



TUGAS AKHIR - TF 141581

**PENGARUH BAHAN ISOLASI GETARAN
TERHADAP POLA LENDUTAN JEMBATAN REL
KERETA API DALAM TINJAUAN ELEMEN
HINGGA**

ILVY WILYANTI
NRP. 0231144000015

Dosen Pembimbing :
Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc.
Ir. Yerri Susatio, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TF 141581

**THE EFFECT OF VIBRATION ISOLATION
MATERIAL ON DEFLECTION PATTERN OF
RAILWAY BRIDGE IN FINITE ELEMENT**

ILVY WILYANTI
NRP. 02311440000015

Supervisors :
Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc.
Ir. Yerri Susatio, MT.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ilvy Wiliyanti
NRP : 02311440000015
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Pengaruh Bahan Isolasi Getaran terhadap Pola Lendutan Jembatan Rel Kereta Api dalam Tinjauan Elemen Hingga" adalah benar-benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia untuk menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 19 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Ilvy Wiliyanti
NRP. 02311440000015

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

PENGARUH BAHAN ISOLASI GETARAN TERHADAP
POLA LENDUTAN JEMBATAN REL KERETA API
DALAM TINJAUAN ELEMEN HINGGA

Oleh:

Ilvy Wiliyanti

NRP. 0231144000015


Surabaya, 19 Juli 2018

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc.
NIPN. 19600229 1987011001

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II



Ir. Yerri Susatio, M.T.
NIPN. 195410171980031005

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 197809022003121002

**PENGARUH BAHAN ISOLASI GETARAN TERHADAP
POLA LENDUTAN JEMBATAN REL KERETA API
DALAM TINJAUAN ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi Rekayasa Vibrasi dan Akustik

Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh:

ILVY WILYANTI


NRP. 0231144000015

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:


1, Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc

 (Pembimbing I)


2. Ir. Yerri Susatio, M.T.

 (Pembimbing II)

3. Dr. Dhany Arifianto, ST., M.Eng

 (Penguji I)

4. Lizda Johar Mawarani S.T., M.T.

 (Penguji II)

SURABAYA

JULI, 2018

PENGARUH BAHAN ISOLASI GETARAN TERHADAP POLA LENDUTAN JEMBATAN REL KERETA API DALAM TINJAUAN ELEMEN HINGGA

Nama : Ilvy Wiliyanti
NRP : 02311440000015
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc
Ir. Yerri Susatio, MT.

Abstrak

Kereta api sebagai transportasi darat komparatif yang berjalan di atas rel sebagai infrastruktur perjalanannya. Kereta api memiliki daya dorong kuat dan mampu memberikan getaran besar yang berpengaruh pada jembatan. Sehingga, perlu diberikan isolasi getaran untuk peredam getaran yang dipasang di antara rel kereta dan *beam* di bawahnya. Tugas akhir ini dilakukan di jembatan Lahor, Malang dengan variasi massa dan kecepatan kereta api terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran yaitu *metal* dan elastomer. Tujuannya untuk mencari pola lendutan dan parameter bahan terbaik sebagai peredam getaran akibat beban berjalan. Lendutan maksimum tanpa isolasi getaran pada kereta Malabar kosong sebesar 0,187 m; Malabar penuh 0,196 m; Penataran kosong 0,152 m; Penataran penuh 0,169 m. Sementara, bahan isolasi getaran yang direkomendasikan yaitu *Steel-Rubber-Steel* karena memiliki nilai kekakuan tinggi setelah bahan murni yaitu $3,85 \cdot 10^7$ N/m dan lendutan yang kecil. Pemberian bahan isolasi getaran *Steel-Rubber-Steel* jika dibandingkan dengan jembatan tanpa isolator getaran, mampu mereduksi lendutan maksimum sebesar 25% untuk Malabar kosong; 26% untuk Malabar penuh; 21% untuk Penataran kosong; dan 23% untuk Penataran penuh. Berdasarkan Peraturan Menteri Nomor 60 Th 2012, semua variasi yang diujikan memenuhi standar lendutan yaitu kurang dari 0,228 m. Perambatan getaran terbesar pada isolator lapisan pertama di node 1 yaitu 74,20%; node 2 sebesar 76,24%; node 3 sebesar 78,62%. Semakin ke struktur bawah, perambatan getaran semakin kecil.

Kata Kunci: jembatan rel, isolasi getaran, lendutan, perambatan getaran

“Halaman ini Memang Dikosongkan”

**THE EFFECT OF VIBRATION ISOLATION MATERIAL
ON DEFLECTION PATTERN OF RAILWAY BRIDGE
IN FINITE ELEMENT**

Name : Iivy Wiliyanti
NRP : 023114400000
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisors : Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc
Ir. Yerri Susatio, MT.

Abstract

The railway as a comparative land transportation that runs on the rails as its road infrastructure. The train has a strong thrust and is able to provide a large vibration that affects the condition of the rail bridge being bypassed. Thus, it is necessary to provide a vibration isolation structure for the damped vibration placed between the rail and beam. This research was conducted at Lahor railway bridge Malang with variation of mass and railway speed to 8 types of material that is metal and mixture of elastomer. The goal is to find the ideal deflection pattern and the best material parameters as the vibration damper from the effect dinamic load. Maximum deflection without vibration isolation on empty Malabar trains of 0.187 m; Malabar full 0.196 m; empty Penataran 0.152m; and full Penataran is 0.169 m. Then, the recommended vibration insulation material is Steel-Rubber-Steel because it has high stiffness value after the pure material is 38499802,37 N / m and a small deflection. Giving of Steel-Rubber-Steel vibration insulation when compared to bridge without vibration isolator, capable of reducing maximum deflection 25% for empty Malabar; 26% for full Malabar; 21% for empty Penataran; and 23% for full Penataran. Based on Ministerial Regulation No. 60 Year 2012, all variations tested meet the deflection standard of less than 0.228 m. The largest vibration propagation in first layer isolator in node 1 is 74.20%; node 2 is 76.24%; node 3 is 78.62%. As the structure goes down, the vibration propagation gets smaller.

Keywords: railway bridge, vibration isolation, deflection, transmissibility

“Halaman ini Memang Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“PENGARUH BAHAN ISOLASI GETARAN TERHADAP POLA LENDUTAN JEMBATAN REL KERETA API DALAM TINJAUAN ELEMEN HINGGA”**. Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc., selaku Kepala Laboratorium Vibrasi dan Akustik sekaligus pembimbing tugas akhir ini yang selalu memberi wawasan umum tentang perkereta api-an, membimbing, memberikan ilmu dengan sabar dan memotivasi anak bimbingnya.
3. Bapak Ir. Yerri Susatio, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan ilmu, memberi solusi, serta memberi bimbingan dan motivasi yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Dr. Dhany Arifianto, ST., M.Eng selaku sosok Bapak di Laboratorium Vibrasi dan Akustik yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan motivasi dalam dunia perkuliahan.
5. Bapak Ir. Zulkifli M.Sc, selaku dosen wali yang telah membimbing dan memberikan wejangan penulis selama masa perkuliahan.
6. Kedua orang tua, Bapak Wiyadi dan Ibu Nikmatus Sholichah. Terima kasih tak terhingga atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, nasehat, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan. Terima kasih karena selalu ada dan menjadi tempat pulang ternyaman.

7. Seluruh member Laboratorium Vibrasi dan Akustik yang selalu memberikan dukungan dan semangat
8. Seluruh kerabat Vibrastic seperjuangan 118. Nurul, Ayustin, Fidia, Vika, Afif, Serip, Dimas, Deni, Pieter, Yono, Okta, Dika, Juniar, Nadiah, Tiara. Terima kasih ilmunya, kesetiiaannya saat susah senang, tim hura-hura, pemberi motivasi dan penyemangat!
9. Kawan-kawan terbaik. Magfiroh, Safira, Fatma, Ardi, Wenda, Adista, Irawan, Doan, Dhewangga, Windhu, Diaz, dan lainnya yang selalu mendukung dan membantu penyelesaian tugas akhir.
10. Teman-teman F49 seluruhnya. Terima kasih telah memberi banyak warna-warni kehidupan di masa perkuliahan ini.
11. Sahabat lama, selamanya ya. Dini, Ayu, Lisa, Inmas, Umi, Herlina, Shinta. Terima kasih semangatnya.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih.

Semoga Allah memberikan rahmat dan hidayah serta amal baik kepada kita semua. Yang terakhir penulis berharap agar laporan ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca khususnya mahasiswa Teknik Fisika ITS dalam memperkaya ilmu dan sumber inspirasi sebagai pengembangan penelitian dimasa mendatang.

Surabaya, 19 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
<i>TITLE PAGE</i>	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
LEMBAR PERSETUJUAN.....	ix
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Struktur Jalan Rel Kereta Api.....	5
2.2 Kriteria Struktur Jalan Rel Kereta Api.....	6
2.3 <i>Beam</i>	6
2.4 <i>Jenis-Jenis Beam</i>	8
2.5 Elemen hingga.....	8
2.6 Matriks Kekakuan <i>Beam</i>	11
2.7 Beban dan Gaya pada Jembatan Rel Kereta Api.....	12
2.8 Konsep Perhitungan Beban menggunakan Teori Balok di Atas Tumpuan Elastik.....	14
2.9 Bantalan Isolasi Getaran pada Jembatan Kereta Api....	16
2.10 <i>Transmissibility</i>	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Pengumpulan Data Dimensi Jembatan, Massa, dan Kecepatan Kereta Api.....	22
3.2 Perhitungan dan Pemodelan Elemen hingga.....	24

3.3	Perbandingan Pola Lendutan dengan Variasi Kecepatan dan Massa.....	31
3.4	Pemilihan Bahan Isolasi Getaran.....	31
3.5	Uji Lendutan dengan Standard Peraturan Menteri Perhubungan RI.....	32
3.6	Kesimpulan dan Penyusunan Laporan	33
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1	Verifikasi Potongan <i>Beam</i>	35
4.2	Frekuensi Natural Jembatan Lahor.....	39
4.3	Kekakuan Bahan	44
4.4	Lendutan Jembatan Lahor Akibat Beban Dinamis Kereta.....	45
4.5	Uji Lendutan	56
4.6	Akumulatif Persentase Gaya yang Diterima.....	59
4.7	Perbandingan Gaya Input pada Node 1, 2 dan 3 terhadap Gaya yang Diterima oleh Struktur Bawah Jembatan	63
BAB V	KESIMPULAN	67
	DAFTAR PUSTAKA	69
	LAMPIRAN	
	BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Struktur jalan kereta api	5
Gambar 2.2	Representasi skematik dari <i>beam</i> yang terkena defleksi planar	7
Gambar 2.3	Defleksi yang terjadi pada <i>beam</i> dengan batas kondisi khusus	7
Gambar 2. 4	Jenis-jenis <i>beam</i>	8
Gambar 2. 5	Elemen <i>beam</i> dengan elemen hingga	9
Gambar 2. 6	Kordinat lokal	10
Gambar 2. 7	Gaya-gaya yang bekerja pada <i>beam</i>	11
Gambar 2. 8	Gaya pada rel kereta api	12
Gambar 2. 9	Skematik gaya lateral pada rel kereta	13
Gambar 2. 10	Defleksi dan momen akibat pembebanan	15
Gambar 2. 11	Jenis dan fungsi isolator karet	16
Gambar 2. 12	<i>Sandwich beam</i> model.....	17
Gambar 2. 13	Isolator getaran.....	18
Gambar 3. 1	Diagram alir	22
Gambar 3. 2	Jembatan Lahor [16]	22
Gambar 3. 3	Perancangan <i>design</i> penelitian	24
Gambar 3. 4	Tinjauan elemen hingga	275
Gambar 3. 5	Variasi bahan penelitian	27
Gambar 3. 6	<i>Design modeler</i> jembatan Lahor	28
Gambar 3. 7	Jembatan setelah <i>meshing</i>	28
Gambar 3. 8	Pemberian <i>force</i> pada <i>transient analysis</i>	30
Gambar 3. 9	Lendutan jembatan Lahor.....	30
Gambar 3. 10	Pola lendutan jembatan Lahor	31
Gambar 4. 1	Permisalan <i>beam</i>	35
Gambar 4. 2	Simulasi <i>beam</i> dikenai gaya vertikal	38
Gambar 4. 3	<i>Displacement</i> node 2 simulasi <i>Ansys</i>	38
Gambar 4. 4	Gaya reaksi node 1 pada <i>Ansys</i>	38
Gambar 4. 5	Momen gaya node 1 pada <i>Ansys</i>	39
Gambar 4. 6	Frekuensi natural jembatan Lahor	41
Gambar 4. 7	Perbandingan frekuensi natural jembatan Lahor ..	41
Gambar 4. 8	Pola lendutan kereta api Malabar kosong terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran ...	47

Gambar 4. 9	Konvergensi lendutan kereta Malabar kosong.....	48
Gambar 4. 10	Pola lendutan kereta api Malabar penuh terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran .	49
Gambar 4. 11	Konvergensi lendutan kereta Malabar penuh	50
Gambar 4. 12	Pola lendutan kereta api Penataran kosong terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran .	52
Gambar 4. 13	Konvergensi lendutan kereta Penataran kosong .	53
Gambar 4. 14	Pola lendutan kereta api Penataran penuh terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran .	54
Gambar 4. 15	Konvergensi lendutan kereta Penataran penuh ...	55
Gambar 4. 16.	Sifat bahan <i>steel</i>	58
Gambar 4. 17.	Sifat bahan <i>natural rubber</i>	58
Gambar 4. 18.	Pemodelan elemen hinggga.....	59
Gambar 4. 19.	Lapisan bahan pada isolasi getaran	59
Gambar 4. 20.	Gaya input pada node 1	60
Gambar 4. 21.	Amplitudo gaya input pada node 1	60
Gambar 4. 22.	Gaya yang diterima oleh node 1	61
Gambar 4. 23.	Gaya input pada node 2	61
Gambar 4. 24.	Amplitudo gaya Input pada node 2.....	61
Gambar 4. 25.	Gaya yang diterima oleh node 2.....	62
Gambar 4. 26.	Gaya Input pada node 3.....	62
Gambar 4. 27.	Amplitudo gaya Input pada node 3.....	60
Gambar 4. 28.	Gaya yang diterima oleh node 3	63

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Nilai K_n mode 1-5 [22].....	27
Tabel 3. 2 Koefisien lendutan maksimum jembatan baja.....	32
Tabel 4.1 Perbandingan matematis dan simulasi potongan <i>beam</i>	39
Tabel 4.2 Konvergensi frekuensi natural <i>FRP-Neo-FRP</i>	43
Tabel 4.3 Perbandingan frekuensi natural mode 1 dan frekuensi eksitasi	454
Tabel 4.4 Kekakuan bahan	45
Tabel 4.5 Massa kereta api Malabar [17].....	46
Tabel 4.6 Massa kereta api Penataran [18]	51
Tabel 4.7 Uji lendutan jembatan Lahor akibat kereta Malabar ..	56
Tabel 4.8 Uji lendutan jembatan Lahor akibat kereta Penataran	57

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta api sebagai transportasi darat yang efisien dengan multi keunggulan komparatif. Transportasi ini berjalan di atas struktur rel sebagai suatu konstruksi perencanaan prasarana atau infrastruktur perjalanannya. Kereta api memiliki daya dorong kuat sehingga mampu memberikan getaran besar dan berpengaruh pada kondisi jembatan rel yang dilewati, seperti pada kasus Kereta Api 7118 Pangrango yang anjlok di Jembatan Pamoyanan Cicurug, Sukabumi dikarenakan adanya rel patah pada 03 Januari 2014 [1]. Secara umum, komponen-komponen penyusun jalan rel terdiri dari rel, penambat, bantalan, *ballast*, *subballast* dan *sugrade* [2]. Kereta api yang melintas di atas jembatan kereta api akan berpengaruh terhadap struktur jalan rel, diantaranya: kekakuan, elastisitas, deformasi, stabilitas dan *adjustability*. Kekakuan struktur untuk menjaga deformasi vertikal dan horizontal yang diakibatkan oleh distribusi beban lalu lintas kereta api merupakan indikator utama dari umur, kekuatan dan kualitas jalan rel. Deformasi yang berlebih akan menyebabkan geometrik jalan rel tidak baik dan menyebabkan keausan yang besar diantara komponen-komponen struktur jalan rel kereta api [2].

Variasi massa dan kecepatan kereta api yang melewati jembatan rel tentunya akan menghasilkan respon defleksi atau lendutan yang berbeda terhadap jembatan kereta api. Dalam tugas akhir ini, jembatan kereta api diberi isolasi getaran untuk mengantisipasi lendutan yang besar akibat beban kereta api. Isolasi getaran ini dipasang di antara rel dengan *beam*. Kemudian digunakan variabel bebas massa dan kecepatan kereta api dengan membuat pemodelan kereta api yang digunakan, serta parameter bahan pada jembatan dengan panjang bentangan tertentu yang tersusun dengan 2 tumpuan. Lendutan pada jembatan kereta api ditentukan dari panjang bentangan dalam jenis tumpuan pada sambungan rel kereta. Pemodelan dilakukan secara simulasi komputasional dengan tinjauan elemen hingga yang dapat

menghitung respon dan pola lendutan dari adanya isolasi getaran terhadap besaran fisis keluaran berupa besar deformasi dalam ranah perpindahan. Oleh karena itu, disusun tugas akhir dengan judul “Pengaruh Bahan Isolasi Getaran terhadap Pola Lendutan Jembatan Rel Kereta Api dalam Tinjauan Elemen Hingga” dan diharapkan mampu memberi informasi mengenai lendutan yang terjadi pada *beam* dan jembatan kereta api, sehingga besarnya gaya yang diteruskan dari beban kereta ke jembatan dapat diketahui, serta kerusakan jembatan dapat diprediksi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, permasalahan yang diambil dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana pola lendutan pada jembatan kereta api dengan panjang bentangan tertentu?
- Bagaimana keterkaitan isolasi getaran terhadap bahan yang digunakan pada jembatan kereta api?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui pola lendutan pada jembatan kereta api dengan panjang bentangan tertentu.
- Mengetahui parameter bahan yang dapat dipakai sebagai isolasi getaran pada jembatan rel kereta api.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari meluasnya bahasan, maka batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

- Asumsi jembatan kereta api tersusun dari 2 *beam* paralel dengan panjang bentangan tertentu.
- Struktur jembatan yang dibahas yaitu lendutan isolasi getaran yang terletak di antara *beam* dan rel kereta api.
- Variabel yang dianalisis adalah data getaran akibat variasi massa dan kecepatan kereta.

- Parameter yang dibahas dalam isolasi getaran adalah kekakuan bahan.
- Tipe jembatan adalah jembatan kereta api rangka baja terbuka
- Desain yang dibuat berupa rel (balok), isolasi getaran, *beam* dan penopang jembatan.

“Halaman Ini Memang Dikosongkan”

BAB II

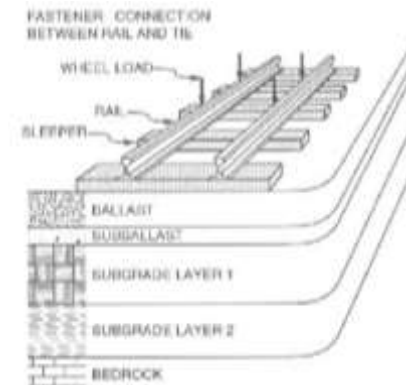
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Jalan Rel Kereta Api

Struktur jalan rel adalah struktur elastis, dengan pola distribusi beban yang cukup rumit, sebagai tegangan kontak antara rel dan roda [3]. Dapat diartikan pula sebagai suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana atau infrastruktur perjalanan kereta api. Struktur jalan rel dibagi ke dalam dua bagian struktur yang terdiri dari kumpulan komponen-komponen jalan rel, sebagai berikut [2]:

- Struktur bagian atas, atau dikenal sebagai *superstructure* yang terdiri dari komponen-komponen seperti rel (*rail*), penambat (*fastening*) dan bantalan (*sleeper, tie*).
- Struktur bagian bawah, atau dikenali sebagai *substructure*, yang terdiri dari komponen balas (*ballast*), subbalas (*subballast*), tanah dasar (*improve subgrade*) dan tanah asli (*natural ground*).

Konstruksi jalan rel merupakan suatu sistem struktur yang menghimpun komponen-komponennya seperti rel, bantalan, penambat dan lapisan fondasi serta tanah dasar secara terpadu dan disusun dalam sistem konstruksi dan analisis tertentu untuk dapat dilalui kereta api secara aman dan nyaman.



