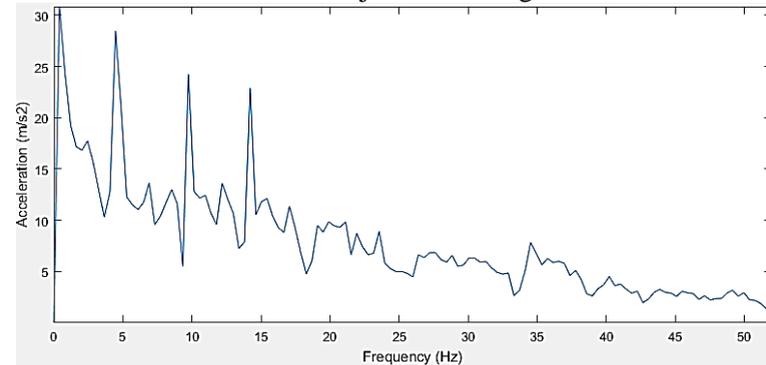
Gambar 4.84 Tegangan jembatan dengan 8 truk, 20 m/s



Gambar 4.85 Deformasi jembatan dengan 8 truk, 20 m/s



Gambar 4.86 Akselerasi jembatan dengan 8 truk, 20 m/s

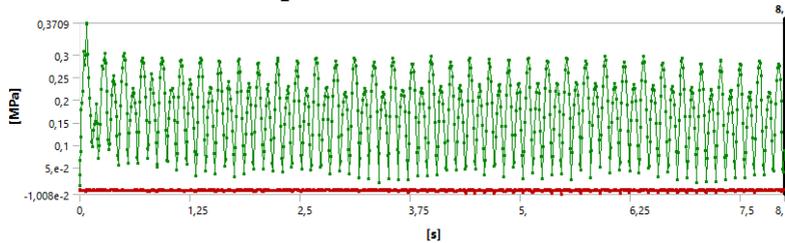


Gambar 4.87 Frekuensi jembatan dengan 8 truk, 20 m/s

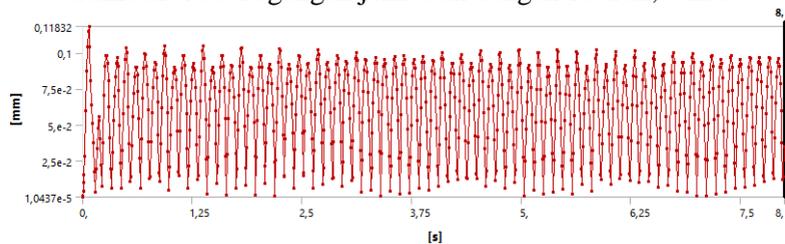
Dengan beban 8 truk berkecepatan 20 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,3239 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 750,78 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 61,43412 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 0,4063 Hz dan 4,469 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

4.9. Respon Jembatan dengan 10 Truk Berjalan

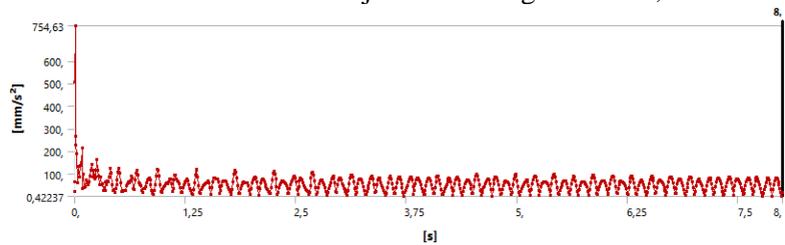
4.9.1. 10 truk berkecepatan 5 m/s



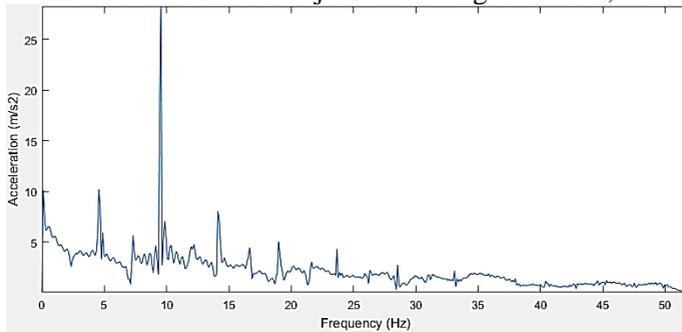
Gambar 4.88 Tegangan jembatan dengan 10 truk, 5 m/s