Gambar 2. 1 Struktur jalan kereta api

2.2 Kriteria Struktur Jalan Rel Kereta Api

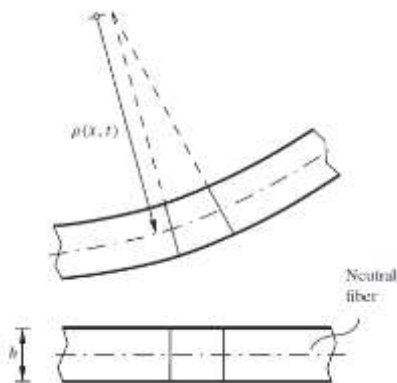
Jalan pada rel kereta api dapat dikatakan baik jika memenuhi kriteria struktur sebagai berikut [2]:

- Kekakuan (*Stiffness*) struktur untuk menjaga deformasi vertikal akibat distribusi beban lalu lintas kereta api merupakan indikator utama dari umur, kekuatan dan kualitas jalan rel. Deformasi vertikal yang berlebihan akan menyebabkan geometrik jalan rel tidak baik dan keausan yang besar diantara komponen-komponen struktur jalan rel.
- Elastisitas (*Elastic/Resilience*) diperlukan untuk kenyamanan perjalanan kereta api, menjaga patahnya as roda, meredam kejutan, *impact*, getaran vertikal. Jika struktur jalan rel terlalu kaku, misalnya dengan pemakaian bantalan beton, maka untuk menjamin keelastikan struktur dapat menggunakan pelat karet atau *rubber pads* di bawah kaki rel.
- Ketahanan terhadap deformasi tetap
- Deformasi vertikal yang berlebihan akan cenderung menjadi deformasi tetap sehingga geometrik jalan rel (ketidakrataan vertikal, horisontal dan puntir) menjadi tidak baik, yang pada akhirnya kenyamanan dan keamanan terganggu
- Stabilitas jalan rel yang stabil dapat mempertahankan struktur jalan pada posisi yang tetap/semula (vertikal dan horisontal) setelah pembebanan terjadi.
- Kemudahan untuk pengaturan dan pemeliharaan (*Adjustability*) sehingga dapat dikembalikan ke posisi geometrik dan struktur jalan rel yang benar, jika terjadi perubahan geometri akibat yang berjalan.

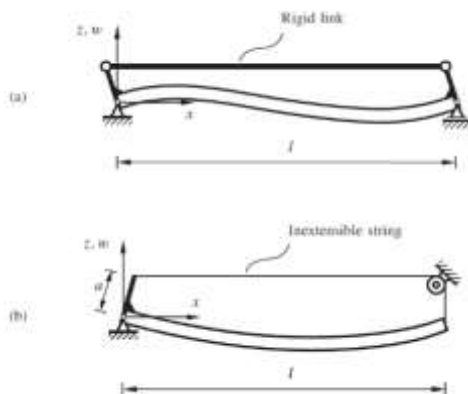
2.3 Beam

Beam merupakan suatu objek elastis yang ditujukan untuk menerima beban getaran transversal yang mengakibatkan pembengkokan atau patahan dari objek tersebut [4]. *Beam* biasanya ditemui dalam beberapa mesin atau struktur bangunan tertentu dengan transmisi getaran 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 dan kenaikan dari posisi awal. Salah satu contoh dari *beam* sederhana terdapat pada salah satu bagian dari struktur jembatan yaitu batang seperti berikut:



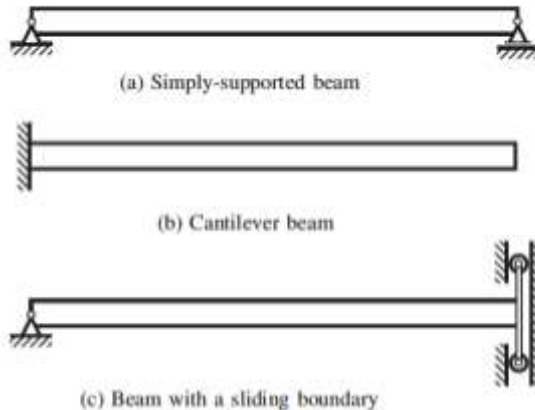
Gambar 2. 2 Representasi skematik dari *beam* yang terkena defleksi planar [4]



Gambar 2.3 Defleksi yang terjadi pada *beam* dengan batas kondisi khusus (a) *beam* dengan penyangga sederhana (b) *beam* dengan batas bergeser [4]

2.4 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.



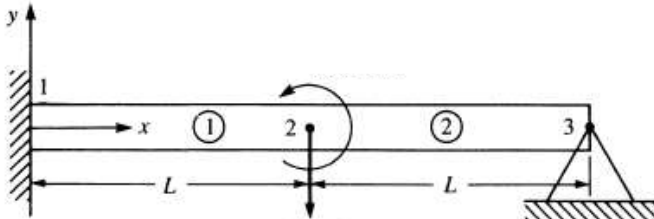
Gambar 2.4 Jenis-jenis *beam*

2.5 Elemen hingga

Prinsip dasar yang mendasari elemen hingga relatif sederhana dimana diperlukan distribusi variabel lapangan, misalnya perpindahan. Penyelesaian elemen hingga dilakukan dengan cara membagi obyek analisis menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga dan disebut elemen hingga. Satu elemen tersebut saling berhubungan dengan elemen yang lain dengan ketentuan bahwa satu elemen dibatasi oleh dua node. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisis dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian keseluruhan daerah obyek [5].

Pada tugas akhir ini, tinjauan elemen hingga dilakukan pada isolasi getaran di jembatan rel kereta api, dapat dilihat sebagai batang dengan panjang bentangan L dan diapit oleh node. Pada batang tersebut dipotong-potong menjadi beberapa elemen, dan dalam satu elemen terdiri dari 2 node. Semakin banyak elemen

yang terbagi maka akan semakin baik dalam perhitungan elemen hingga. Beban yang bekerja pada *beam* akan mengakibatkan defleksi (lendutan) pada setiap bagian dari *beam*. Dengan adanya defleksi yang umumnya tidak sama di setiap bagian, maka akan timbul *slope* (kemiringan sudut *beam*) yang disetiap bagiannya juga tidak sama. Analisis *beam* ditujukan untuk mengetahui defleksi dan *slope* yang timbul, dan dari kedua besaran ini dapat dihitung tegangan pada *beam* [6].



Gambar 2.5 Elemen *beam* dengan elemen hingga [6]

Elemen hingga didasarkan pada persamaan diferensial orde 4:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} \quad (2.1)$$

Teori *beam* didasarkan pada persamaan garis elastisitas yang dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$M = EI \frac{d^2 W}{dx^2} \quad (2.2)$$

Keterangan :

- M = momen batang di setiap titik (gaya x panjang)
- E = Modulus elastisitas dari bahan (gaya/luas)
- I = momen inersia penampang *beam*
- W = defleksi ke arah tegak lurus *beam* di setiap titik
- x = kordinat ke arah sumbu *beam*

Defleksi W pada *beam* akan menerbitkan *slope* yang dinyatakan dengan persamaan:

$$\theta = \frac{dW}{dx} \quad (2.3)$$

Pada *beam* bekerja gaya melintang yang dikenal dengan gaya geser (*shear force*) dan dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{dV}{dx} = p(x) \quad (2.4)$$

$$V = \frac{dM}{dx} \quad (2.5)$$

Keterangan :

V = gaya geser *beam*;

$p(x)$ = gaya melintang *beam*;

θ = *slope*

Substitusi persamaan (2.4) dan (2.5) ke persamaan (2.2) akan memberikan persamaan :

$$d^2(EI \frac{d^2W}{dx^2})/dx^2 = p(x) \quad (2.6)$$

Penyelesaian persamaan (2.6) adalah mencari harga defleksi W , dan selanjutnya harga *slope* pada persamaan (2.3) dapat ditentukan. Penyelesaian dengan metoda elemen hingga dilakukan dengan membagi *beam* menjadi sejumlah elemen dan menentukan terlebih dahulu persamaan defleksi W yang berlaku pada suatu elemen. Harga defleksi W sebagai fungsi x dinyatakan dengan:

$$W = C_1 + C_2x + C_3x^2 + C_4x^3 \quad (2.7)$$

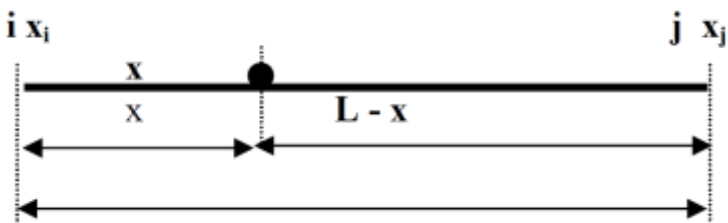
Dari ini persamaan *slope* dapat dinyatakan dengan :

$$\theta = C_2 + 2C_3x + 3C_4 \quad (2.8)$$

Keterangan :

C_1, C_2, C_3 dan C_4 = konstanta yang akan ditentukan kemudian persamaan (2.7) dan (2.8) didasarkan pada koordinat Cartesian setempat, di mana sumbu X diambil searah dengan sumbu *beam* dan sumbu Y diambil pada arah defleksi W .

Untuk mempermudah penyelesaian matematik pada proses selanjutnya, perlu dipakai kordinat lokal, seperti pada uraian berikut :



Gambar 2. 6 Kordinat lokal [6]

Keterangan :

i, j = node (simpul)

L = panjang elemen

x_i = kordinat node i

x_j = kordinat node j

Untuk ini didefinisikan :

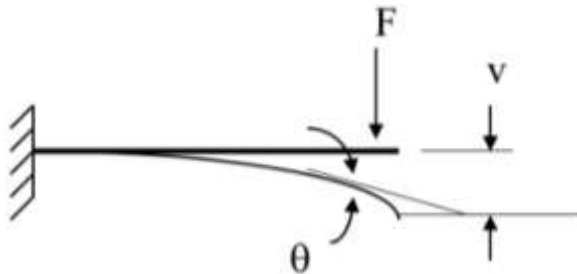
$$L = x_j - x_i \quad (2.9)$$

Harga defleksi W dinyatakan dengan persamaan :

$$W = Na^e = N_{wi}W_i + N_{\theta i}\theta_i + N_{wj}W_j + N_{\theta j}\theta_j \quad (2.10)$$

2.6 Matriks Kekakuan *Beam*

Matrik kekakuan k berpengaruh pada gaya potong dan gaya kelengkungan dari *beam*. Pada gambar di bawah ini terlihat bahwa *beam* mengalami kedua gaya secara bersamaan yang menghasilkan defleksi dan rotasi.



Gambar 2. 7 Gaya-gaya yang bekerja pada *beam* [6]

Untuk mengetahui besarnya defleksi dan rotasi dari *beam*, dapat dilihat pada matriks kekakuan lokal berikut ini :

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

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

$$F = k \cdot x \quad (2.12)$$

Defleksi x merupakan parameter yang nilainya akan dicari untuk melihat respon jembatan terhadap beban berjalan. Setelah k

dihitung dari masing-masing node, maka diperoleh matriks kekakuan selanjutnya yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai defleksi dan rotasi dari *beam* [7].

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & -\frac{6}{L} & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Dengan matriks kekakuan sebagai berikut :

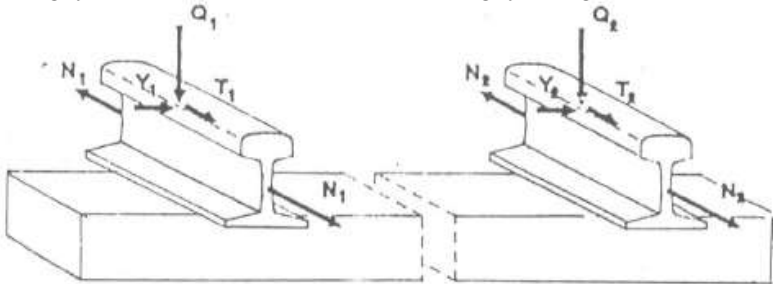
$$k = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Keterangan :

- E = Modulus Young Bahan
- A = *Cross-sectional Area* dari elemen
- L = Panjang elemen
- c = $\cos \theta$
- s = $\sin \theta$

2.7 Beban dan Gaya pada Jembatan Rel Kereta Api

Pembebanan dan pergerakan kereta api di atas struktur jalan rel menimbulkan berbagai gaya pada rel diantaranya gaya vertikal (Q), gaya transversal atau lateral (Y) dan gaya longitudinal (T).



Gambar 2. 8 Gaya pada rel kereta api [8]

Beban-belan ini berpengaruh terhadap defleksi rel kereta api, dapat dilihat pada gambar berikut [8] :

- Gaya vertikal, adalah beban yang paling dominan dalam struktur jalan rel dan menyebabkan terjadinya defleksi vertikal. Secara umum, besarnya gaya vertikal dipengaruhi oleh pembebanan oleh lokomotif, kereta dan gerbong. Perhitungan yang dihasilkan adalah beban statik, sedangkan beban yang terjadi pada struktur jalan rel adalah beban dinamis, sehingga diperlukan transformasi gaya statik ke gaya dinamik dengan persamaan TALBOT (1918) berupa pengali faktor dinamis sebagai berikut :

$$I_p = 1 + 0,01 \left(\frac{v}{1,609} - 5 \right) \quad (2.15)$$

Keterangan :

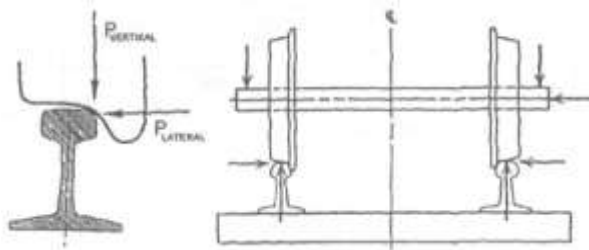
I_p = Faktor dinamis

A = Kecepatan rencana (dalam km/jam)

- Gaya Transversal (Lateral), terjadi akibat adanya gaya sentrifugal ketika rangkaian kereta api berada di lengkung horizontal, gerakan ular rangkaian dan ketidakrataan geomtrik jalan rel pada titik yang sama dengan gaya vertikal. Gaya ini dapat menyebabkan tercabutnya penambat akibat gaya angkat (*uplift force*), pergeseran pelat andas dan memungkinkan terjadinya *derailment* (anjlog atau keluarnya roda kereta dari rel). Syarat pembatasan besarnya gaya lateral, sebagai berikut:

$$\frac{P_{lateral}}{P_{vertikal}} < 1,2, \text{ agar rel roda tidak keluar rel} \quad (2.16)$$

$$\frac{P_{lateral}}{P_{vertikal}} < 0,75, \text{ untuk roda yang aus} \quad (2.17)$$



Gambar 2. 9 Skematik gaya lateral pada rel kereta [8]

- Gaya longitudinal, dapat diakibatkan oleh perubahan suhu pada rel (*thermal stress*). Gaya longitudinal juga merupakan gaya adhesi akibat gesekan roda dan kepala rel dan gaya akibat pengereman roda terhadap rel.

2.8 Konsep Perhitungan Beban menggunakan Teori Balok di Atas Tumpuan Elastik

Teori *Beam on Elastik Foundation* (BEF) [9], pertama kali oleh Winkler pada tahun 1867 untuk perhitungan tegangang komponen jalan rel. Rel didisain menggunakan konsep "*beam-on-elastic foundation model*" dengan mengasumsikan bahwa setiap rel akan berperilaku sebagai balok menerus yang diletakkan di atas tumpuan elastik. Modulus fondasi jalan rel (sebagai tumpuan), k , didefinisikan sebagai gaya tumpuan per unit panjang rel per unit defleksi rel, dengan persamaan diferensial sebagai berikut :

$$F(x) = -k \cdot y(x) \quad (2.18)$$

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k \cdot y = 0 \quad (2.19)$$

Keterangan :

$F(x)$ = Reaksi merata per satuan panjang

k = Modulus elastisitas jalan rel

y = Defleksi akibat beban pada rel

E = Modulus elastisitas baja penyusun rel

I = Momen inersia rel

Penyelesaian persamaan diferensial tersebut untuk defleksi rel, $y(x)$ pada setiap jarak x sepanjang rel akibat dari pembebanan titik terpusat P , adalah :

$$y(x) = \frac{P\lambda}{2k} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (2.20)$$

$$\text{dengan } \lambda = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.21)$$

Kemiringan (*slope*), momen (bending moment), dan gaya geser (*shear force*) pada setiap titik di sepanjang rel akibat beban titik terpusat P diberikan sebagai berikut :

$$\theta(x) = -\frac{P\lambda^2}{2k} e^{-\lambda x} (\cos\lambda x + \sin\lambda x) \quad (2.22)$$

$$M(x) = \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos\lambda x + \sin\lambda x) \quad (2.23)$$

$$V(x) = -\frac{P}{2} e^{-\lambda x} (\cos\lambda x) \quad (2.24)$$

Keterangan :

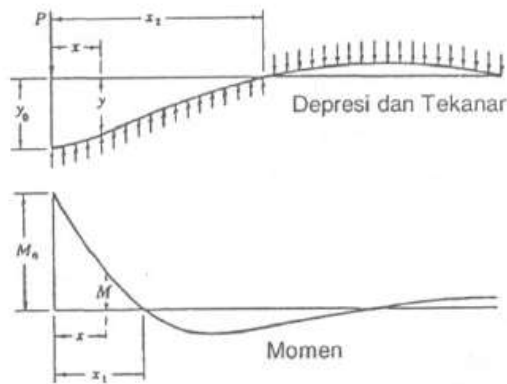
k = Modulus elastisitas jalan rel

λ = *Damping factor*

I = Momen inersia rel pada sumbu x-x

E = Modulus elastisitas rel ($2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)

I = Momen inersia rel



Gambar 2. 10 Defleksi dan momen akibat pembebanan [8]

Momen nol ($M = 0$) terjadi jika : $\cos\lambda x - \sin\lambda x = 0$, maka posisi momen nol terletak pada :

$$X_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{\lambda}, \text{ untuk } \lambda = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}}, \text{ maka } \lambda = \frac{\pi}{4X_1}$$

Sehingga dapat disubstitusikan pada kondisi momen maksimum dan defleksi maksimum sebagai berikut :

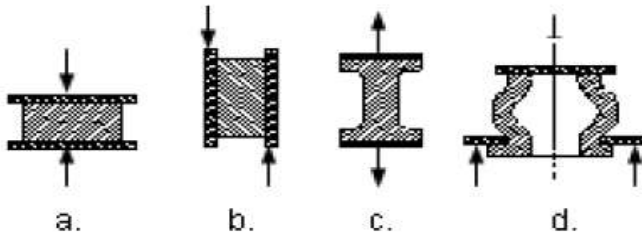
$$M_m = \frac{Pd}{4} = \frac{P \cdot X_1}{\pi} = 0,318 P \cdot X_1 \quad (2.25)$$

$$Y_m = \frac{Pd}{2k} = \frac{Pd.\pi}{8.k.X_1} = 0,393 \frac{P.d}{k.X_1} \quad (2.26)$$

2.9 Bantalan Isolasi Getaran pada Jembatan Kereta Api

Tujuan dari penggunaan isolator adalah untuk mendapatkan harga frekuensi natural dan redaman sistem struktur sesuai dengan nilai yang diinginkan. Frekuensi natural dari sistem ditentukan oleh massa dan kekakuan sistem yang merupakan kekakuan gabungan antara struktur bangunan dengan kekakuan isolator. Nilai kekakuan dan redaman sistem ditentukan dengan melakukan pemilihan jenis isolator yang sesuai dengan nilai yang diinginkan. Dalam menganalisis hubungan antara parameter bahan isolasi (seperti *modulus young* Y , *poisson* μ , serta *density* ρ) dan frekuensi natural perlu menentukan model atau jumlah fisik utama untuk isolasi, karena model yang optimal mampu menghindari resonansi dengan baik [10]. Beberapa bahan yang dipakai dalam penelitian ini yaitu :

- Bantalan Baja dan Aluminium
Baja dan aluminium memiliki modulus elastisitas yang tinggi, sehingga diharapkan mampu meredam suatu getaran yang diakibatkan oleh beban kereta api.
- Bantalan Karet
Karet mempunyai kekakuan dan redaman yang baik sehingga dapat membantu meredam sebagian energi luar yang masuk ke struktur [11].



Gambar 2. 11 Jenis fungsi isolator karet (a) tekan, (b) geser, (c) tarik, (d) entur [10].

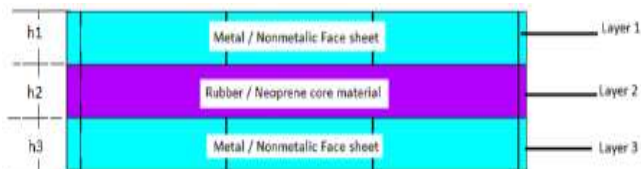
Jenis karet yang digunakan untuk isolasi getaran, adalah *natural rubber*, *neoprene*, dan FRP (*Fibreglass Reinforced Plastic*) [12]. Tabel 2.1, di bawah ini menunjukkan sifat bahan yang sering difungsikan sebagai peredam getaran.

Tabel 2. 1 Sifat bahan [12]

<i>Type of Bahan</i>	<i>Modulus Young (Gpa)</i>	<i>Shear Modulus (Gpa)</i>	<i>Density (kg/m³)</i>	<i>Poisson's Ratio</i>
Aluminium	70	27.3	2766	0,33
<i>Steel</i>	200	80	7850	0,3
FRP	2	0,5	1700	0,3
<i>Rubber</i>	0,00154	0,005	950	0,45
<i>Neoprene</i>	0,0008154	0,000273	960	0,49

- *Sandwich Cantilever Beam*

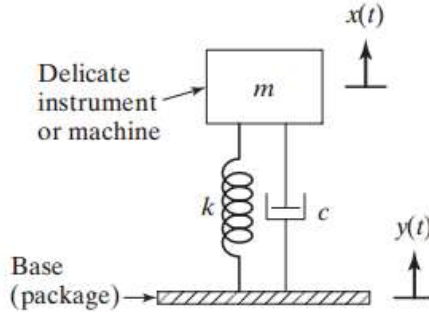
Karakteristik redaman yang baik dapat dilakukan dengan menggabungkan bahan metal dengan elastomer atau yang lebih umum disebut *sandwich structure*. Tahun 2016, dalam jurnal Dhoble dijelaskan beberapa bahan yang menghasikan karakteristik redaman baik yaitu gabungan dari beberapa bahan, seperti *steel*, aluminium, *natural rubber*, FRP (*Fibreglass Reinforced Plastic*), dan *neoprene* [13].



Gambar 2. 12. Sandwich *beam* model

2.10 Transmissibility

Transmissibility biasanya digunakan dalam bidang peredam getaran untuk mengurangi efek energi getaran yang tidak diinginkan [14]. Model sederhana untuk isolator getaran dapat direpresentasikan dalam *single-degree-of-freedom* seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 13 Isolator getaran

Transmissibility merupakan rasio amplitudo gaya atau *displacement* getaran pada bantalan terhadap amplitudo gaya atau *displacement* getaran pada mesin (input) [15]. Berikut merupakan fungsi umum prinsip *transmissibility* :

$$Tr = \frac{\text{Amplitudo gaya yang ditransmisikan}}{\text{Amplitudo gaya pada input}}$$

Gaya yang transmissikan ke pondasi dapat dikurangi dengan menggunakan peredam yang baik. Gaya yang ditransmisikan ke pondasi adalah penjumlahan dari gaya pegas dan gaya dari *damper*. Amplitudo gaya yang ditransmisikan ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$F_T = \sqrt{[(kx)^2 + (c\omega x)^2]} \quad (2.27)$$

Rumus untuk rasio *transmissibility* absolut-nya ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

$$T_a = \frac{F_T}{F} = \frac{x\sqrt{(k)^2 + (c\omega)^2}}{F} \quad (2.28)$$

$$T_a = \frac{\sqrt{1+4\zeta^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2+4\zeta^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (2.29)$$

Rumus matematis koefisien peredam untuk sistem yang memiliki satu derajat kebebasan atau disebut *Single Degree of Freedom* (SDOF) ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$c = 2\xi\sqrt{k \cdot m_{total}} \quad (2.27)$$

Nilai frekuensi natural, rasio redaman, dan rasio frekuensi dinyatakan pada persamaan dibawah ini :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_{total}}} \quad (2.28)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m_{total}}} \quad (2.29)$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2.30)$$

dengan :

F_T = gaya yang ditransmisikan (N),

T_a = rasio *transmissibility* absolut (dB),

ω = kecepatan putar (rad/s),

ω_0 = frekuensi natural,

r = rasio frekuensi,

c = koefisien redaman (Ns/m),

k = *spring stiffness* (N/m),

m_{total} = massa total (kg),

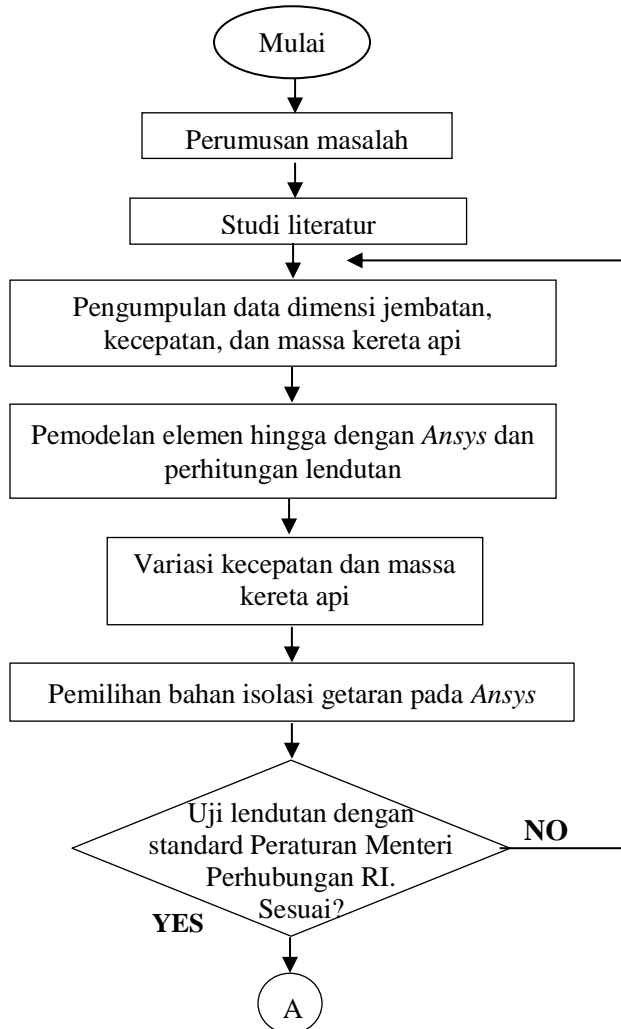
x = *displacement* (m),

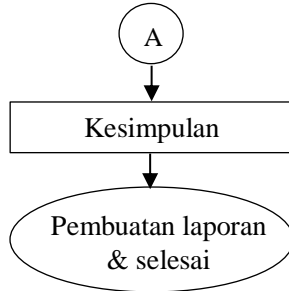
ζ = rasio redaman.

“Halaman ini Memang Dikосongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Diagram alir untuk tugas akhir mengenai “Pengaruh Bahan Isolasi Getaran terhadap Pola Lentutan Jembatan Rel Kereta Api dalam Tinjauan Elemen Hingga” adalah sebagai berikut:





Gambar 3. 1 Diagram alir

3.1 Pengumpulan Data Dimensi Jembatan, Massa, dan Kecepatan Kereta Api

Tahap pertama *flow chart* setelah perumusan masalah dan studi literatur adalah pengumpulan data jembatan, massa, dan kecepatan kereta api yang melintas.

3.1.1 Dimensi Jembatan Kereta Api

Jembatan yang diteliti yaitu Jembatan Lahor, Malang dengan data-data dimensi yang menjadi acuan adalah tugas akhir dari Herlangga, 2017 sebagai berikut [16]:



Gambar 3. 2 Jembatan Lahor [16]

- Nama Jembatan : Jembatan Lahor
- Lokasi : Karangates, Kab. Malang, Jatim

- Jenis Jembatan : Jembatan rangka baja terbuka
- Panjang Jembatan : 160 m,
- terbagi menjadi 4 bentang dengan panjang masing-masing bentang 40 m
- Lebar Jembatan : 5 m,
- Tipe Rel : R54
- Letak Jembatan : > 5 km dari pantai
- Zona Gempa : Zona Gempa Kab. Malang

3.1.2 Massa dan Kecepatan Kereta Api

Massa dan kecepatan kereta api yang akan diteliti pada tugas akhir ini adalah massa dan kecepatan kereta yang melintasi jembatan Lahor tersebut. Berdasarkan data dari Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) menunjukkan bahwa ada beberapa kereta api yang melintasi rute jembatan Lahor untuk sampai di stasiun akhir. Dalam penelitian ini, diambil dua kereta api dengan tujuan dan tipe kelas kereta yang berbeda, yaitu :

- Kereta Api Malabar
Merupakan kereta api kelas campuran dari kelas eksekutif, bisnis, dan ekonomi yang dirangkai dalam satu rangkaian kereta api dengan rute perjalanan Bandung-Malang. Kereta malabar terdiri dari 10 kereta yaitu 1 lokomotif, 2 kereta eksekutif, 1 kereta makan dan pembangkit, 2 kereta bisnis, 2 kereta ekonomi, dan 2 kereta bagasi dengan massa berbeda-beda tiap keretanya. Berdasarkan KNKT, 2014 dilampirkan massa per kereta sebagai berikut [17]:
 - Lokomotif CC 2016 : 84 ton
 - Kereta Eksekutif 1 : 40 ton, dengan 50 kursi
 - Kereta Eksekutif 2 : 40 ton, dengan 50 kursi
 - Kereta MP : 37 ton
 - Kereta Bisnis 1 : 37 ton, dengan 80 kursi
 - Kereta Bisnis 2 : 37 ton, dengan 80 kursi
 - Kereta Ekonomi 1 : 37 ton, dengan 106 kursi
 - Kereta Ekonomi 2 : 37 ton, dengan 106 kursi
 - Kereta Bagasi 1 : 35 ton
 - Kereta Bagasi 2 : 35 ton

Kemudian, untuk kecepatan kereta api Malabar yaitu antara 70 s/d 100 km/jam sesuai standar kecepatan kereta api Malabar yang diizinkan.

- **Kereta Api Penataran**

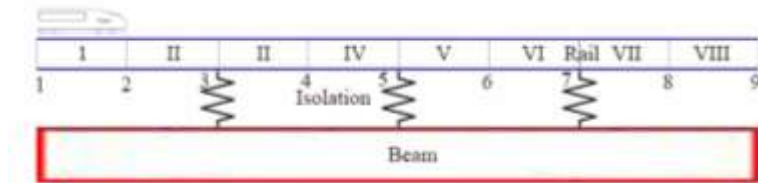
Merupakan kereta api kelas ekonomi dengan rute perjalanan Surabaya-Blitar. Kereta penataran terdiri dari 8 kereta ekonomi. Berdasarkan KNKT, 2009 dilampirkan massa per kereta sebagai berikut [18] :

- Lokomotif CC 20144 : 84 ton
- Kereta Ekonomi 1 : 34 ton, dengan 108 kursi.
- Kereta Ekonomi 2 : 34 ton, dengan 108 kursi.
- Kereta Ekonomi 3 : 34 ton, dengan 108 kursi.
- Kereta Ekonomi 4 : 34 ton, dengan 108 kursi.
- Kereta Ekonomi 5 : 34 ton, dengan 108 kursi.
- Kereta Ekonomi 6 : 34 ton, dengan 108 kursi.
- Kereta Ekonomi 7 : 34 ton, dengan 108 kursi.

Kemudian, untuk kecepatan kereta api Penataran akan yaitu antara 60 s/d 80 km/jam sesuai standar kecepatan kereta api Penataran yang diizinkan.

3.2 Perhitungan dan Pemodelan Elemen hingga

Penelitian ini menggunakan perhitungan lendutan dengan *Ansys Workbench 18.1*,



Gambar 3. 3 Perancangan *design* penelitian

Keterangan :

- Volume rel : 160 m x 5 m x 0,35 m
- Valome isolasi getaran : 6 m x 5 m x 0,4 m (5 lapis)
- Valume *beam* : 160 m x 5 m x 1,2 m
- Penopang : 14 m x 6 m x 20 m (3 penopang)
- Panjang per elemen : 20 m
- Panjang gerbong : 20 m

Elemen hingga pada *beam* dilihat dari persamaan diferensial

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = 0 \quad (3.1)$$

dimana $v(x)$ adalah defleksi *beam*, dan dinyatakan dalam polinomial derajat tiga sebagai berikut:

$$v(x) = a_1 + a_2x + a_3x^4 + a_4x^3 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v(x)}{\partial x} = a_2 + 2a_3x + 3a_4x^2 \quad (3.3)$$

$$\text{memenuhi persamaan } \frac{\partial v(x)}{\partial x} = \theta_1 \quad (3.4)$$

Koefisien a_i akan ditentukan dari kondisi batas dari setiap node:

- Pada $x = 0$, maka:

$$v = v_1 \text{ dan } v = a_1 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = a_2 = \theta_1 \quad (3.6)$$

- Pada $x = L$, maka:

$$v = v_2 \text{ dan } v_2 = a_1 + a_2L + a_3L^4 + a_4L^3 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \theta_2 = a_2 + 2a_3L + 3a_4L^2 \quad (3.8)$$

Dari persamaan tersebut, diperoleh persamaan $v_1, \theta_1, v_2, \theta_2$ dan dinyatakan masing-masing dalam a_1, a_2, a_3, a_4 . [7]

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & L & L^2 & L^3 \\ 0 & 1 & 2L & 3L^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

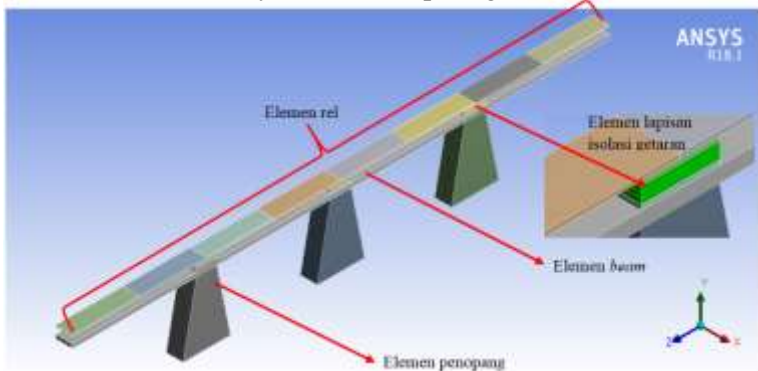
Substitusi masing-masing a_1, a_2, a_3, a_4 ke persamaan (3.2), diperoleh:

$$v(x) = v_1 + x\theta_1 - \frac{3x^2}{L^2}v_1 - \frac{2x^2}{L}\theta_1 + \frac{3x^2}{L^2}v_2 - \frac{x^2}{L}\theta_2 + \frac{2x^3}{L^3}v_1 + \frac{x^3}{L^2}\theta_1 - \frac{2x^3}{L^3}v_2 + \frac{x^3}{L^2}\theta_2 \quad (3.10)$$

$$v(x) = f_1(x)v_1 + f_2(x)\theta_1 + f_3(x)v_2 + f_4(x)\theta_2 \quad (3.11)$$

Solusi persamaan orde 4 tersebut hanya berlaku untuk mencari *displacement* pada 1 elemen, sehingga tidak bisa mendapatkan respon serentak dari banyak elemen dan tidak bisa menggambarkan

kondisi sesungguhnya. Sementara, desain jembatan pada tugas akhir ini memiliki banyak elemen seperti gambar 3.4:



Gambar 3. 4 Tinjauan elemen hingga

Berdasarkan gambar 3.4, dapat dilihat bahwa struktur elemen pada jembatan tidak hanya satu baris, namun terdiri dari elemen rel kereta, yang ditumpuk dengan elemen isolasi getaran di bawahnya, ditumpuk lagi dengan elemen beam, dan ditumpuk dengan elemen penopang jembatan di struktur paling bawah. Diantara 1 elemen ke elemen lain perlu *assembly* dari struktur jembatan paling atas ke struktur di bawahnya. Sehingga metode elemen hingga sangat membantu dalam penyelesaian mencari respon *displacement* pada tugas akhir ini.

Elemen hingga yang digunakan di jembatan Lahor dengan panjang 160 meter yaitu membagi rel menjadi 8 elemen dan 9 node dengan panjang 1 elemen-nya 20 meter. Terdapat sambungan rel di setiap 2 elemen (40 meter), dimana setiap sambungan dipasang *sandwich material* di antara *beam* dan rel sebagai isolasi getaran agar mengurangi besarnya lendutan akibat melintasnya kereta api dengan massa dan kecepatan tertentu. Sementara panjang satu gerbong kereta, diasumsikan 20 meter. Jadi, untuk 1 elemen dapat dikenai gaya dari 1 gerbong kereta.

3.2.1 Frekuensi Natural

Frekuensi natural f_n dapat dicari sesuai kondisi bahan yang diterapkan. Menurut *Roark's Formula for Stress and Strain*,

persamaan untuk mencari frekuensi natural dari tiap-tiap mode bergantung jenis tumpuannya. Untuk uniform *beam* yang memiliki tumpuan *fixed*, persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$fn = \frac{Kn}{2\pi} \sqrt{\frac{E.I.g}{wl^4}} \quad (3.1)$$

Dimana,

$$w = A. \rho. g \quad (3.2)$$

Keterangan :

fn = Frekuensi natural mode ke-n (Hz)

Kn = Konstanta pada mode ke-n

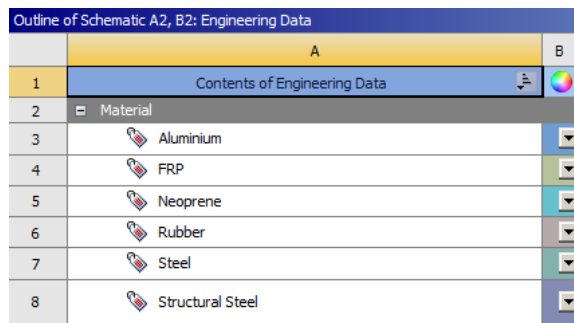
w = Beban per unit panjang (N/m)

Penentuan jumlah mode dan posisi juga dijelaskan dalam *Roark's Formula*. Dalam kasus ini, frekuensi natural yang dicari sebanyak 5 mode. Dari persamaan diatas, nilai Kn berubah-ubah pada tiap modes, sesuai tabel 3.1 :

Tabel 3. 1 Nilai Kn mode 1-5 [22]

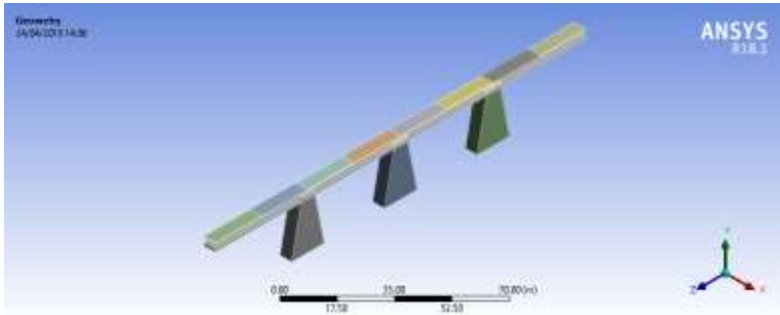
Mode	K_n	Nodal position / l						
1	22.4	0.0	1.00					
2	61.7	0.0	0.50	1.00				
3	121	0.0	0.36	0.64	1.00			
4	200	0.0	0.28	0.50	0.72	1.00		
5	299	0.0	0.23	0.41	0.59	0.77	1.00	

Kemudian, frekuensi natural dalam simulasi *Ansys* dicari melalui menu *modal* dengan menginput nilai bahan pada *engineering data* seperti gambar 3.5 :



Gambar 3. 5 Variasi bahan penelitian

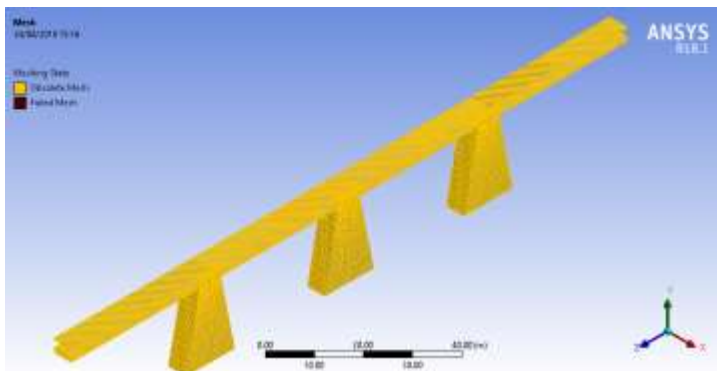
Setelah parameter bahan di-input pada masing-masing bahan, pemodelan sistem dibuat pada *design modeler* dengan *design* seperti gambar 3.6:



Gambar 3. 6 *Design modeler* Jembatan Lahor

Design yang dimodelkan sama dengan rancangan penelitian yaitu dibagi menjadi 8 komponen dengan memberi tumpuan *fixed support beam* pada kedua ujung jembatan. Pemodelan juga diberi 3 penopang yang diletakkan di bawah *beam* dengan jarak antara masing-masing penopang 40 meter.

Elemen hingga pada *Ansys* dilakukan dengan *meshing* dan memilih *sizing* sesuai kebutuhan *finite*. Pada model ini, *element size* pada *meshing* dibuat sebesar 0,8 meter, tampilan setelah *meshing* dapat dilihat pada gambar 3.7:



Gambar 3. 7 Jembatan setelah *meshing*

Hasil frekuensi natural dapat diketahui dengan *solve* program *Ansys* yang telah dibuat.

3.2.2 Kekakuan

Kekakuan adalah faktor penting yang dapat mempengaruhi besarnya nilai defleksi. Kekakuan isolasi getaran pada jembatan Lahor dihitung, baik kekakuan satu bahan maupun bahan gabungan. Persamaan kekakuan dituliskan sebagai berikut [19] :

$$K_c = \frac{1}{\sum\left(\frac{1}{K_{en}}\right)} \quad (3.3)$$

Dimana,

$$K_{en} = \frac{E.A}{t_n} \quad (3.4)$$

Keterangan :

K_c = Kekakuan gabungan

K_{en} = Kekakuan *compressive* layer ke-n

E = Modulus Elastisitas

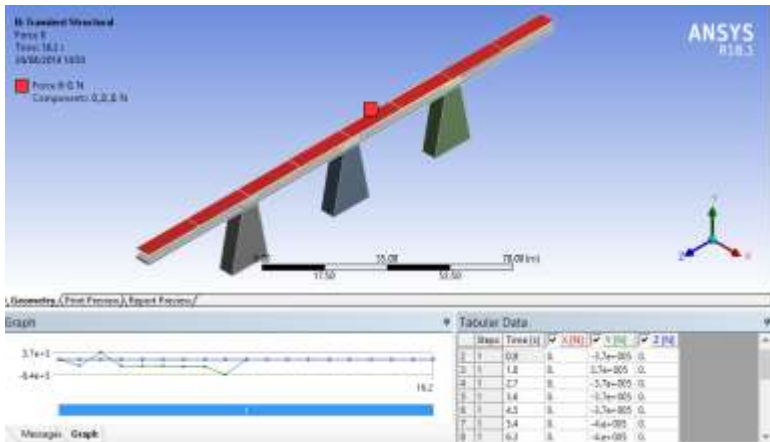
A = Luas permukaan

t_n = Ketebalan

Kekakuan penting dalam merancang suatu struktur agar dapat melihat defleksi yang diijinkan. Kekakuan suatu bahan menunjukkan besarnya lendutan di bawah beban yang ditentukan.