Gambar 4.89 Deformasi jembatan dengan 10 truk, 5 m/s



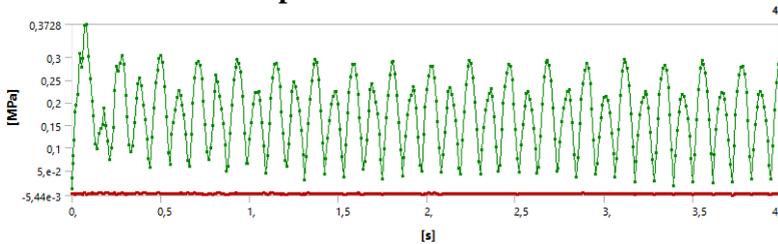
Gambar 4.90 Akselerasi jembatan dengan 10 truk, 5 m/s



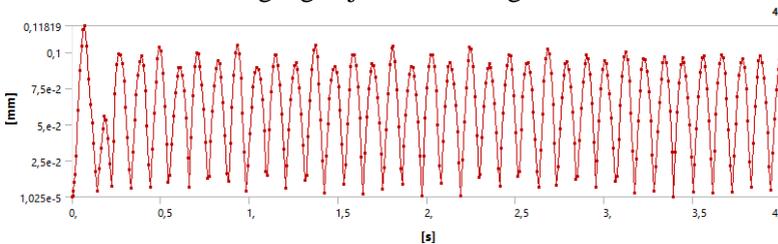
Gambar 4.91 Frekuensi jembatan dengan 10 truk, 5 m/s

Dengan beban 10 truk berkecepatan 5 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,3079 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar $754,63 \text{ mm/s}^2$. Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar $56,7331 \text{ mm/s}^2$. Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,547 Hz dan 4,57 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

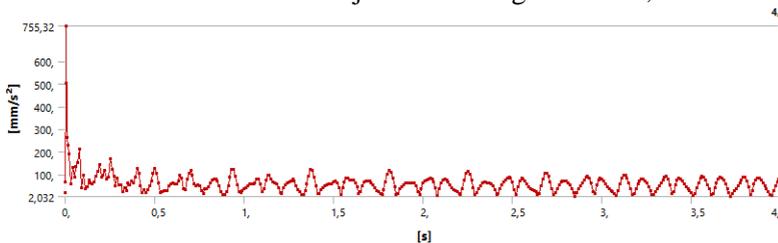
4.9.2. 10 truk berkecepatan 10 m/s



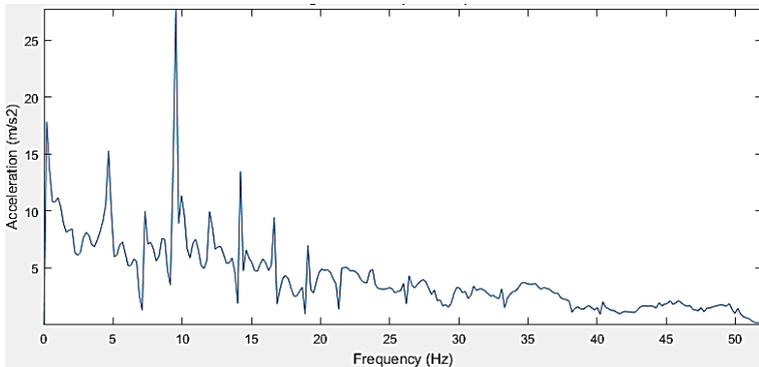
Gambar 4.92 Tegangan jembatan dengan 10 truk, 10 m/s



Gambar 4.93 Deformasi jembatan dengan 10 truk, 10 m/s



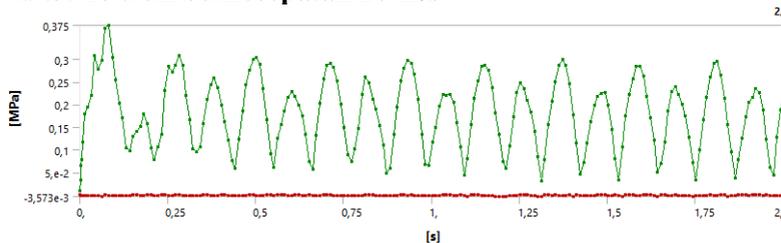
Gambar 4.94 Akselerasi jembatan dengan 10 truk, 10 m/s



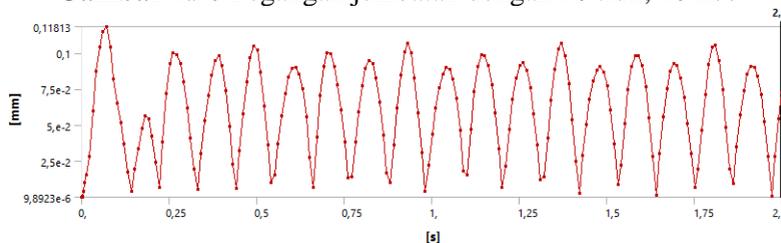
Gambar 4.95 Frekuensi jembatan dengan 10 truk, 10 m/s

Dengan beban 10 truk berkecepatan 10 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,3728 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar $755,32 \text{ mm/s}^2$. Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar $60,816 \text{ mm/s}^2$. Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,547 Hz dan 0,2031 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

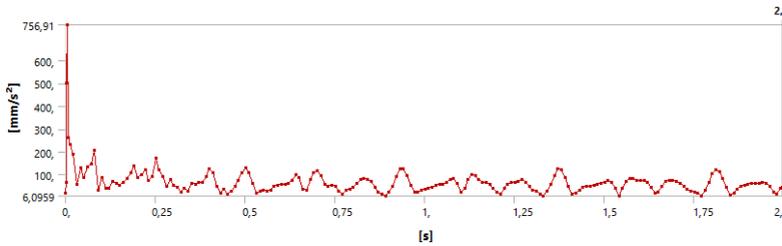
4.9.3. 10 truk berkecepatan 20 m/s



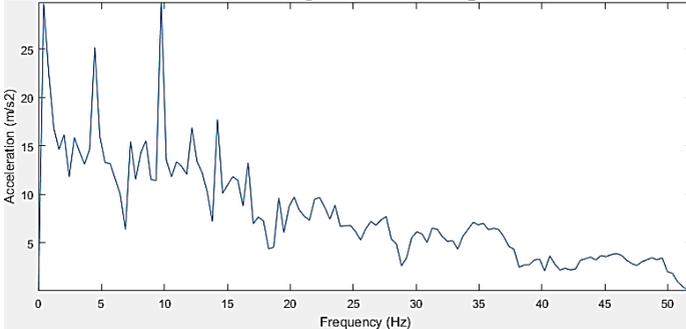
Gambar 4.96 Tegangan jembatan dengan 10 truk, 10 m/s