3.2.3 Pola Lendutan

Lendutan per variasi yang diterapkan untuk jembatan Lahor dapat dilihat setelah dilakukan pemberian beban dinamis yang berjalan dengan fungsi waktu (*transient*), sehingga pada *Ansys* diperlukan sistem analisis *transient structural*. Pemberian beban dilakukan dengan memberi *force* (gaya) sesuai berat gerbong, waktu dan kecepatan kereta saat melewati jembatan Lahor, seperti pada gambar 3.8:



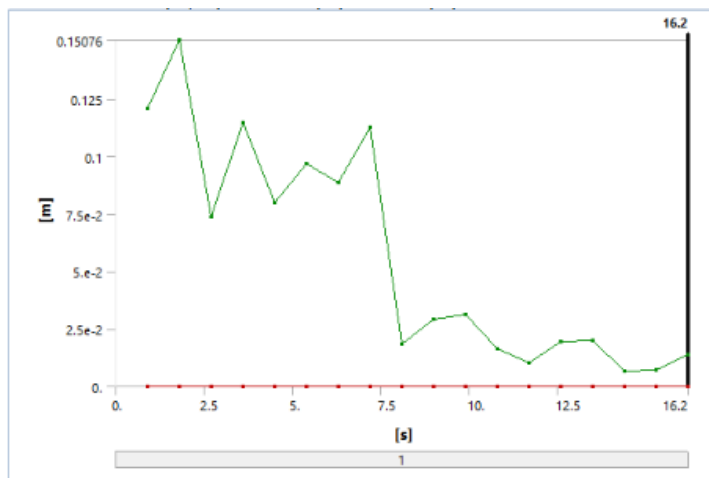
Gambar 3. 8 Pemberian *force* pada *transient analysis*

Pola dan besarnya nilai lendutan pada jembatan Lahor, dilakukan *insert deformation total* pada menu *solution*, kemudian *solve* sehingga akan keluar pola serta nilai maksimum dan minimum deformasi yang terjadi pada jembatan Lahor, seperti gambar 3.9:



Gambar 3. 9 Lendutan jembatan Lahor

Grafik pola lendutan dapat dilihat pada *report review* bagian *solution*, seperti gambar 3.10 :



Gambar 3.10 Pola lendutan jembatan Lahor

3.3 Perbandingan Pola Lendutan dengan Variasi Kecepatan dan Massa

Seperti yang telah dijelaskan pada 3.1 bahwa analisis mengenai pola lendutan akan divariasikan dengan massa dan kecepatan oleh dua kereta api, yaitu kereta api Malabar dan kereta api Penataran. Variasi tersebut akan dibandingkan terhadap beberapa bahan yang akan dipakai untuk isolasi getaran pada jembatan kereta api. Semua pola lendutan dibandingkan antara variasi satu dengan variasi yang lain untuk menguji kelayakan deformasi yang diizinkan sesuai Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia.

3.4 Pemilihan Bahan Isolasi Getaran

Pemilihan bahan dilakukan di *Ansys* dengan meng-input parameter-parameter bahan yang dibutuhkan seperti *density*, modulus elastisitas, *poisson ratio*, bulk modulus, dan *shear modulus* pada menu *engineering data*. Beberapa variasi bahan yang digunakan adalah campuran dari baja dan bahan elastomer

yang memiliki fungsi sebagai isolasi getaran pada suatu struktur, sebagai berikut :

- *Steel-Steel-Steel*
- Aluminium-Aluminium-Aluminium
- Aluminium-Rubber-Aluminium
- Aluminium-Neoprene-Aluminium
- *Steel-Rubber-Steel*
- *Steel-Neoprene-Steel*
- FRP (*Fibreglass Reinforced Plastic*)-Rubber-FRP
- FRP (*Fibreglass Reinforced Plastic*)-Neoprene-FRP

Hasil antara bahan yang dipilih akan dibandingkan untuk mencari hasil lendutan yang paling baik.

3.5 Uji Lendutan dengan Standard Peraturan Menteri Perhubungan RI

Lendutan didefinisikan sebagai besaran penyimpangan (*deflection*) yang tidak boleh melebihi persyaratan koefisien terhadap panjang teoritis [20]. Koefisien lendutan maksimum jembatan baja, sebagaimana tersebut dalam Peraturan Menteri Nomor 60 Tahun 2012 dapat dilihat pada tabel 3.2 :

Tabel 3. 2 Koefisien lendutan maksimum jembatan baja

Jenis	Gelagar			Rangka Batang
Jenis Kereta	L (m)	L < 50	L ≥ 50	Seluruh Rangka
Lokomotif		L / 800	L / 700	L / 1000
Kereta Listrik dan/atau Kereta	V (km/h)	V < 100	L / 700	
		100 < V ≤ 130	L / 800	L / 700
		100 < V ≤ 130	L / 1100	L / 900

Dimana,

v = Kecepatan kereta api (km/jam)

L = Panjang bentang jembatan (m)

Pada tugas akhir ini, jembatan memiliki panjang 160 meter dengan kecepatan kereta kurang dari 100 km/jam. Sehingga lendutan maksimum yang diijinkan adalah sebesar :

$$\frac{L}{700} = \frac{160}{700} = 0,228 \text{ meter}$$

3.6 Kesimpulan dan Penyusunan Laporan

Langkah terakhir dari penelitian ini adalah penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan penelitian. Kesimpulan dilakukan dengan membandingkan hasil seluruh variasi pola lendutan yang terjadi di jembatan Lahor, Malang. Kemudian dicari hasil bahan isolasi getaran yang paling baik. Laporan penelitian yang akan dibuat dimulai dari bab pendahuluan sampai dengan hasil dan kesimpulan. Dengan adanya buku laporan penelitian ini, diharapkan laporan penelitian ini dapat menunjang atau mendukung penelitian-penelitian selanjutnya mengenai pola lendutan pada jembatan kereta api.

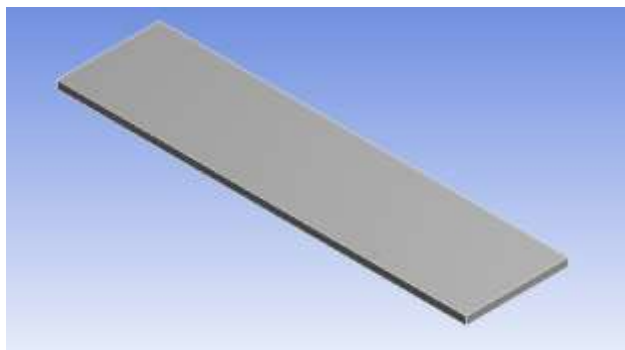
“Halaman ini Memang Dikongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menjelaskan tentang simulasi pemodelan jembatan kereta api yang memiliki peredam getaran diantara rel kereta dan *beam* dibawahnya. Jembatan dikenai beban dinamis kereta api Malabar dan kereta api Penataran saat kondisi gerbang kosong dan gerbang penuh. Isolasi getaran yang digunakan divariasikan dengan 8 variasi bahan. Dalam setiap variasi akan dibandingkan dan ditarik kesimpulan hasil lendutan paling baik.

4.1 Verifikasi Potongan *Beam*

Verifikasi potongan *beam* bertujuan untuk membuktikan bahwa selisih yang ditunjukkan antara hasil matematis dengan *Mathcad* dan simulasi *Ansys* menunjukkan hasil yang mendekati. Kemudian pada 4.2, akan dijelaskan simulasi dan analisis tugas akhir ini. Verifikasi perbandingan dimisalkan pada sebuah potongan beam dengan kondisi sebagai berikut :



Gambar 4. 1 Permisalan *beam*

- Panjang (L) = 20 meter
- Lebar = 5 meter
- Tinggi = 0,4 meter
- Luas penampang (A) = 2 meter
- Momen inersia = $\frac{bh^3}{12} = \frac{5.20^3}{12} = 3,333 \times 10^3 \text{ m}^4$

- Massa jenis (ρ) = 7850 kg/m³
- Modulus Young (E) = 2,10¹¹ Pa
- Kecepatan gravitasi = 9,81 m/s²

Pada verifikasi potongan *beam* ini, dicari perbandingan hasil *displacement*, gaya reaksi dan momen antara perhitungan matematis dan simulasi.

4.1.1 Verifikasi Elemen hingga (Matematis)

Perhitungan matematis, didapatkan dari pemodelan elemen hingga pada *Mathcad*.

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{5 \cdot 20^3}{12} = 3,333 \times 10^3$$

$$E = 2,10^{11} \text{ Pa}$$

$$L = 20 \text{ meter}$$

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \\ Y2 \\ M2 \end{pmatrix} = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta 1 \\ \theta 1 \\ \Delta 2 \\ \theta 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \\ Y2 \\ M2 \end{pmatrix} = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} 1,5 \times 10^{-3} & 0,015 & -1,5 \times 10^{-3} & 0,015 \\ 0,015 & 0,2 & -0,015 & 0,1 \\ -1,5 \times 10^{-3} & -0,015 & 1,5 \times 10^{-3} & -0,015 \\ 0,015 & 0,1 & -0,015 & 0,2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta 1 \\ \theta 1 \\ \Delta 2 \\ \theta 2 \end{pmatrix}$$

Y1 = Gaya node 1

M1 = Momen node 1

V2 = Gaya node 2

M2 = Momen node 2

Karena $\Delta 1$ dan $\theta 1$ bernilai 0, maka baris-kolom 1 dan 2 pada matriks dapat diabaikan untuk mencari $\Delta 2$ dan $\theta 2$. Diketahui $Y 2 = P = -840000 \text{ N}$; $M 2 = 0$,

$$\begin{pmatrix} \Delta 2 \\ \theta 2 \end{pmatrix} := \left[E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \right]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -840000 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.36 \times 10^{-6} \\ -2.52 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

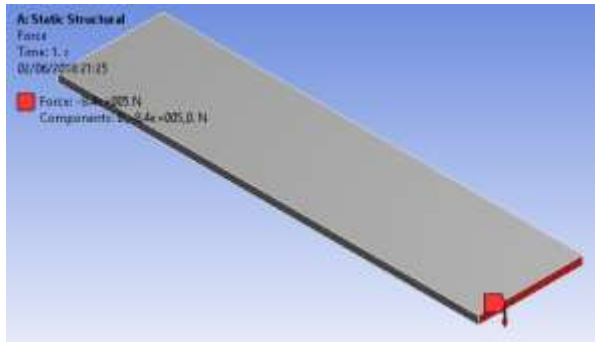
$$\begin{pmatrix} Y 1 \\ M 1 \\ -840000 \\ 0 \end{pmatrix} = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.36 \times 10^{-6} \\ -2.52 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

Dari hasil perkalian matriks, diperoleh hasil :

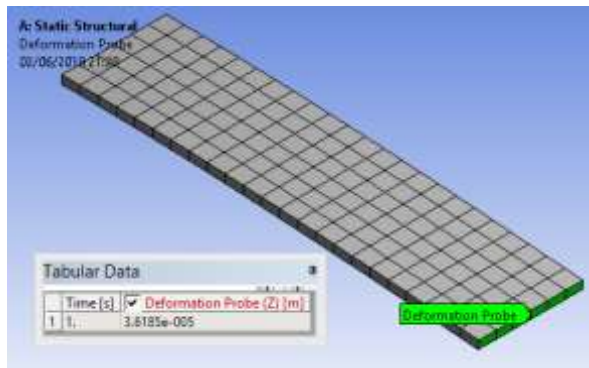
$$\begin{pmatrix} Y 1 \\ M 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 840000.0 \\ 1.68e7 \end{pmatrix}$$

4.1.2 Verifikasi Simulasi Ansys

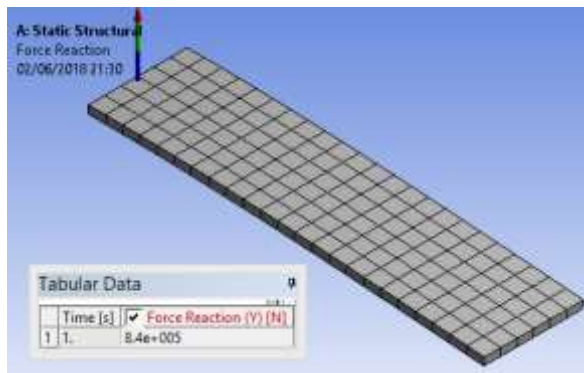
Hasil verifikasi simulasi didapatkan dari pemodelan *Ansys Workbench 18.1*, sebagai berikut :



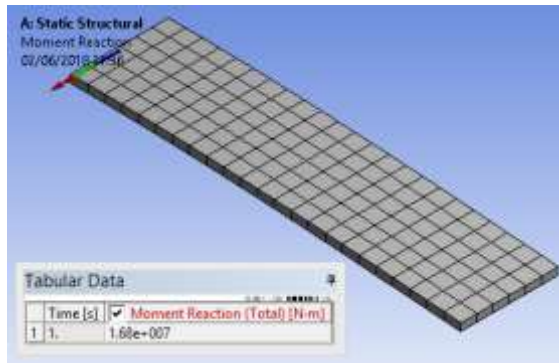
Gambar 4. 2 Simulasi *beam* dikenai gaya vertikal



Gambar 4. 3 *Displacement* node 2 simulasi *Ansys*



Gambar 4. 4 Gaya reaksi node 1 pada *Ansys*



Gambar 4. 5 Momen gaya node 1 Ansys

Nilai *displacement*, gaya reaksi, dan momen gaya pada metode matematis maupun simulasi *Ansys* memberikan nilai yang mendekati, perbandingan ketiga nilai tersebut disajikan dalam tabel 4.1 berikut :

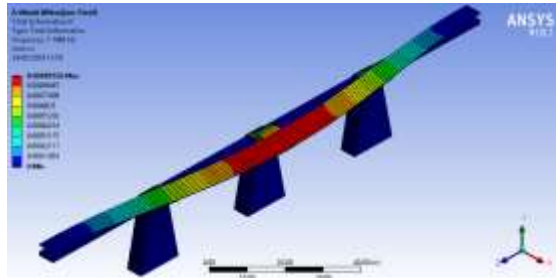
Tabel 4. 1. Perbandingan Matematis dan Simulasi Potongan *Beam*

Hasil	Metode		Selisih
	Matematis	Simulasi	
$\Delta 2$	$-3.36.10^{-6}$	$3.62. 10^{-5}$	$3.95. 10^{-5}$
V1	$8.40.10^5$	$8.40.10^5$	0
M1	$1,68.10^7$	$1,68.10^7$	0

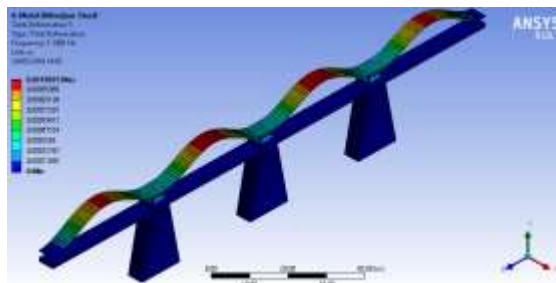
Hasil ini menunjukkan bahwa antara perhitungan *Mathcad* dan *ansys* dapat terverifikasi.

4.2 Frekuensi Natural Jembatan Lahor

Mencari nilai frekuensi natural bertujuan untuk mengetahui adanya pengaruh frekuensi natural pada respon sistem. Apabila frekuensi natural ini sama dengan frekuensi yang dihasilkan oleh jembatan Lahor ketika dikenai gaya eksitasi, maka akan terjadi resonansi. Sehingga kondisi ini perlu dihindari. Model frekuensi natural 5 mode, disimulasikan dengan *Ansys 18.1* dapat dilihat pada gambar 4.6:



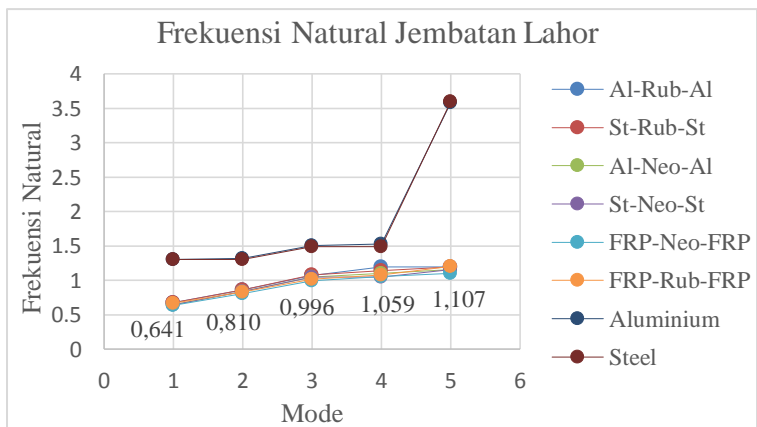
(d) Model frekuensi natural pada mode 4



(e) Model frekuensi natural pada mode 5

Gambar 4. 6 Frekuensi natural jembatan Lahor

Frekuensi natural pada jembatan Lahor, dicari pada 8 variasi bahan yang telah dijelaskan di 3.4, sebagai berikut :



Gambar 4. 7 Perbandingan frekuensi natural jembatan Lahor

Keterangan grafik menunjukkan campuran bahan yang dipakai pada isolasi getaran antara *beam* dan rel kereta:

- Al-Rub-Al = Aluminium-*Rubber*-Aluminium
- St-Rub-St = *Steel*-*Rubber*-*Steel*
- Al-Neo-Al = Aluminium-*Neoprene*-Aluminium
- St-Neo-St = *Steel*-*Neoprene*-*Steel*
- FRP-Neo-FRP = FRP-*Neoprene*-FRP
- FRP-Rub-FRP = FRP-*Rubber*-FRP
- *Aluminium*
- *Steel*

Berdasarkan grafik 4.7 tersebut, nilai frekuensi natural terkecil dari 8 variasi bahan adalah campuran dari FRP-*Neoprene*-FRP dengan nilai 5 mode yaitu 0,641; 0,809; 0,996; 1,059 dan 1,107, kemudian diikuti oleh *Steel*-*Neoprene*-*Steel*.

Dhoble, dalam jurnalnya tahun 2016 yang berjudul “*Study on Vibration Analysis of Sandwich Cantilever Beam using Finite Element Ansys Software*” [13] menunjukkan bahwa dibandingkan dengan bahan lainnya, FRP-*Neoprene*-FRP memiliki nilai frekuensi natural terendah, kemudian *St-Neoprene-St* menempati nilai frekuensi natural terendah kedua. Pernyataan ini didukung oleh Kumar tahun 2016 dalam laporan penelitiannya yang berjudul “*Vibration Analysis of Viscoelastic Sandwich Beam using Finite Element Method*” [22] menjelaskan bahwa bahan viskoelastic *neoprene* memiliki rasio redaman yang baik, diikuti pula oleh bahan *natural rubber*.

Pernyataan dari ke-dua jurnal tersebut dapat dijadikan verifikasi untuk hasil perbandingan frekuensi natural yang ditunjukkan oleh tugas akhir ini. Selain itu, penulis melakukan konvergensi elemen pada potongan rel kereta api dengan diberikan bahan FRP-*Neoprene*-FRP pada isolasi getarannya sebagai perbandingan selisih yang dihasilkan pada perbedaan antara 175 elemen sebagai patokan, dibandingkan dengan hasil frekuensi natural jika potongan rel tersebut di *finite* menjadi 306, 100, dan 56 elemen, disajikan dalam tabel 4.2 :

Tabel 4. 2 Konvergensi frekuensi natural FRP-Neo-FRP

Mode	FRP-Neo-Neo-Neo-FRP						
	175	306	Error (%)	100	Error (%)	56	Error (%)
1	0,641	0,641	0,01	0,641	0,01	0,640	0,08
2	0,810	0,809	0,04	0,810	0,00	0,809	0,08
3	0,996	0,996	0,01	0,997	0,07	0,996	0,01
4	1,059	1,059	0,02	1,059	0,04	1,057	0,17
5	1,107	1,107	0,01	1,107	0,01	1,106	0,07

Berdasarkan tabel 4.2 di atas, error yang dihasilkan pada semua variasi elemen menunjukkan persentase yang sangat kecil, membuktikan bahwa data frekuensi natural pada tugas akhir ini sudah terverifikasi.