Gambar 4.97 Deformasi jembatan dengan 10 truk, 10 m/s



Gambar 4.98 Akselerasi jembatan dengan 10 truk, 10 m/s

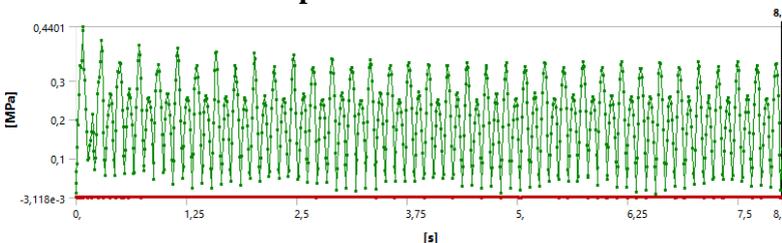


Gambar 4.99 Frekuensi jembatan dengan 10 truk, 10 m/s

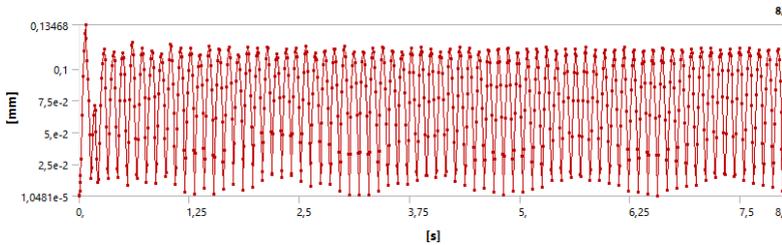
Dengan beban 10 truk berkecepatan 20 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,375 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar $756,91 \text{ mm/s}^2$. Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar $68,98 \text{ mm/s}^2$. Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,75 Hz dan 0,4063 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

4.10. Respon Jembatan dengan 12 Truk Berjalan

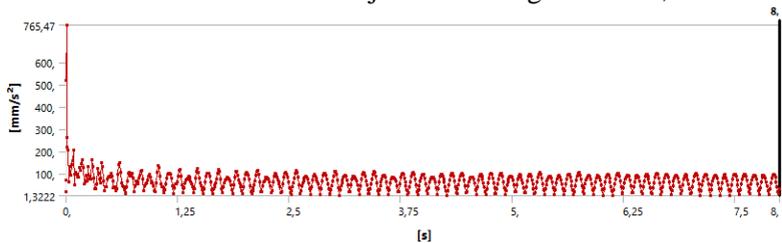
4.10.1. 12 truk berkecepatan 5 m/s



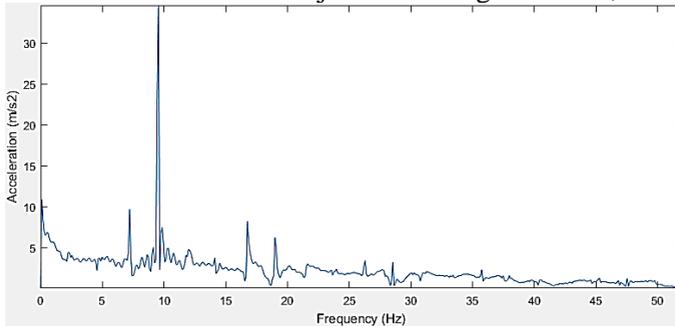
Gambar 4.100 Tegangan jembatan dengan 12 truk, 5 m/s



Gambar 4.101 Deformasi jembatan dengan 12 truk, 5 m/s



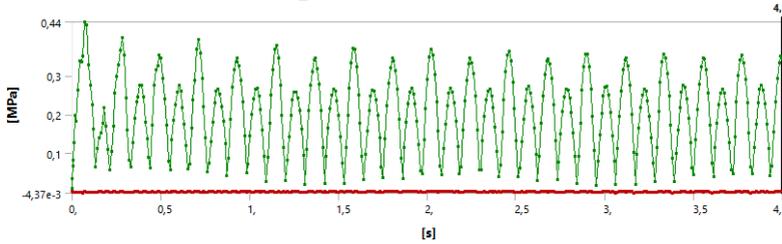
Gambar 4.102 Akselerasi jembatan dengan 12 truk, 5 m/s



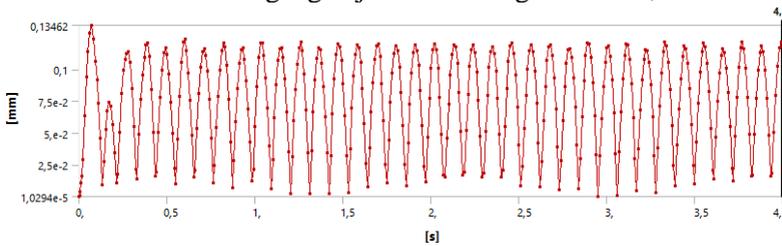
Gambar 4.103 Frekuensi jembatan dengan 12 truk, 5 m/s

Dengan beban 12 truk berkecepatan 5 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,4401 Mpa, tegangan inilah yang bernilai paling besar diantara semua variasi. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 765,47 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 66,092 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,547 Hz dan 0,1016 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

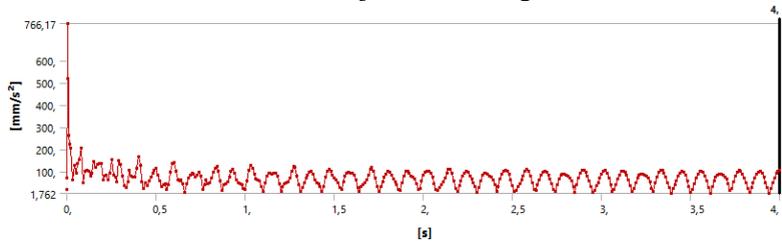
4.10.2. 12 truk berkecepatan 10 m/s



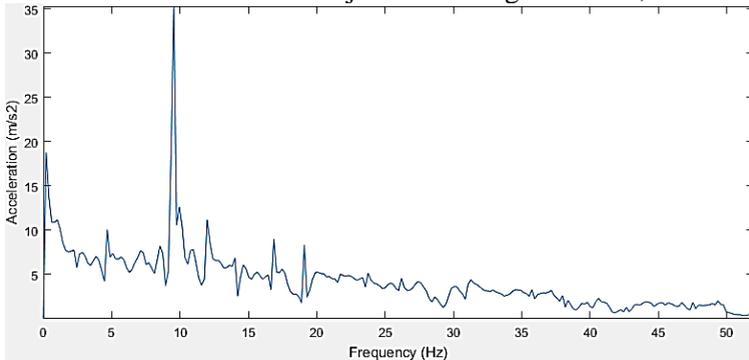
Gambar 4.104 Tegangan jembatan dengan 12 truk, 10 m/s



Gambar 4.105 Deformasi jembatan dengan 12 truk, 10 m/s



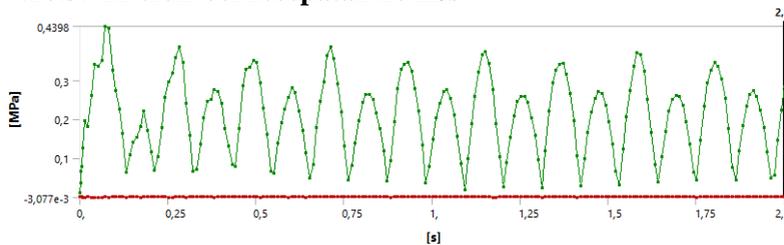
Gambar 4.106 Akselerasi jembatan dengan 12 truk, 10 m/s



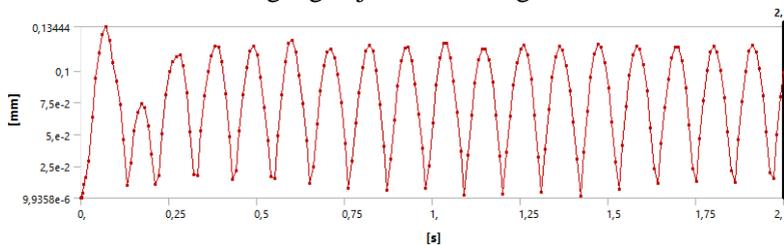
Gambar 4.107 Frekuensi jembatan dengan 12 truk, 10 m/s

Dengan beban 12 truk berkecepatan 10 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,44 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 766,17 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 72,760 mm/s². Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,547 Hz dan 0,2031 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