Resonansi terjadi ketika nilai frekuensi natural f_n sama dengan nilai frekuensi setelah dikenai eksitasi f pada persamaan (4.1). Sehingga perlu dilihat rentang kecepatan kereta yang diperbolehkan melintas jembatan Lahor agar tidak terjadi resonansi. Hubungan antara frekuensi dan kecepatan dapat diketahui dari persamaan 4.1:

$$f = \frac{v}{d} \quad (4.1)$$

Keterangan:

- f = Frekuensi (Hz)
- v = Kecepatan kereta (km/jam)
- d = Jarak (m)

Nilai frekuensi eksitasi f didapatkan dengan memberi kondisi batas kecepatan yang mengacu pada 2 variasi kereta yang dipakai pada tugas akhir ini. Kecepatan kereta Malabar yang diizinkan yaitu 70 s/d 100 km/jam. Sementara kecepatan kereta Penataran yang diizinkan yaitu 60 s/d 80 km/jam. Sehingga dari persamaan 4.1 didapatkan frekuensi eksitasi dan rentang kecepatan dengan kondisi batas kecepatan 60 s/d 100 km/jam. Kemudian nilai frekuensi natural f_n dan frekuensi setelah eksitasi f dibandingkan dalam tabel 4.3:

Tabel 4. 3 Perbandingan frekuensi natural f_n mode 1 dan frekuensi eksitasi f jembatan Lahor

Bahan	F_n Mode 1 (Hz)	Kecepatan (km/jam)	Frekuensi (Hz)
<i>Steel-Rubber-Steel</i>	0,677	60	0,375
<i>Aluminium-Neoprene-Aluminium</i>	0,649	65	0,406
		70	0,438
<i>Aluminium-Rubber-Aluminium</i>	0,678	75	0,469
		80	0,500
<i>Steel-Neoprene-Steel</i>	0,649	85	0,531
<i>FRP-Neoprene-FRP</i>	0,641	90	0,563
<i>FRP-Rubber-FRP</i>	0,669	95	0,594
<i>Aluminum</i>	1,302	100	0,625
<i>Steel</i>	1,308	105	0,656

Berdasarkan tabel 4.3, dapat dilihat frekuensi eksitasi f dengan kecepatan 60 km/jam diperoleh 0,375 Hz. Nilai ini memiliki selisih yang jauh dengan frekuensi natrual f_n , sehingga jauh dari kondisi resonansi. Sementara saat kecepatan 100 km/jam, nilai frekuensi eksitasi f sebesar 0,625 Hz. Nilai ini perlu dihindari karena sudah mendekati nilai frekuensi natural f_n . Sehingga dapat dilihat bahwa rentang kecepatan kereta yang diizinkan melintas jembatan Lahor untuk menghindari adanya resonansi yaitu 60 s/d 95 km/jam.

4.3 Kekakuan Bahan

Salah satu yang mempengaruhi besar kecilnya lendutan pada jembatan Lahor ketika dikenai suatu beban dinamis adalah faktor kekakuan bahan yang dipasang pada isolasi getaran antara *beam* dan rel kereta api. Persamaan mencari nilai kekakuan ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini [19]:

$$k_{en} = \frac{E.A}{t_n} \quad (4. 2)$$

$$k_c = \frac{1}{\Sigma\left(\frac{1}{k_{en}}\right)} \quad (4.3)$$

Keterangan:

k_{en} = Kekakuan pada satu bahan

k_c = Kekakuan bahan gabungan (*sandwich* bahan)

E = Modulus elastisitas (N/m²)

A = Luas penampang (m²)

t_n = Ketebalan (m)

Nilai kekakuan dihitung menggunakan *Mathcad* dan didapatkan hasil pada tabel 4.4 :

Tabel 4. 4 Kekakuan bahan

No.	Bahan Isolasi	Kekakuan
1	Steel	3,00.10 ¹²
2	Aluminium	1,05.10 ¹²
3	St-Rub-St	3,853.10 ⁷
4	Al-Rub-Al	3,852.10 ⁷
5	FRP-Rub-FRP	3,851.10 ⁷
6	St-Neo-St	2,043.10 ⁷
7	Al-Neo-Al	2,042.10 ⁷
8	FRP-Neo-FRP	2,041.10 ⁷

Semakin kaku suatu bahan, maka lendutan yang dihasilkan semakin kecil, dan sebaliknya.

4.4 Lendutan Jembatan Lahor Akibat Beban Dinamis Kereta

Lendutan di Jembatan Lahor dipengaruhi oleh massa dan kecepatan kereta api yang melintas di atas jembatan tersebut. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini divariasikan 2 jenis kereta api dengan massa dan kecepatan yang berbeda, yaitu kereta api Malabar dan kereta api Penataran. Perbedaan massa ditinjau ketika kondisi kereta kosong dan ketika kereta terisi penuh oleh penumpang. Kedua kereta ini melintas di atas jembatan Lahor yang dipasang 8 variasi bahan isolasi getaran seperti yang sudah

dijelaskan pada 3.4. Isolasi getaran diletakkan di antara *beam* dan rel kereta.

4.4.1 Lendutan Kereta Api Malabar

Kecepatan kereta api Malabar yang diizinkan yaitu antara 70 km/jam sd 100 km/jam [17]. Asumsi bahwa kecepatan kereta api saat melintasi jembatan Lahor adalah 80 km/jam dengan jumlah 10 gerbong, dan berat masing-masing ditunjukkan pada tabel 4.5 sebagai berikut:

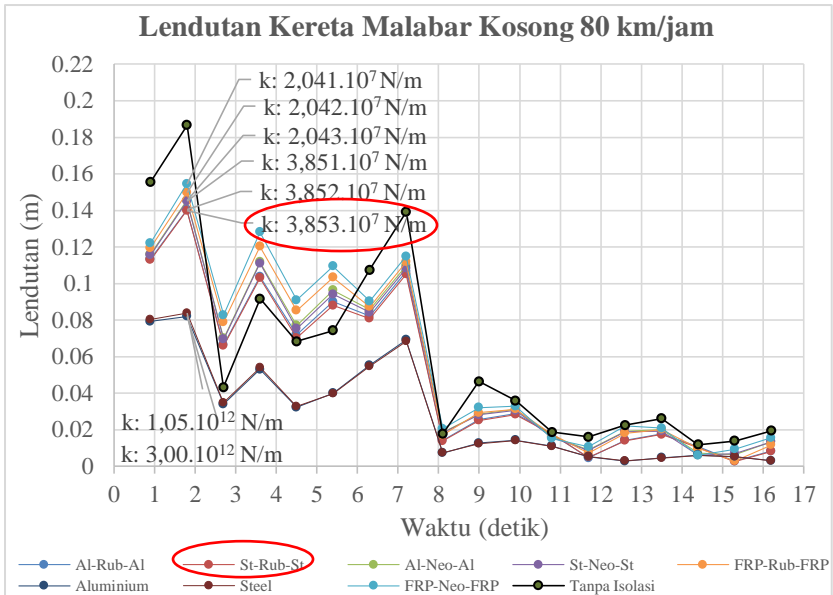
Tabel 4. 5 Massa kereta api Malabar [17]

Gerbong	Jenis Kereta	Kereta Kosong	Kereta Penuh
1	Lokomotif	84 ton	84 ton
2	Eksekutif	40 ton	43.5 ton
3	Eksekutif	40 ton	43.5 ton
4	Makan & Pembangkit	37 ton	37 ton
5	Bisnis	37 ton	41,5 ton
6	Bisnis	37 ton	41,5 ton
7	Ekonomi	37 ton	42.9 ton
8	Ekonomi	37 ton	42.9 ton
9	Bagasi	35 ton	35 ton
10	Bagasi	35 ton	35 ton

**Massa penuh adalah ketika semua kursi terisi penumpang,, dengan berat penumpang masing-masing adalah 70 kg*

- **Kereta Api Malabar Kosong**

Hasil pola lendutan pada kereta api Malabar kosong dengan kecepatan 80 km/jam, divariasikan dengan 8 variasi bahan isolasi getaran dapat dilihat pada gambar 4.8:

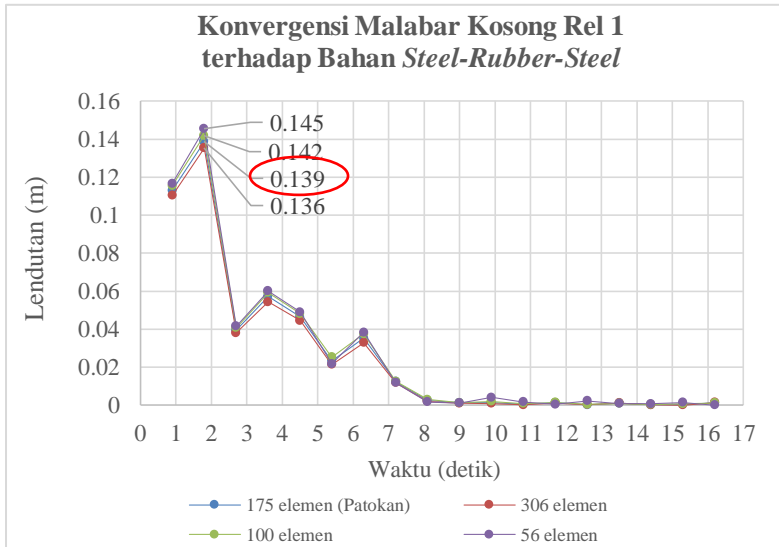


Gambar 4. 8 Pola lendutan kereta api Malabar kosong terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran

Berdasarkan gambar 4.8 tersebut diketahui bahwa semakin kaku suatu bahan maka semakin kecil nilai lendutan, dan sebaliknya. Lendutan terkecil terjadi ketika isolasi jembatan diberi bahan murni *steel* dan bahan murni aluminium, kedua bahan tersebut memiliki lendutan maksimum sekitar 0,08 meter. Kemudian diikuti oleh campuran bahan *steel-rubber-steel* dengan kekakuan $3,85 \cdot 10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan terkecil setelah bahan murni, yaitu dengan nilai maksimum lendutan sebesar 0,139 meter. Sedangkan lendutan terbesar terjadi ketika isolasi jembatan diberi campuran bahan *FRP-neoprene-FRP* dengan nilai kekakuan $2,041 \cdot 10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan maksimum sebesar 0,154 meter. Lendutan pada waktu ke 1 hingga 7,2 detik memiliki nilai yang tinggi jika dibandingkan dengan waktu ke 8 hingga 16,2 detik. Hal ini dikarenakan pada waktu 1 s/d 7,2 detik jembatan dalam kondisi *steady* dimana rangkaian kereta membebani pada semua elemen rel kereta. Sementara pada waktu selanjutnya,

gerbong kereta bergerak dinamis melewati jembatan, mengakibatkan rangkaian kereta tidak sepenuhnya membebani elemen rel pada jembatan.

Selanjutnya, dipilih satu bahan yang paling baik terhadap lendutan jembatan akibat kereta api Malabar kosong 80 km/jam untuk konvergensi elemen pada potongan rel kereta api, yaitu campuran bahan *steel-rubber-steel* karena memiliki nilai lendutan terkecil setelah *steel* dan aluminium. Konvergensi dilakukan sebagai perbandingan selisih lendutan antara 175 elemen sebagai patokan, lalu dibandingkan dengan hasil lendutan jika potongan rel tersebut di *finite* menjadi 306, 100, dan 56 elemen, seperti grafik berikut:

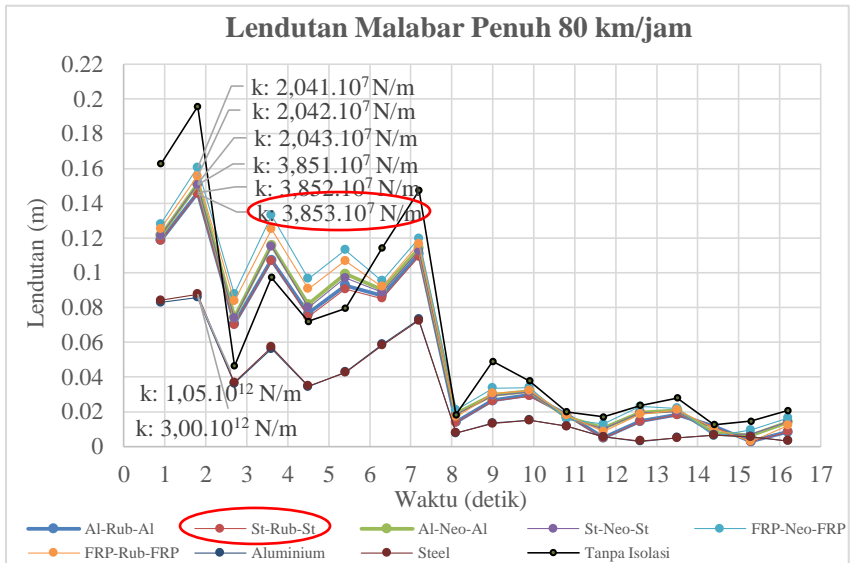


Gambar 4. 9 Konvergensi lendutan kereta Malabar kosong

Konvergensi diatas menunjukkan bahwa selisih garis grafik semua variasi elemen sangat kecil dengan persentase error sebesar 2,41% untuk 306 elemen; 2,34% untuk 100 elemen; dan 4,80% untuk 50 elemen. Hal ini membuktikan bahwa data lendutan kereta api Malabar kosong sudah terverifikasi.

- **Kereta Api Malabar Penuh**

Hasil pola lendutan pada kereta api Malabar penuh dengan kecepatan 80 km/jam, divariasikan dengan 8 variasi bahan isolasi getaran dapat dilihat pada grafik berikut :

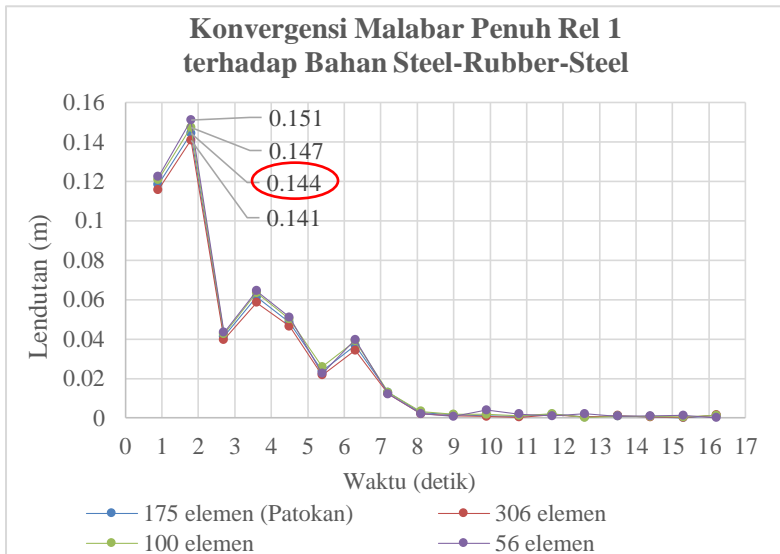


Gambar 4. 10 Pola lendutan kereta api Malabar penuh terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran

Berdasarkan grafik 4.10 tersebut, diketahui bahwa semakin kaku suatu bahan maka semakin kecil nilai lendutan, dan sebaliknya. Lendutan terkecil terjadi ketika isolasi jembatan diberi bahan murni *steel* dan bahan murni aluminium. Kedua bahan tersebut memiliki lendutan maksimum sebesar 0,086 meter. Kemudian diikuti oleh campuran bahan *steel-rubber-steel* dengan kekakuan $3,85 \cdot 10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan terkecil setelah bahan murni, yaitu dengan nilai maksimum lendutan sebesar 0,144 meter. Sedangkan lendutan terbesar terjadi ketika isolasi jembatan diberi campuran bahan *FRP-neoprene-FRP* dengan nilai kekakuan $2,041 \cdot 10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan maksimum sebesar

0,16 meter. Lendutan pada waktu ke 1 hingga 7,2 detik memiliki nilai yang tinggi jika dibandingkan dengan waktu ke 8 hingga 16,2 detik. Hal ini dikarenakan pada waktu 1 s/d 7,2 detik jembatan dalam kondisi *steady* dimana rangkaian kereta membebani pada semua elemen rel kereta. Sementara pada waktu selanjutnya, gerbong kereta bergerak dinamis melewati jembatan, mengakibatkan rangkaian kereta tidak sepenuhnya membebani elemen rel pada jembatan.

Selanjutnya, dipilih satu bahan yang paling baik terhadap lendutan jembatan akibat kereta api Malabar penuh 80 km/jam untuk konvergensi elemen pada potongan rel kereta api, yaitu campuran bahan *steel-rubber-steel* karena memiliki nilai lendutan terkecil setelah *steel* dan aluminium. Konvergensi dilakukan sebagai perbandingan selisih lendutan antara 175 elemen sebagai patokan, lalu dibandingkan dengan hasil lendutan jika potongan rel tersebut di *finite* menjadi 306, 100, dan 56 elemen, seperti grafik berikut:



Gambar 4. 11 Konvergensi lendutan kereta Malabar penuh

Konvergensi tersebut menunjukkan bahwa selisih garis grafik semua variasi elemen sangat kecil dengan persentase error sebesar 2,34% untuk 306 elemen; 2,17% untuk 100 elemen; dan 4,69% untuk 50 elemen. Hal ini membuktikan bahwa data lendutan kereta api Malabar penuh sudah terverifikasi.

4.4.2 Lendutan Kereta Api Penataran

Kecepatan kereta api Penataran yang diizinkan yaitu antara 60 km/jam sd 80 km/jam [18]. Pada tugas akhir ini, diasumsikan bahwa kecepatan kereta api saat melintasi jembatan Lahor adalah 70 km/jam dengan jumlah 8 gerbong, yang memiliki berat masing-masing pada tabel 4.6 sebagai berikut :

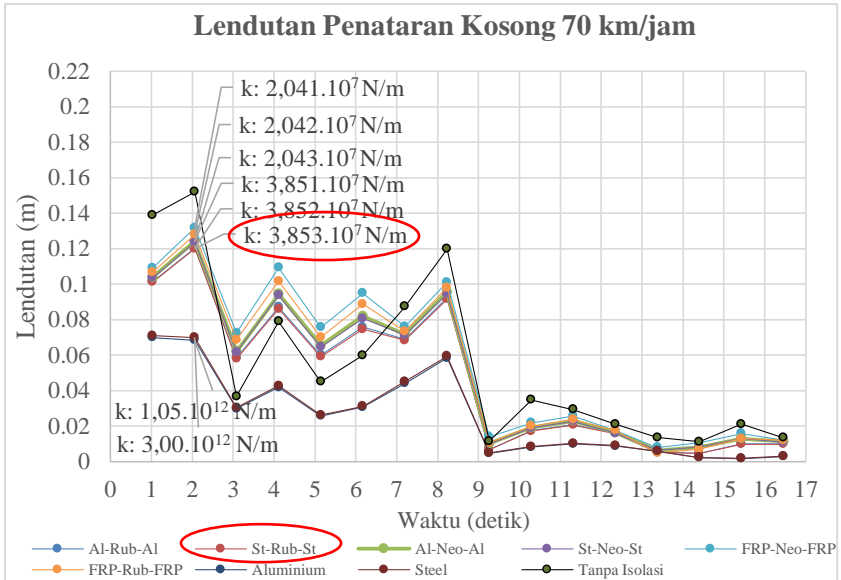
Tabel 4. 6 Massa kereta api Penataran [18]

Gerbong	Jenis Kereta	Kereta Kosong	Kereta Penuh
1	Lokomotif	84 ton	84 ton
2	Ekonomi	34 ton	41,6 ton
3	Ekonomi	34 ton	41,6 ton
4	Ekonomi	34 ton	41,6 ton
5	Ekonomi	34 ton	41,6 ton
6	Ekonomi	34 ton	41,6 ton
7	Ekonomi	34 ton	41,6 ton
8	Pembangkit	34 ton	41,6 ton

**Massa penuh adalah ketika semua kursi terisi penumpang,, dengan berat penumpang masing-masing adalah 70 kg*

- **Kereta Api Penataran Kosong**

Hasil pola lendutan pada kereta api Malabar kosong dengan kecepatan 70 km/jam, divariasikan dengan 8 variasi bahan isolasi getaran dapat dilihat pada grafik berikut :

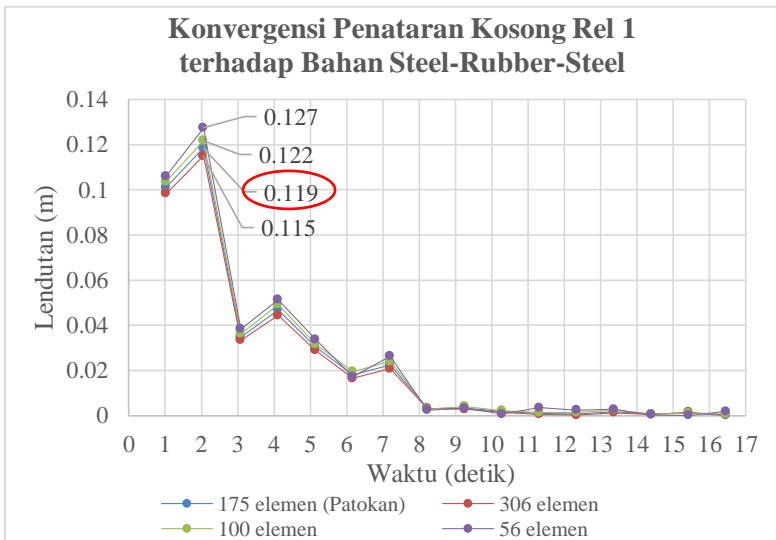


Gambar 4. 12 Pola lendutan kereta api Penataran kosong terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran

Berdasarkan gambar 4.12 tersebut diketahui bahwa semakin kaku suatu bahan maka semakin kecil nilai lendutan, dan sebaliknya. Lendutan terkecil terjadi ketika isolasi jembatan diberi bahan murni *steel* dan bahan murni aluminium, kedua bahan tersebut memiliki lendutan maksimum sebesar 0,07 meter. Kemudian diikuti oleh campuran bahan *steel-rubber-steel* dengan kekakuan $3,85.10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan terkecil setelah bahan murni, yaitu dengan nilai maksimum lendutan sebesar 0,119 meter. Sedangkan lendutan terbesar terjadi ketika isolasi jembatan diberi campuran bahan *FRP-neoprene-FRP* dengan nilai kekakuan $2,041.10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan maksimum sebesar 0,132 meter. Lendutan pada waktu ke 1 hingga 8,23 detik memiliki nilai yang tinggi jika dibandingkan dengan waktu ke 8 hingga 16,46 detik. Hal ini dikarenakan pada waktu 1 s/d 8,23 detik jembatan dalam kondisi *steady* dimana rangkaian kereta membebani pada semua elemen rel kereta. Sementara pada waktu

selanjutnya, gerbong kereta bergerak dinamis melewati jembatan, mengakibatkan rangkaian kereta tidak sepenuhnya membebani elemen rel pada jembatan.

Selanjutnya, dipilih satu bahan terhadap yang paling baik terhadap lendutan jembatan akibat kereta api Penataran kosong 70 km/jam untuk konvergensi elemen pada potongan rel kereta api, yaitu campuran bahan *steel-rubber-steel* karena memiliki nilai lendutan terkecil setelah *steel* dan aluminium. Konvergensi dilakukan sebagai perbandingan selisih lendutan antara 175 elemen sebagai patokan, lalu dibandingkan dengan hasil lendutan jika potongan rel tersebut di *finite* menjadi 306, 100, dan 56 elemen, seperti grafik berikut:

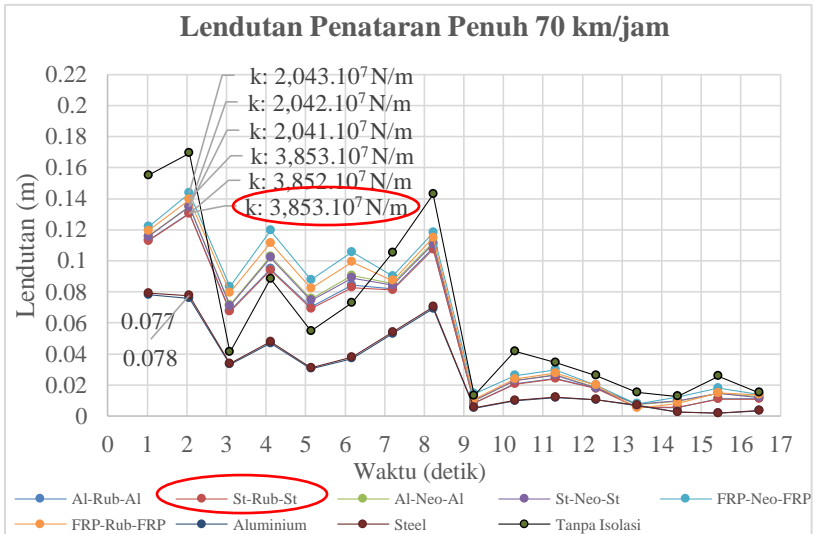


Gambar 4. 13 Konvergensi lendutan kereta Penataran kosong

Konvergensi diatas menunjukkan bahwa selisih garis grafik semua variasi elemen sangat kecil dengan persentase error sebesar 2,99% untuk 306 elemen; 2,67% untuk 100 elemen; dan 7,40% untuk 50 elemen. Hal ini membuktikan bahwa data lendutan kereta api Penataran kosong sudah terverifikasi.

- **Kereta Api Penataran Penuh**

Hasil pola lendutan pada kereta api Penataran penuh dengan kecepatan 70 km/jam, divariasikan dengan 8 variasi bahan isolasi getaran dapat dilihat pada grafik berikut :

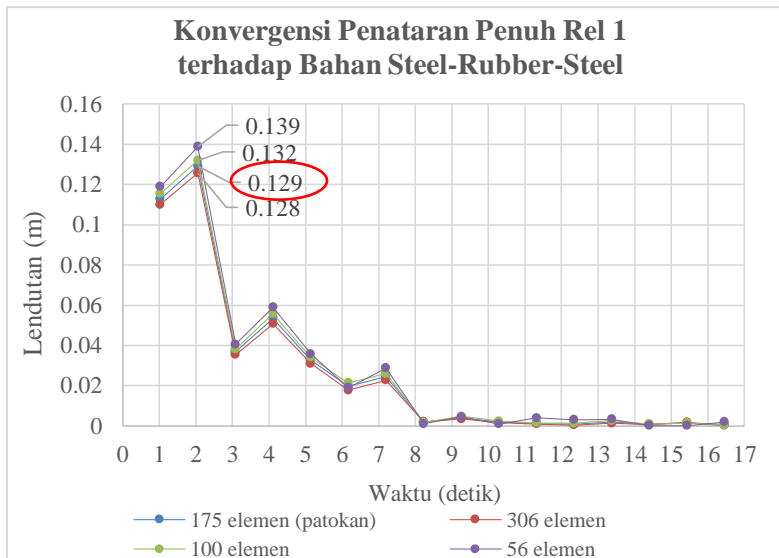


Gambar 4. 14 Pola lendutan kereta api Penataran penuh terhadap 8 jenis bahan isolasi getaran dan tanpa getaran

Berdasarkan gambar 4.14 tersebut diketahui bahwa semakin kaku suatu bahan maka semakin kecil nilai lendutan, dan sebaliknya. Lendutan terkecil terjadi ketika isolasi jembatan diberi bahan murni *steel* dan bahan murni aluminium, kedua bahan tersebut memiliki lendutan maksimum sebesar 0,079 meter. Kemudian diikuti oleh campuran bahan *steel-rubber-steel* dengan kekakuan $3,85.10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan terkecil setelah bahan murni, yaitu dengan nilai maksimum lendutan sebesar 0,129 meter. Sedangkan lendutan terbesar terjadi ketika isolasi jembatan diberi campuran bahan *FRP-neoprene-FRP* dengan nilai kekakuan $2,041.10^7 \text{ N/m}$ dan menghasilkan lendutan maksimum sebesar 0,143 meter. Lendutan pada waktu ke 1 hingga 8,23 detik memiliki

nilai yang tinggi jika dibandingkan dengan waktu ke 8 hingga 16,46 detik. Hal ini dikarenakan pada waktu 1 s/d 8,23 detik jembatan dalam kondisi *steady* dimana rangkaian kereta membebani pada semua elemen rel kereta. Sementara pada waktu selanjutnya, gerbong kereta bergerak dinamis melewati jembatan, mengakibatkan rangkaian kereta tidak sepenuhnya membebani elemen rel pada jembatan.

Selanjutnya, dipilih satu bahan yang paling baik terhadap lendutan jembatan akibat kereta api Penataran penuh 70 km/jam untuk konvergensi elemen pada potongan rel kereta api, yaitu campuran bahan *steel-rubber-steel* karena memiliki nilai lendutan terkecil setelah *steel* dan aluminium. Konvergensi dilakukan sebagai perbandingan selisih lendutan antara 175 elemen sebagai patokan, lalu dibandingkan dengan hasil lendutan jika potongan rel tersebut di *finite* menjadi 306, 100, dan 56 elemen, seperti grafik berikut:



Gambar 4. 15 Konvergensi lendutan kereta Penataran penuh

Konvergensi diatas menunjukkan bahwa selisih garis grafik semua variasi elemen sangat kecil dengan persentase error sebesar

2,65% untuk 306 elemen; 2,31% untuk 100 elemen; dan 7,53% untuk 50 elemen. Hal ini membuktikan bahwa data lendutan kereta api Penataran penuh sudah terverifikasi.

4.5 Uji Lendutan

Lendutan pada jembatan kereta api Indonesia diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor: 60 Tahun 2012 [20]. Jembatan Lahor ini, memiliki panjang bentangan 160 meter, dan dilewati kereta api dengan kecepatan kurang dari 100 km/jam. Sehingga sesuai standar pada tabel 3.2 tentang koefisien lendutan maksimum jembatan baja bahwa lendutan maksimum yang diijinkan di jembatan Lahor adalah :

$$\text{Lendutan} = \frac{L}{700} = \frac{160 \text{ meter}}{700} = 0,228 \text{ meter} \quad (4.2)$$

Sementara pada tugas akhir ini, lendutan untuk semua variasi bahan dijabarkan sebagai berikut :

- **Kereta Api Malabar**

Lendutan akibat kereta api Malabar dapat dilihat pada tabel 4.7 di bawah ini:

Tabel 4.7 Uji lendutan jembatan Lahor akibat kereta Malabar

Bahan Isolasi	Lendutan Maksimum (Kosong)	Lendutan Maksimum (Penuh)
Al-Rub-Al	0,14042 m	0,14619 m
St-Rub-St	0,13995 m	0,14548 m
Al-Neo-Al	0,14545 m	0,15122 m
St-Neo-St	0,14501 m	0,15076 m
FRP-Neo-FRP	0,15447 m	0,16056 m
FRP-Rub-FRP	0,1497 m	0,15561 m
Aluminium	0,081997 m	0,085779 m
<i>Steel</i>	0,083748 m	0,087589 m

Berdasarkan tabel 4.7 di atas, dapat diketahui bahwa berat beban dinamis akan berpengaruh pada lendutan jembatan kereta api. Lendutan terbesar terjadi jika isolasi jembatan diberi campuran

bahan FRP-Neo-FRP yaitu sebesar 0,15 meter pada kereta kosong, dan 0,16 meter pada kereta penuh. Sementara lendutan paling baik, atau yang memiliki nilai lendutan terkecil adalah ketika dipasang bahan *Steel* dan Aluminium yaitu sekitar 0,08 meter pada kereta kosong, dan 0,081 meter pada kereta penuh. Selain bahan murni tersebut, campuran bahan *Steel-Rubber-Steel* juga menghasilkan lendutan yang baik, yaitu 0,13 meter untuk kereta kosong, dan 0,14 meter untuk kereta penuh.

- **Kereta Api Penataran**

Lendutan akibat kereta api Penataran dapat dilihat pada tabel 4.8 di berikut ini:

Tabel 4.8 Uji lendutan jembatan Lahor akibat kereta Penataran

Bahan Isolasi	Lendutan Maksimum (Kosong)	Lendutan Maksimum (Penuh)
Al-Rub-Al	0,1203	0,13084
St-Rub-St	0,11993	0,13041
Al-Neo-Al	0,12414	0,13514
St-Neo-St	0,12377	0,13473
FRP-Neo-FRP	0,13175	0,1436
FRP-Rub-FRP	0,12795	0,13943
Aluminium	0,068442	0,075946
Steel	0,069919	0,077556

Berdasarkan tabel 4.8 di atas, dapat diketahui bahwa berat beban dinamis akan berpengaruh pada lendutan jembatan kereta api. Lendutan terbesar terjadi jika isolasi jembatan diberi campuran bahan FRP-Neo-FRP yaitu sebesar 0,13 meter pada kereta kosong, dan 0,14 meter pada kereta penuh. Sementara lendutan paling baik, atau yang memiliki nilai lendutan terkecil adalah ketika dipasang bahan *Steel* dan Aluminium yaitu sekitar 0,06 meter pada kereta kosong, dan 0,07 meter pada kereta penuh. Selain bahan murni tersebut, campuran bahan *Steel-Rubber-Steel* juga menghasilkan lendutan yang baik, yaitu 0,11 meter untuk kereta kosong, dan 0,13 meter untuk kereta penuh.

Meskipun bahan murni *steel* dan aluminium memiliki nilai lendutan yang kecil, namun pemakaian bahan murni ini dirasa kurang efektif karena memerlukan biaya yang besar. Sehingga pada tugas akhir ini, bahan isolasi getaran yang lebih direkomendasikan untuk di pasang di jembatan kereta adalah campuran bahan *Steel-Rubber-Steel* karena harga *natural rubber* lebih rendah dibanding harga bahan *steel* atau aluminium murni. Selain itu, lendutan maksimum yang dihasilkan oleh campuran bahan *Steel-Rubber-Steel* masih tergolong ideal untuk lendutan yang diijinkan untuk Jembatan Baja, dengan parameter bahan sebagai berikut :

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
5	Derive from	Young'...			
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	
7	Poisson's Ratio	0.3			<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		<input type="checkbox"/>

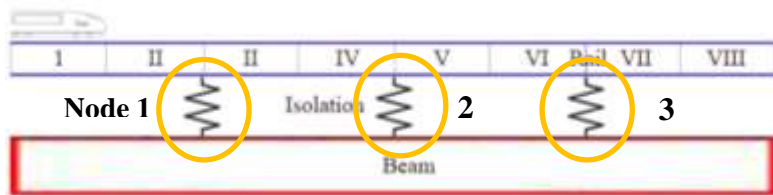
Gambar 4. 16 Sifat bahan *steel*

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	950	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
5	Derive from	Young'...			
6	Young's Modulus	1.54E+06	Pa	<input type="checkbox"/>	
7	Poisson's Ratio	0.45			<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	5.1333E+06	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	5.3103E+05	Pa		<input type="checkbox"/>

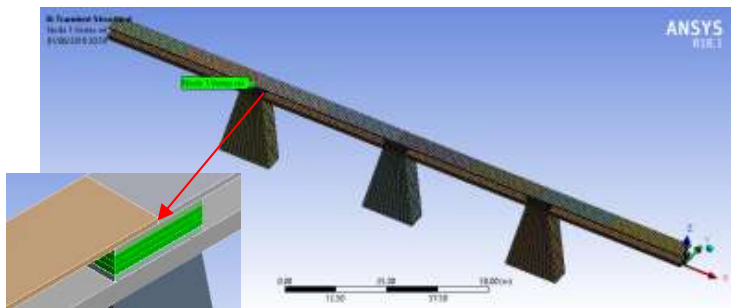
Gambar 4. 17 Sifat bahan *natural rubber*

4.6 Akumulatif Persentase Gaya yang Diterima

Pada umumnya gaya yang dihasilkan kereta api sangat besar. Gaya yang ditransmisikan ke *beam* dan penopang dapat dikurangi dengan menggunakan peredam atau isolasi getaran, diletakkan di antara *beam* dan rel kereta api. Dari hasil lendutan yang telah dibahas, campuran bahan yang direkomendasikan untuk isolasi getaran adalah *steel-rubber-steel*. Sehingga, gaya terusan yang dibahas adalah bahan *steel-rubber-steel* dengan beban kereta api Malabar kosong. Persentase gaya yang diakumulasikan ke bawah, dapat dilihat dari model pada masing-masing node pada gambar 4.18 berikut:

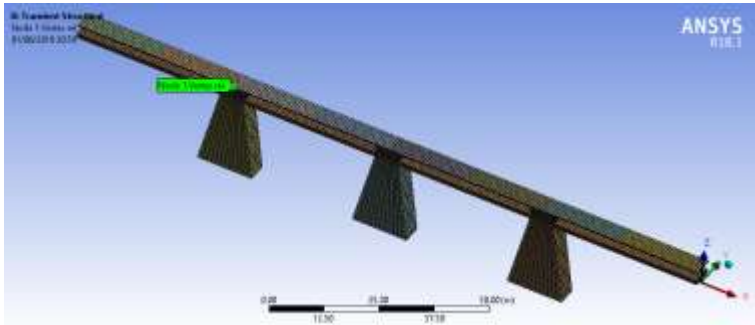


Gambar 4. 18 Pemodelan elemen hingga



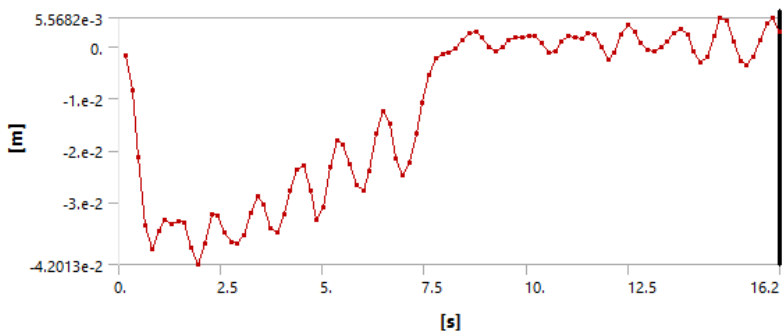
Gambar 4. 19 Lapisan bahan pada isolasi getaran

- **Akumulatif Persentase Gaya yang Diterima oleh Node 1**
Persentase gaya yang diterima oleh node 1 pada jembatan Lahor ini dicari dengan membagi amplitudo gaya yang diterima node 1 dengan amplitudo gaya input.



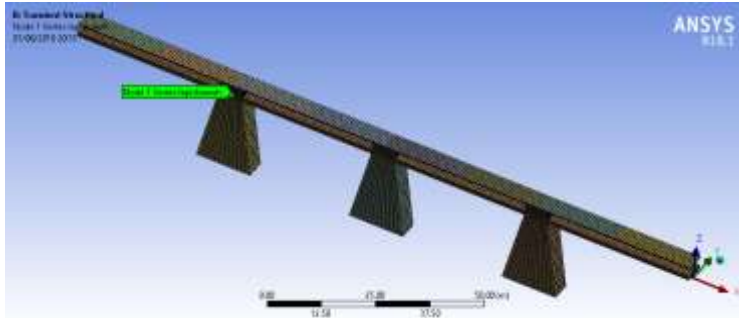
Gambar 4. 20 Gaya input pada node 1

Gaya input pada node 1 diambil dari titik atas rel kereta node 1 yang dikenai beban kereta api, dengan pola amplitudo sebagai berikut :



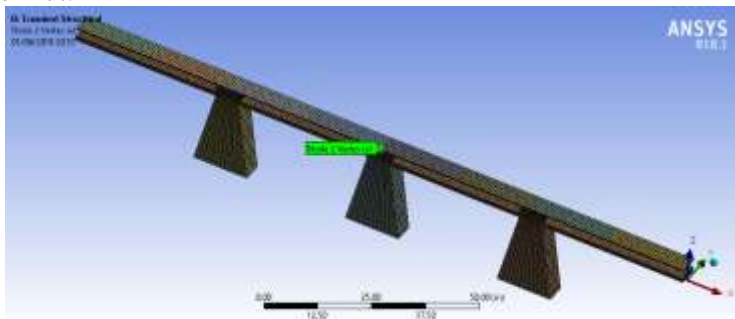
Gambar 4. 21 Amplitudo gaya input pada node 1

Dari input amplitudo di atas, dapat dicari besar gaya yang diteruskan ke bawah yaitu ke bagian isolator lapisan atas, lapisan tengah, lapisan bawah, dan *beam*.



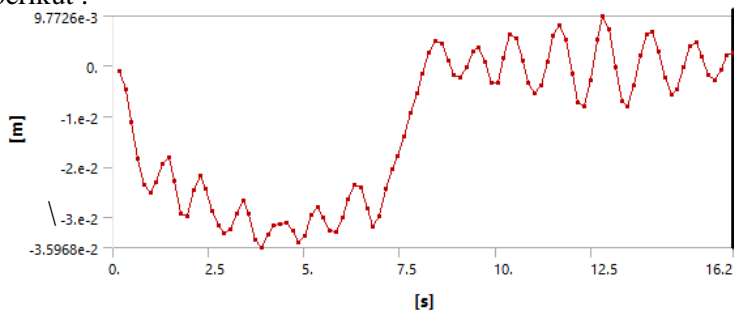
Gambar 4. 22 Gaya yang diterima oleh node 1

- **Akumulatif Persentase Gaya yang Diterima oleh Node 2**
 Model gaya input pada jembatan Lahor Node 2 adalah sebagai berikut:



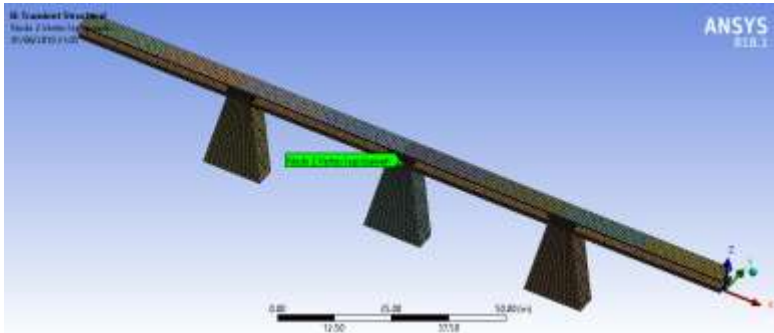
Gambar 4. 23 Gaya input pada node 2

Gaya input pada node 2 diambil dari titik atas rel kereta node 2 yang dikenai beban kereta api, dengan pola amplitudo sebagai berikut :



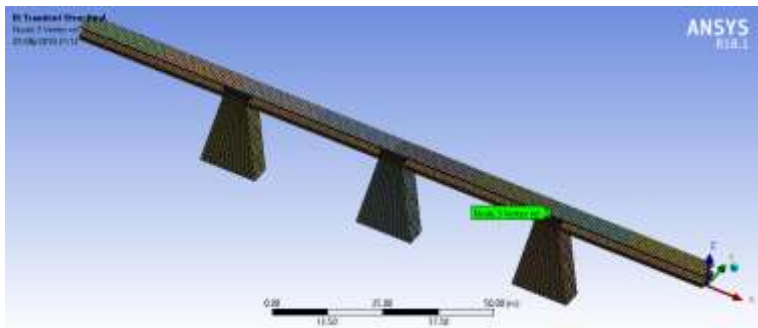
Gambar 4. 24 Amplitudo gaya input pada node 2

Sama dengan kondisi node 1, gaya input yang diberikan di node 2, diteruskan ke struktur bawah pada bagian isolator lapisan atas, lapisan tengah, lapisan bawah, dan *beam*.