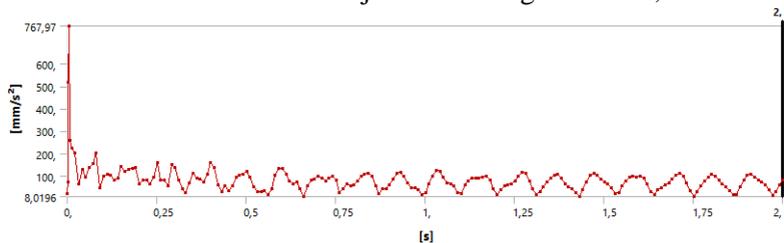
4.10.3. 12 truk berkecepatan 20 m/s



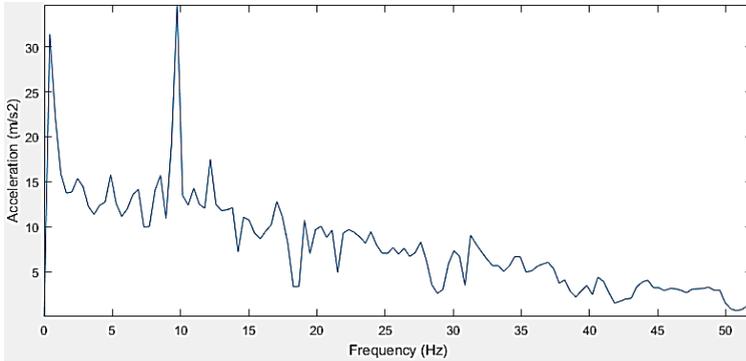
Gambar 4.108 Tegangan jembatan dengan 12 truk, 20 m/s



Gambar 4.109 Deformasi jembatan dengan 12 truk, 20 m/s



Gambar 4.110 Akselerasi jembatan dengan 12 truk, 20 m/s



Gambar 4.111 Frekuensi jembatan dengan 12 truk, 20 m/s

Dengan beban 12 truk berkecepatan 20 m/s, tegangan maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 0,4398 MPa. Akselerasi maksimum yang dialami jembatan yaitu sebesar 767,97 mm/s². Jika dirata-rata, jembatan ini mengalami akselerasi sebesar 82,421 mm/s². Akselerasi pada variasi ini merupakan yang paling besar di antara semua variasi. Sedangkan frekuensi dominan yang terjadi adalah 9,75 Hz dan 0,4063 Hz, nilai-nilai ini masih relatif aman dari terjadinya fenomena resonansi.

4.11. Pembahasan Tegangan, Akselerasi, dan Frekuensi pada Berbagai Variasi

4.11.1. Tegangan maksimum

Tabel 4.8 Tegangan maksimum yang dialami jembatan pada berbagai variasi dinamis

Jumlah Truk	Tegangan maks (MPa) pada		
	5 m/s	10 m/s	20 m/s
1	0.22263	0.21907	0.2125
2	0.2109	0.2075	0.2015
4	0.2098	0.2094	0.20883
6	0.2598	0.2597	0.2603
8	0.3236	0.3238	0.3239
10	0.3079	0.3728	0.375
12	0.4401	0.44	0.4398

Dari tabel perbandingan tegangan maksimum jembatan, diperoleh hasil bahwa semakin tinggi kecepatan beban, maka semakin kecil tegangan yang dialami jembatan. Kecepatan yang rendah menyebabkan durasi kontak antara beban dan jembatan semakin panjang sehingga tegangan maksimum yang dialami pun semakin besar.

Jika ditinjau dari banyak kendaraan, tegangan maksimum cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah kendaraan yang melintas.

4.11.2. Akselerasi maksimum dan rata-rata

Tabel 4.9 Data akselerasi maksimum pada berbagai variasi dinamis

Jumlah Truk	Akselerasi maks (mm/s^2) pada		
	5 m/s	10 m/s	20 m/s
1	61.607	60.372	56.947
2	113.71	113.11	109.38
4	109.8	108.27	104.99
6	358.5	362.14	369.43
8	748.8	749.35	750.78
10	754.63	755.32	756.91
12	765.47	766.17	767.97

Dari data di atas dapat dilihat bahwa akselerasi maksimum yang dialami jembatan semakin menurun jika kecepatan bertambah, hal ini berlaku pada jumlah kendaraan yang sedikit (1, 2, dan 4 truk). Sedangkan pada jumlah kendaraan banyak (6, 8, 10, dan 12 truk) akselerasi jembatan meningkat seiring bertambahnya kecepatan kendaraan. Secara keseluruhan, jumlah kendaraan yang meningkat akan memperbesar akselerasi yang dialami jembatan.