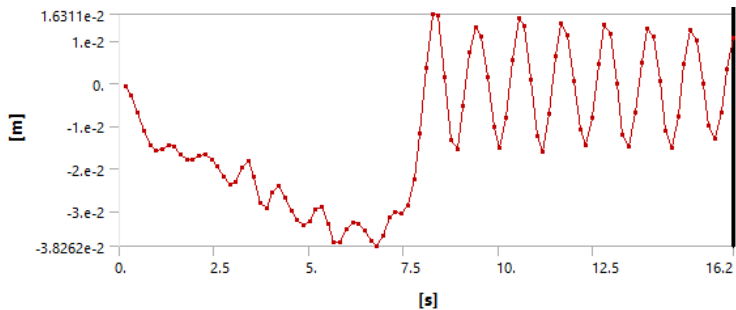
Gambar 4. 25 Gaya yang diterima oleh node 2

- **Akumulatif Persentase Gaya yang Diterima oleh Node 3**
Model gaya input pada jembatan Lahor Node 3 adalah sebagai berikut:



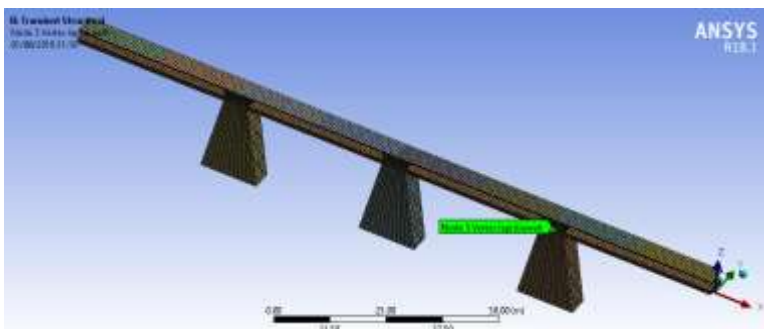
Gambar 4. 26 Gaya input pada node 3

Gaya input pada node 3 diambil dari titik atas rel kereta node 3 yang dikenai beban kereta api, dengan pola amplitudo berikut :



Gambar 4. 27 Amplitudo gaya input pada node 3

Sama dengan kondisi node 1 dan node 2, gaya input yang diberikan di node 3, diteruskan ke struktur bawah pada bagian isolator lapisan atas, lapisan tengah, lapisan bawah, dan *beam*.



Gambar 4. 28 Gaya yang diterima oleh node 3

4.7 Perbandingan Gaya Input pada Node 1, 2 dan 3 terhadap Gaya yang Diterima oleh Struktur Bawah Jembatan

Gaya input yang diberikan akibat beban dinamis kereta api Malabar kosong yang melintas di bagian rel kereta api, memiliki dampak *displacement* atau gaya yang diterima struktur di bawahnya. Persentase gaya yang diterima dan di bahas pada tugas akhir ini adalah gaya di bagian isolasi getaran lapisan atas (lapisan pertama), lapisan tengah (lapisan ketiga), lapisan bawah (lapisan kelima), dan *beam* pada masing-masing node.

- **Gaya yang Diterima oleh Isolator Lapisan Atas**

Campuran bahan isolator pada jembatan Lahor terdiri dari 5 lapis area dengan luas permukaan yang sama. Isolator ini terdiri dari campuran 3 bahan *steel-rubber-steel*. Sehingga getaran yang diredam akan berbeda antara lapisan pertama (atas), ketiga (tengah), kelima (bawah), dst. Perbandingan persentase gaya akibat gaya input kereta api Malabar kosong terhadap isolator teratas atau isolasi jembatan lapisan 1 pada node 1, 2 dan 3 adalah sebagai berikut:

- Node 1 : 74.20 %
- Node 2 : 76.24 %
- Node 3 : 78.62 %

- **Gaya yang Diterima oleh Isolator Lapisan Tengah**

Perbandingan persentase gaya akibat gaya input kereta api Malabar kosong terhadap isolator tengah atau isolasi jembatan lapisan 3 pada node 1, 2 dan 3 adalah sebagai berikut:

- Node 1 : 45.85 %
- Node 2 : 45.44 %
- Node 3 : 40,56 %

- **Gaya yang Diterima oleh Isolator Lapisan Bawah**

Perbandingan persentase gaya akibat gaya input kereta api Malabar kosong terhadap isolator bawah atau isolasi jembatan lapisan 5 pada node 1, 2 dan 3 adalah sebagai berikut:

- Node 1 : 0,014 %
- Node 2 : 0,013 %
- Node 3 : 0,012 %

- **Gaya yang Diterima oleh *Beam***

Beam terletak di bawah struktur isolator. Perbandingan persentase gaya akibat gaya input kereta api Malabar kosong terhadap *beam* pada node 1, 2 dan 3 adalah sebagai berikut:

- Node 1 : 0,0017 %
- Node 2 : 0,0017 %
- Node 3 : 0,0018 %

Semakin dekat dengan sumber getaran, maka gaya yang diterima atau perambatan getaran akan semakin besar, dan sebaliknya jika semakin jauh struktur bagian bawah dengan

sumber getaran, maka getaran yang dirambatkan akan semakin kecil. Terlihat dari persentase perambatan isolator lapis pertama menunjukkan persentase yang besar, dan pada *beam* menunjukkan persentase perambatan getaran yang sangat kecil.

Pada simulasi ini, penopang jembatan difungsikan sebagai penopang dengan tumpuan *fixed support*, sehingga perambatan di struktur ini adalah 0.

“Halaman ini Memang Dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

- Pola lendutan dari semua variasi menghasilkan pola lendutan yang sama dengan perbedaan pada nilai lendutan. Lendutan maksimum tanpa isolasi getaran pada kereta api Malabar kosong sebesar 0,187 meter; Malabar penuh 0,196 meter; Penataran kosong 0,152 meter; Penataran penuh 0,169 meter.
- Bahan isolasi getaran yang direkomendasikan yaitu campuran *Steel-Rubber-Steel* karena memiliki nilai kekakuan tinggi setelah bahan murni yaitu $3,853 \cdot 10^7$ N/m dan lendutan yang kecil yaitu Malabar kosong 0,139 meter; Malabar penuh 0,144 meter; Penataran kosong 0,119 meter; dan Penataran penuh 0,129 meter.
- Pemberian bahan isolasi getaran *Steel-Rubber-Steel* jika dibandingkan dengan jembatan tanpa isolator getaran, mampu mereduksi lendutan maksimum sebesar 25% untuk kereta api Malabar kosong; 26% untuk Malabar penuh; 21% untuk Penataran kosong; dan 23% untuk Penataran penuh.
- Berdasarkan Peraturan Menteri Nomor 60 Tahun 2012, semua variasi yang diuji pada jembatan Lahor masih memenuhi standar lendutan jembatan yaitu dibawah 0,228 meter.
- Gaya terusan yang diterima oleh isolator pertama akibat gaya input kereta api sebesar 74,20% di node 1; 76,24% di node 2; 78,62% di node 3. Sedangkan semakin ke struktur bawah, getaran yang dirambatkan semakin kecil yaitu pada gaya terusan di isolator lapis kelima sebesar 0,014 % di node 1; 0,013% di node 2; dan 0,012 % di node 3.

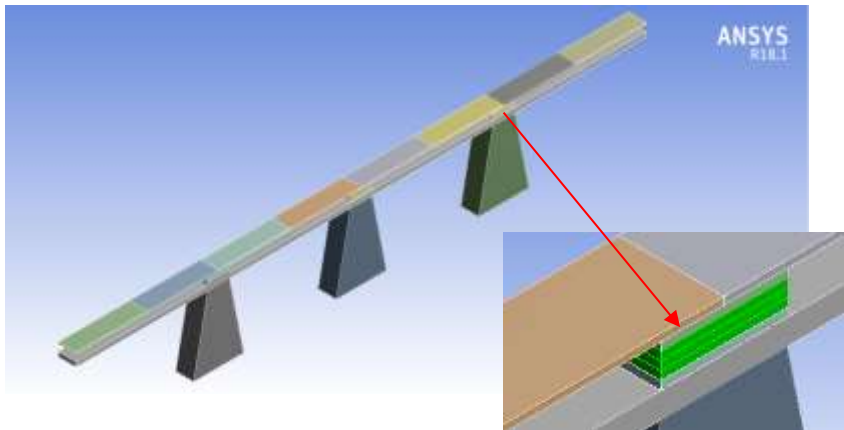
“Halaman ini Memang Dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

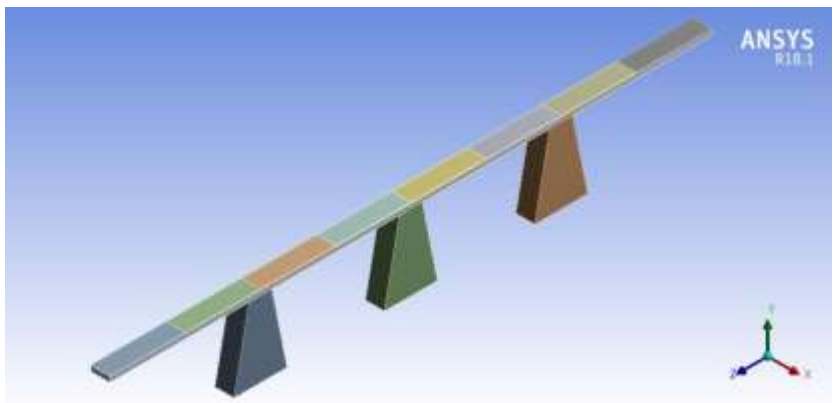
- [1] “Kereta Api Pangrango,” 3 January 2014. [Online]. Available: http://jawa-timur.karyawan.web.id/ind/2793-2683/Kereta-Api-Pangrango_50560_stiemb_jawa-timur-karyawan.html. [Diakses 11 January 2018].
- [2] J. T. S. UMY, “Prasarana Transportasi Jalan Rel,” pp. 23-24.
- [3] R. Harjono, “Studi Sistem Pemeliharaan Jalan Kereta Api,” Jakarta, 2009.
- [4] P. Hagedorn, *Vibration and Waves in Continuous Mechanical System*, London: Wiley, 2007.
- [5] M. K. Walton Hall, “Introduction to Elemen hingga Analysis,” p. 14, 2016.
- [6] Utaja, “Metoda Elemen Hingga Berbasis Elemen Beam untuk Analisis Defleksi Poros Turbin”.
- [7] M. Ir. Yerri Susatio, *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga*, Yogyakarta: Andi Offset, 2004.
- [8] M. P. Sri AtmajaP. Rosyidi ST., “Pembebanan pada Struktur Jalan Rel,” pp. 28-35.
- [9] D. Dinev, “Analytical Solution of Beam on Elastic,” *Engineering MECHANICS*, vol. 19, 2012.
- [10] Y. Jinghua, L. Guangjun, G. Chunqing, L. Xiaowei dan L. Qingquan, “Study on Optimizing Bahan Parameters in the Acoustic-Vibration,” *International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2005.
- [11] H. D. Setio, D. Kusumastuti, S. Setio, P. H. Siregar dan A. Hartanto, “Pengembangan Sistem Isolasi Seismik pada Struktur Bangunan yang Dikenai,” *ISSN 0853-2982*, p. 3, 2012.
- [12] d. P. Ravikanth Raju, “Free Vibration Analysis of Curved Cantilever Sandwich Structure,” *Int Journal of Engineering Research and Application*, vol. VII, no. 12, p. 5, 2017.
- [13] R. E. D. a. D. R.Barjibhe, “Study on Vibration Analysis of

- Sandwich Cantilever Beam using Elemen hingga Ansys Software,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 03, no. 04, p. 2633, 2016.
- [14] I. Taufan, “Transfer Path Analysis Sebagai Fitur untuk Deteksi Kerusakan pada Sistem Pompa Sentrifugal- Beam,” dalam *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, Surabaya, 2018.
- [15] Rao, *Mechanical Vibration 5th Edition*, Prentice Hall: University of Miami, 2004.
- [16] H. A. Kurnia, “1, Modifikasi Perencanaan Jembatan Lahor Dengan Menggunakan Konstruksi Busur Rangka Baja,” Surabaya, 2017.
- [17] K. N. K. K. Api, “Laporan Hasil Investigasi Kecelakaan Kereta Api Anjlok KA 86 Malabar,” Komite Nasional Keselamatan Kereta Api, Bandung, 2015.
- [18] K. N. K. Transportasi, “Laporan Hasil Investigasi Kecelakaan Kereta Api Anjlok KA 968 Penataran,” Komite Nasional Keselamatan Transportasi, Surabaya, 2012.
- [19] “www.standards.com.au,” 2004. [Online].
- [20] P. M. P. N. 6. T. 2012, “Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api,” Menteri Perhubungan, 2012.
- [21] W. Young, *Roark’s Formulas Stress and Strain 7th Edition*, McGraw-Hill, 2001,
- [22] T. N. Kumar, “Vibration Analysis of Viscoelastic Sandwich Beam using Elemen hingga Method,” National Institute of Technology Rourkela, India, Rourkela, 2016.

LAMPIRAN A (DESAIN JEMBATAN)



Gambar 1 Desain jembatan dengan isolasi getaran (*sandwich material*)



Gambar 2 Desain jembatan tanpa isolasi getaran

LAMPIRAN B (SIFAT BAHAN ISOLASI GETARAN)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2766	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young...			
6	Young's Modulus	7E+10	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.33			
8	Bulk Modulus	6.8627E+10	Pa		
9	Shear Modulus	2.6316E+10	Pa		

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young...			
6	Young's Modulus	2E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.3			
8	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	950	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young...			
6	Young's Modulus	1.54E+06	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.45			
8	Bulk Modulus	5.1033E+06	Pa		
9	Shear Modulus	5.3103E+06	Pa		

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	960	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young...			
6	Young's Modulus	8.154E+05	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.49			
8	Bulk Modulus	1.359E+07	Pa		
9	Shear Modulus	2.7362E+05	Pa		

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1700	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young...			
6	Young's Modulus	2E+09	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.3			
8	Bulk Modulus	1.6667E+09	Pa		
9	Shear Modulus	7.6923E+08	Pa		

LAMPIRAN C (PERHITUNGAN KEKAKUAN BAHAN)

Steel - Rubber - Steel

1, Kekakuan Steel (St)

$$E_{st} := 200 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{st} := \frac{E_{st} \cdot A}{t} = 1.5 \times 10^{13}$$

2. Kekakuan Rubber (Rub)

$$E_{rub} := 0.00154 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{rub} := \frac{E_{rub} \cdot A}{t} = 1.155 \times 10^8$$

3. Kekakuan Sandwich Bahan (St-Rub-St)

$$k_{strub} := \frac{1}{\left(\frac{2}{k_{st}}\right) + \left(\frac{3}{k_{rub}}\right)} = 3.85 \times 10^7$$

Aluminium - Rubber - Aluminium

1, Kekakuan Aluminium (Al)

$$E_{al} := 70 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{al} := \frac{E_{al} \cdot A}{t} = 5.25 \times 10^{12}$$

2. Kekakuan Rubber (Rub)

$$E_{rub} := 0.00154 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{rub} := \frac{E_{rub} \cdot A}{t} = 1.155 \times 10^8$$

3. Kekakuan Sandwich Bahan (Al-Rub-Al)

$$k_{alrub} := \frac{1}{\left(\frac{2}{k_{al}}\right) + \left(\frac{3}{k_{rub}}\right)} = 3.85 \times 10^7$$

Aluminium - Neoprene - Aluminium

1, Kekakuan Aluminium (Al)

$$E_{al} := 70 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{al} := \frac{E_{al} \cdot A}{t} = 5.25 \times 10^{12}$$

2. Kekakuan Neoprene (Neo)

$$E_{neo} := 0.0008154 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{neo} := \frac{E_{neo} \cdot A}{t} = 6.115 \times 10^7$$

3. Kekakuan Sandwich Bahan (Al-Rub-Al)

$$k_{alneo} := \frac{1}{\left(\frac{2}{k_{al}}\right) + \left(\frac{3}{k_{neo}}\right)} = 2.038 \times 10^7$$

Steel - Neoprene - Steel

1, Kekakuan Steel (St)

$$E_{\text{st}} := 200 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{\text{st}} := \frac{E_{\text{st}} \cdot A}{t} = 1.5 \times 10^{13}$$

2. Kekakuan Neoprene (Neo)

$$E_{\text{neo}} := 0.0008154 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{\text{neo}} := \frac{E_{\text{neo}} \cdot A}{t} = 6.115 \times 10^7$$

3. Kekakuan Sandwich Bahan (St-Neo-St)

$$k_{\text{stneo}} := \frac{1}{\left(\frac{2}{k_{\text{st}}}\right) + \left(\frac{3}{k_{\text{neo}}}\right)} = 2.038 \times 10^7$$

FRP - Neoprene - FRP

1, Kekakuan FRP

$$E_{\text{frp}} := 2 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{\text{frp}} := \frac{E_{\text{frp}} \cdot A}{t} = 1.5 \times 10^{11}$$

2. Kekakuan Neoprene (Neo)

$$E_{\text{neo}} := 0.0008154 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{\text{neo}} := \frac{E_{\text{neo}} \cdot A}{t} = 6.115 \times 10^7$$

3. Kekakuan Sandwich Bahan (FRP-Neo-FRP)

$$k_{\text{frpneo}} := \frac{1}{\left(\frac{2}{k_{\text{frp}}}\right) + \left(\frac{3}{k_{\text{neo}}}\right)} = 2.038 \times 10^7$$

FRP - Rubber - FRP

1, Kekakuan FRP

$$E_{\text{frp}} := 2 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{\text{frp}} := \frac{E_{\text{frp}} \cdot A}{t} = 1.5 \times 10^{11}$$

2. Kekakuan Rubber (Rub)

$$E_{\text{rub}} := 0.00154 \cdot 10^9$$

$$p := 6 \quad l := 5 \quad t := 0.4$$

$$A := p \cdot l = 30$$

$$k_{\text{rub}} := \frac{E_{\text{rub}} \cdot A}{t} = 1.155 \times 10^8$$

3. Kekakuan Sandwich Bahan (FRP-Rub-FRP)

$$k_{\text{frprub}} := \frac{1}{\left(\frac{2}{k_{\text{frp}}}\right) + \left(\frac{3}{k_{\text{rub}}}\right)} = 3.848 \times 10^7$$

Aluminium

1, Kekakuan Aluminium (Al)

$$\underline{E_{al}} := 70 \cdot 10^9$$

$$\underline{p} := 6 \quad \underline{l} := 5 \quad \underline{t} := 2$$

$$\underline{A} := p \cdot l = 30$$

$$\underline{k_{al}} := \frac{E_{al} \cdot A}{t} = 1.05 \times 10^{12}$$

Steel

1, Kekakuan Steel (St)

$$\underline{E_{st}} := 200 \cdot 10^9$$

$$\underline{p} := 6 \quad \underline{l} := 5 \quad \underline{t} := 2$$

$$\underline{A} := p \cdot l = 30$$

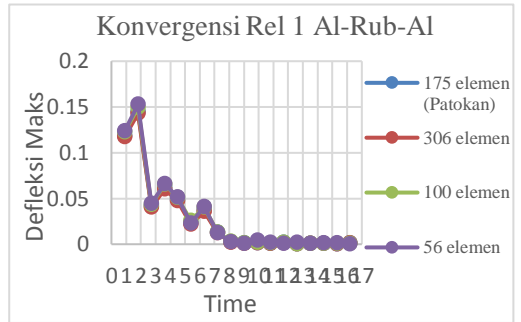
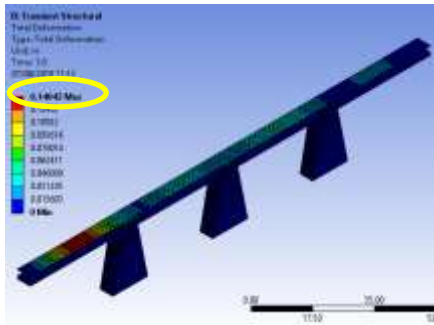
$$\underline{k_{st}} := \frac{E_{st} \cdot A}{t} = 3 \times 10^{12}$$