Tabel 4.10 Data akselerasi rata-rata pada berbagai variasi dinamis

Jumlah Truk	Akselerasi rata-rata (mm/s^2) pada		
	5 m/s	10 m/s	20 m/s
1	12.60309	15.877	18.8053
2	21.90586	26.15907	27.44753
4	28.92358	32.16101	35.85406
6	35.51284	38.57242	43.56972
8	49.08276	54.13252	61.43412
10	56.07331	60.81605	68.98289
12	66.09249	72.76079	82.42147

Dari data di atas, semua nilai menunjukkan konsistensi. Pada kecepatan yang semakin tinggi, akselerasi rata-rata yang terjadi juga semakin tinggi. Begitu pula jumlah kendaraan yang semakin banyak mengakibatkan akselerasi rata-rata yang semakin tinggi.

4.11.3. Frekuensi dominan

Tabel 4.11 Frekuensi dominan pertama dari berbagai variasi dinamis

Jumlah Truk	Frekuensi dominan pertama (Hz) pada		
	5 m/s	10 m/s	20 m/s
1	0.1016	21.33	0.4063
2	21.33	21.33	21.53
4	14.12	4.672	4.469
6	9.547	9.547	0.4063
8	9.547	4.672	0.4063
10	9.547	9.547	9.75
12	9.547	9.547	9.75

Tabel 4.12 Frekuensi dominan pertama dari berbagai variasi dinamis

Jumlah Truk	Frekuensi dominan kedua (Hz) pada		
	5 m/s	10 m/s	20 m/s
1	21.33	0.2031	21.13
2	0.1016	2.641	7.313
4	4.57	14.02	14.22
6	4.672	4.672	9.75
8	14.12	14.22	4.469
10	4.57	0.2031	0.4063
12	0.1016	0.2031	0.4063

Dari data frekuensi yang ada, diambil dua frekuensi dominan. Pada semua kecepatan dan jumlah kendaraan, jembatan ini relatif aman dari fenomena resonansi, Karena resonansi pada baja baru akan terjadi pada saat struktur mengalami getaran sebesar 2.6172 Hz. Satu-satunya variasi yang paling mendekati nilai tersebut adalah pada pembebanan 2 truk berkecepatan 10 m/s yang menghasilkan frekuensi 2,641 Hz.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada simulasi dan analisis data, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- Validasi matematis dan simulasi pada *beam*, *truss*, dan *modal analysis* menghasilkan nilai yang hampir mendekati, dengan *error* maksimum berturut-turut sebesar 0,72%, 1,078%, dan 0,35%.
- Berdasarkan standar SNI, jembatan pada simulasi ini telah memenuhi standar kelayakan statis, dengan lendutan maksimum 44,965 mm dan tegangan 134,32 MPa.
- Pada semua variasi, tegangan maksimum yang dialami jembatan terjadi pada beban 12 truk berkecepatan 5 m/s yaitu sebesar 0,4401 MPa.
- Akselerasi maksimum yang terbesar terjadi pada beban 12 truk berkecepatan 20 m/s yaitu sebesar 767,97 mm/s².
- Akselerasi rata-rata yang terbesar terjadi pada beban 12 truk berkecepatan 20 m/s yaitu sebesar 82,42 mm/s².
- Hampir seluruh variasi menghasilkan nilai frekuensi jembatan yang jauh dari frekuensi natural, kecuali pada variasi 2 truk berkecepatan 10 m/s yang menghasilkan frekuensi 2,641 Hz.

5.2 Saran

Saran dari penulis untuk kemajuan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

- Melakukan pendesainan jalan raya di kedua ujung jembatan, agar dapat diamati perubahan kondisi jembatan saat beban memasuki dan meninggalkan jembatan.
- Melakukan desain beban kendaraan secara lebih aktual.
- Menguji respon jembatan akibat gaya rem, tabrakan, gempa, angin, dan faktor lain-lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- A. Badriah, "**Analisis Respon Beam Terhadap Variasi Pembebanan Kendaraan Berjalan Dengan Pemodelan Kendaraan Setengan Mobil**," Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika ITS, Surabaya, 2016.
- AASHO, "**Standard Specifications for Highway Bridges**", 15th Ed, 1935.
- AASHTO, "**Load and Resistance Factor Design for Bridges**" 15th Ed, 2012.
- Agustinus, "**Analisis Kelebihan Muatan pada Kendaraan Angkutan Barang di UPPKB Kalitirto**," Tugas Akhir - Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya, Yogyakarta, 2012.
- Anonymous, "**H-Beam Specifications**", PT. Cigading Habeam Centre & Krakatau Industrial Estate, Cilegon, 1999.
- BSN, "**Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan**", Rancangan Standar Nasional Indonesia T-03, Jakarta, 2005
- BSN, "**Pembebanan untuk Jembatan**", Standar Nasional Indonesia 1725, Jakarta, 2016.
- E. Ellobody, "**Finite Element Analysis and Design of Steel and Steel-Concrete Composite**", Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 2014.
- Greenlee, "**Finite Element Trusses, Chapter 3**", The University of New Mexico, 2010.
- H.P Gavin, "**Matrix Structural Analysis**" Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, 2014
- H. T1-1, "**Truss Identification**": Nomenclature, 1976.
- P. Hagedorn, "**Vibration and Waves in Continuous Mechanical System**", London: Wiley, 2007.
- R. Asri, "**Studi Perilaku Tekuk Torsi Lateral pada Balok Baja Bangunan Gedung**", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil

ITS, 2013.

- R. Basalamah, “**Desain Melintang dan Memanjang Jembatan Rangka Baja Tipe Warren**”, Proposal Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil ITS, 2015.
- S. H.W., T. D. and C. T.H.T., “**Damage detection in truss bridges using vibration based multi-criteria approach**,” Structural Engineering and Mechanics, vol. 39, pp. 187-206, 2011.
- S. Ressler, “**Learning Activity 1 – 5 of Bridge Design Tutor**”, Engineering Encounter’s Bridge Design Contest, 2001.
- U. RI, Nomor 22 “**Tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan**”, Undang-Undang Republik Indonesia, 2009.
- Y. Warren, “**Roark’s Formulas for Stress and Strain**”, McGrawHill, New York, 2002.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Dhias Pratama Lazuarfy. Terlahir di Gresik, tanggal 13 April tahun 1994. Penulis hijrah ke Sidoarjo sejak SD hingga SMA. Lalu memutuskan untuk merantau dengan berkuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, tepatnya di Jurusan Teknik Fisika ITS. Cukup banyak aktivitas organisasi yang dijalani penulis selama menjadi mahasiswa. Pada tahun pertama, penulis merasa beruntung pernah menjadi komandan tingkat dari Teknik Fisika angkatan 2012, atau lebih dikenal sebagai Timeless Fidelity. Pada tahun kedua, penulis berperan sebagai staf di UKM Bulutangkis ITS dan staf Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF). Di tahun ketiga, HMTF memberikan amanahnya lagi, kali ini sebagai Kepala Departemen Kesejahteraan Mahasiswa, pada tahun ini pula, penulis diterima sebagai member/asisten di laboratorium Vibrasi dan Akustik. Ternyata tahun keempat tidak menjadikan penulis vakum dari organisasi, pada tahun keempat penulis diamanahi sebagai Dewan Perwakilan Angkatan HMTF, tepatnya di komisi legislasi. Pada tahun terakhirnya, penulis menyelesaikan skripsi dengan tema yang sedikit di luar cakupan Teknik Fisika, yaitu Teknik Sipil. Untuk pertanyaan, kritik, dan saran, penulis dapat dihubungi melalui email dhiaspratama@gmail.com atau dapat juga melalui akun facebook Dhias Pratama Lazuarfy.