LAMPIRAN D (LENDUTAN KERETA API MALABAR KOSONG)

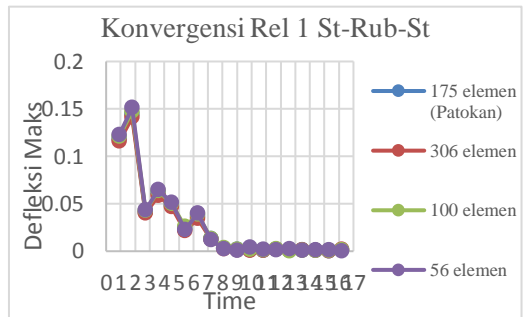
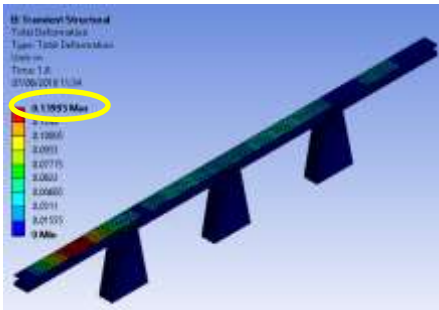
Time	Al-Ru-Al	St-Rub-St	Al-Neo-Al	St-Neo-St	FRP-Neo-FRP	FRP-Rub-FRP	Al-Al-Al	St-St-St
0,9	0,11339	0,11299	0,11606	0,11565	0,12211	0,11953	0,079202	0,084152
1,8	0,14042	0,13995	0,14545	0,14501	0,15447	0,1497	0,081997	0,087589
2,7	0,066539	0,065966	0,070127	0,06951	0,082819	0,078995	0,03409	0,036826
3,6	0,1038	0,10305	0,11184	0,11105	0,12813	0,12032	0,05302	0,057307
4,5	0,07196	0,070253	0,077049	0,075317	0,090928	0,085305	0,032256	0,034815
5,4	0,09011	0,087962	0,096386	0,094161	0,10944	0,10338	0,040038	0,042448
6,3	0,082376	0,080886	0,085642	0,084201	0,090406	0,087214	0,05536	0,058179
7,2	0,10647	0,10503	0,1098	0,10836	0,11486	0,11185	0,069171	0,072452
8,1	0,014359	0,013904	0,018725	0,018351	0,020645	0,017042	0,007252	0,0078377
9	0,025565	0,025073	0,028608	0,028202	0,032168	0,029347	0,012698	0,013237
9,9	0,028824	0,028316	0,031049	0,030505	0,032924	0,031286	0,014362	0,014978
10,8	0,017829	0,0175	0,016362	0,015786	0,015258	0,017379	0,01109	0,011607
11,7	0,0045864	0,0049552	0,0089769	0,0087236	0,010707	0,007108	0,0052562	0,0055738
12,6	0,014349	0,014043	0,01914	0,018947	0,022212	0,018053	0,0028248	0,003145
13,5	0,017862	0,017408	0,019945	0,019264	0,020841	0,020183	0,0047221	0,0048256
14,4	0,010772	0,010309	0,0072065	0,0062097	0,0060113	0,0097284	0,006199	0,0064201
15,3	0,0027608	0,002715	0,0063132	0,007025	0,009404	0,0029261	0,0053228	0,0055759
16,2	0,0082779	0,0081838	0,013504	0,013447	0,01557	0,011636	0,0030231	0,0032355

LENDUTAN DAN KONVERGENSI MALABAR KOSONG

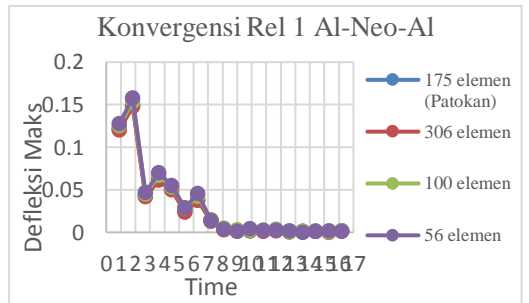
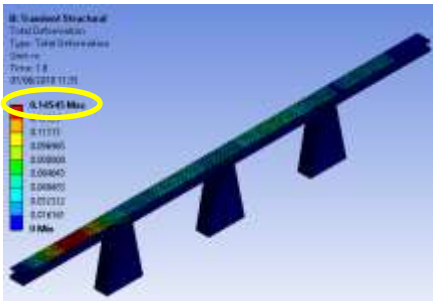
1. Aluminium-Rubber-Aluminium



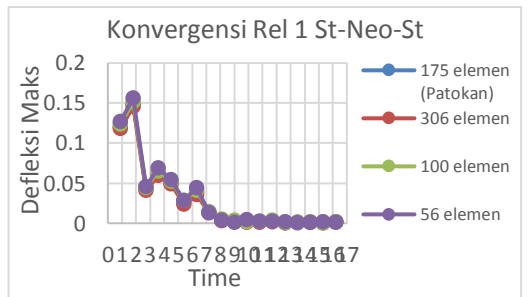
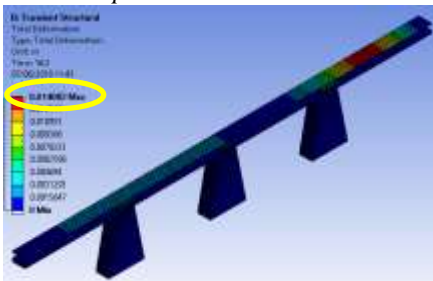
2. Steel-Rubber-Steel



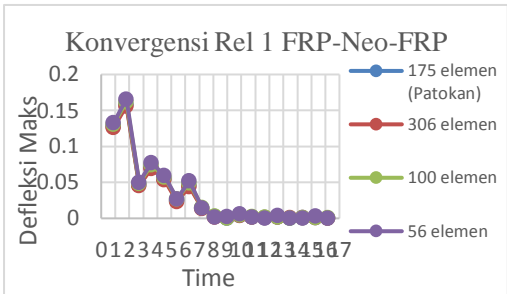
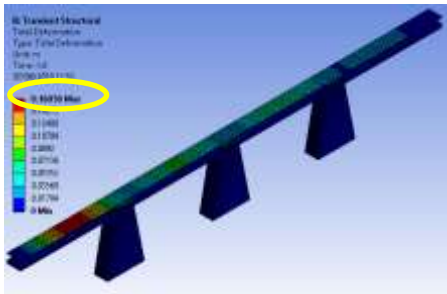
3. Aluminium-Neoprene-Aluminium



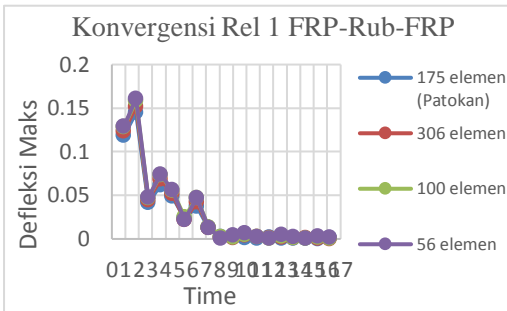
4. Steel-Neoprene-Steel



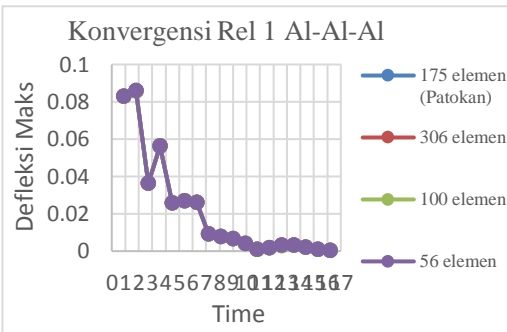
5. FRP-Neoprene-FRP



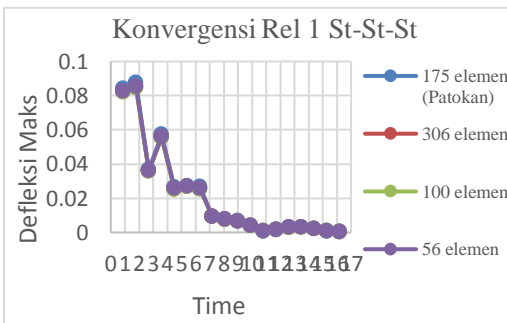
6. FRP-Rubber-FRP



7. Aluminium



8. Steel

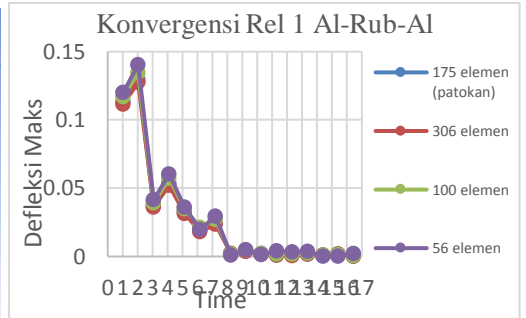
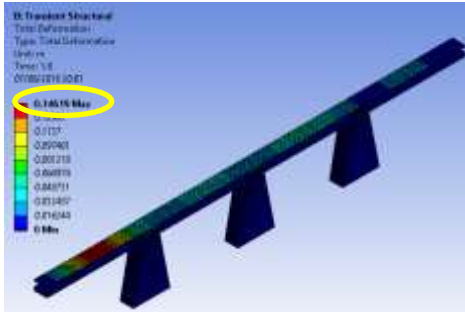


LAMPIRAN E (LENDUTAN KERETA API MALABAR PENUH)

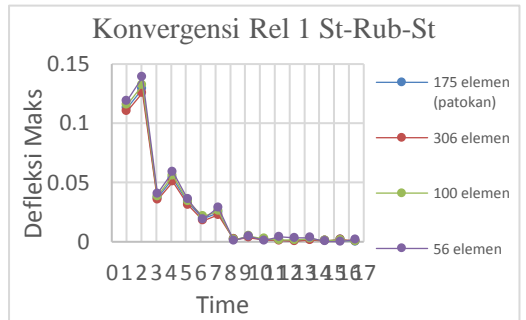
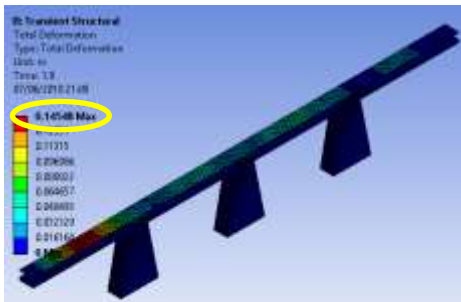
Time	Al-Ru-Al	St-Rub-St	Al-Neo-Al	St-Neo-St	FRP-Neo-FRP	FRP-Rub-FRP	Al-Al-Al	St-St-St
0,9	0,11881	0,11839	0,12164	0,12121	0,12801	0,12528	0,082947	0,084152
1,8	0,14619	0,14548	0,15122	0,15076	0,16056	0,15561	0,085779	0,087589
2,7	0,070725	0,069979	0,074453	0,07381	0,087809	0,083677	0,036148	0,036826
3,6	0,10735	0,10686	0,11588	0,11507	0,13302	0,12504	0,056135	0,057307
4,5	0,076582	0,074628	0,081777	0,079903	0,096571	0,090722	0,034321	0,034815
5,4	0,09277	0,090585	0,099296	0,09695	0,11311	0,10685	0,042868	0,042448
6,3	0,086882	0,085261	0,090313	0,088772	0,095356	0,091924	0,058812	0,058179
7,2	0,11085	0,10932	0,11423	0,11267	0,11971	0,11669	0,07314	0,072452
8,1	0,014149	0,013802	0,018794	0,018415	0,021023	0,016995	0,0076469	0,0078377
9	0,026598	0,026099	0,029746	0,0293	0,033544	0,030596	0,013455	0,013237
9,9	0,029563	0,029067	0,031891	0,031311	0,03396	0,032267	0,015195	0,014978
10,8	0,018282	0,017977	0,01683	0,016226	0,015771	0,017953	0,011718	0,011607
11,7	0,005007	0,004688	0,010515	0,010221	0,01286	0,0085243	0,0055398	0,0055738
12,6	0,014562	0,014247	0,019642	0,019435	0,022955	0,018502	0,0029789	0,003145
13,5	0,018474	0,018039	0,020802	0,020089	0,021883	0,021045	0,005007	0,0048256
14,4	0,011565	0,011116	0,0079341	0,0068976	0,0060299	0,010591	0,0065611	0,0064201
15,3	0,002829	0,002728	0,0062743	0,0070124	0,0095522	0,0029486	0,0056269	0,0055759
16,2	0,008478	0,008404	0,014132	0,014082	0,016431	0,012105	0,0031902	0,0032355

LENDUTAN DAN KONVERGENSI MALABAR PENUH

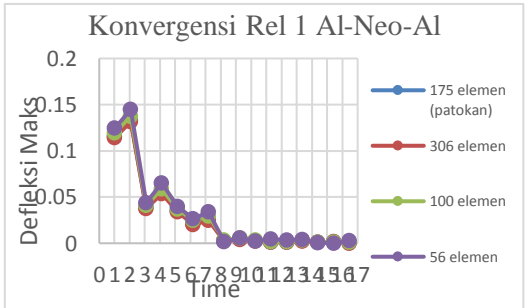
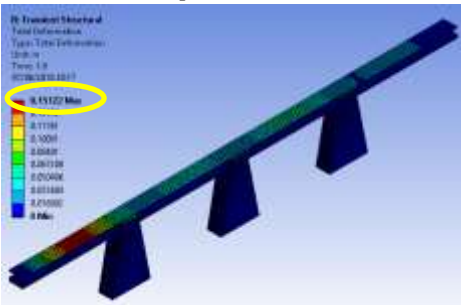
1. Aluminium-Rubber-Aluminium



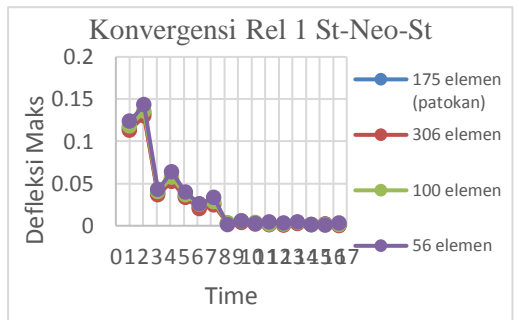
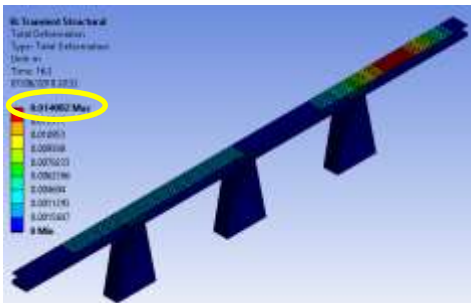
2. Steel-Rubber-Steel



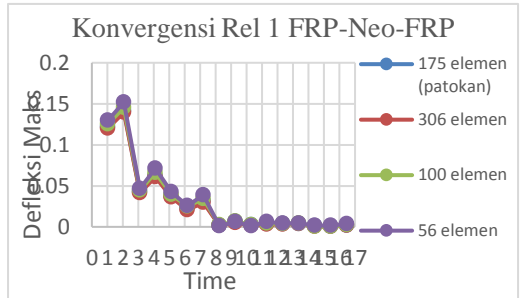
3. Aluminium-Neoprene-Aluminium



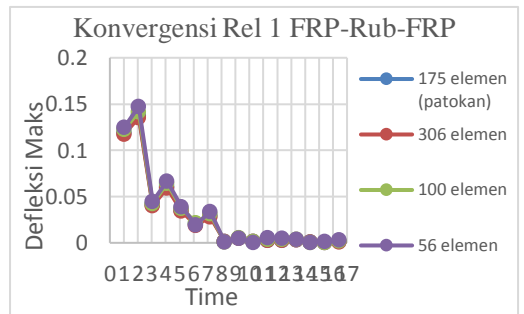
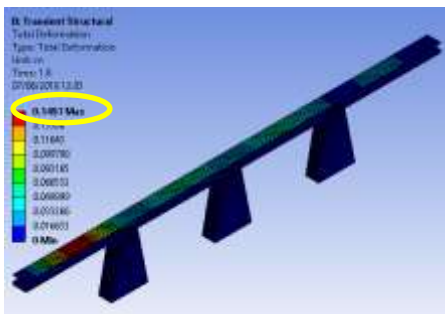
4. Steel-Neoprene-Steel



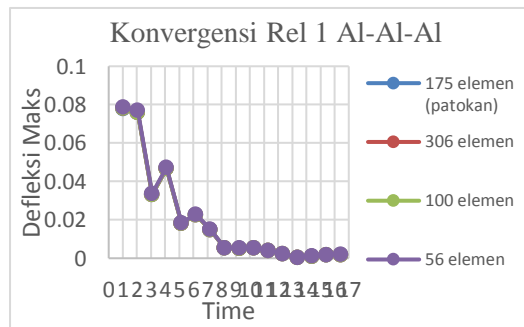
5. FRP-Neoprene-FRP



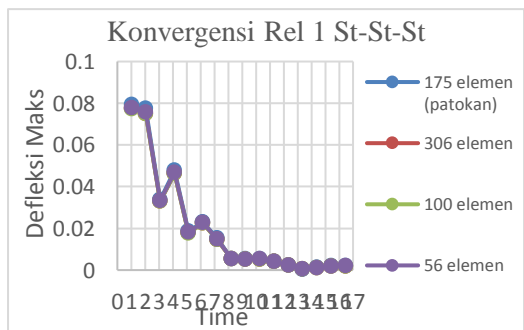
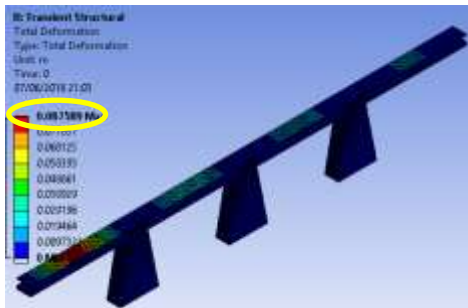
6. FRP-Rubber-FRP



7. Aluminium



8. Steel

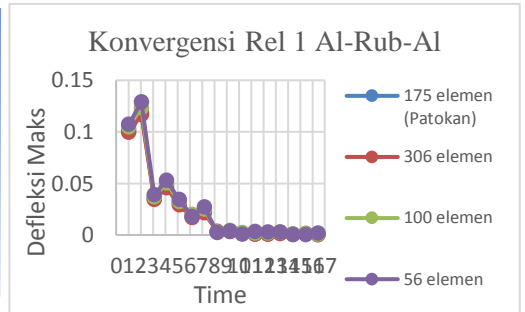
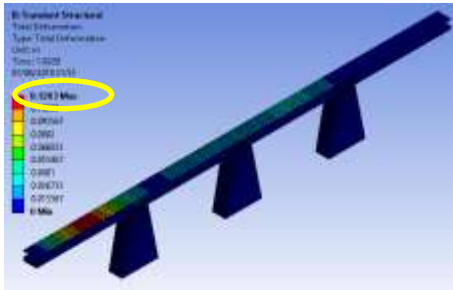


LAMPIRAN F
LENDUTAN KERETA API PENATARAN KOSONG

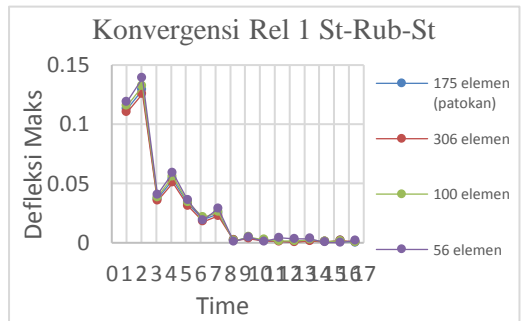
Time	Al-Ru-Al	St-Rub-St	Al-Neo-Al	St-Neo-St	FRP-Neo-FRP	FRP-Rub-FRP	Al-Al-Al	St-St-St
1,0287	0,10143	0,10109	0,10388	0,10354	0,10912	0,10671	0,069885	0,070906
2.0575	0,1203	0,11993	0,12414	0,12377	0,13175	0,12795	0,068442	0,069919
3.0862	0,05842	0,057867	0,062181	0,06158	0,072414	0,068602	0,029777	0,030351
4.115	0,087009	0,086043	0,094422	0,093699	0,10922	0,10165	0,041754	0,042661
5.1437	0,059902	0,059003	0,065329	0,064474	0,075608	0,069991	0,025752	0,026148
6.1725	0,075803	0,074583	0,081904	0,080589	0,094924	0,088714	0,03067	0,031045
7.2012	0,068987	0,068278	0,071903	0,071169	0,076009	0,073313	0,044066	0,045047
8.23	0,092318	0,091493	0,095417	0,094563	0,101	0,09799	0,058256	0,059314
9.2587	0,006732	0,006764	0,010061	0,0099749	0,014005	0,010489	0,0046019	0,0048093
10,288	0,017401	0,017177	0,019041	0,018889	0,021834	0,020025	0,0081314	0,0084096
11,316	0,02082	0,020556	0,022882	0,022621	0,02571	0,023764	0,0099139	0,010224
12.345	0,015962	0,015686	0,016349	0,015968	0,017608	0,017566	0,0087685	0,0089824
13.374	0,00541	0,005259	0,006102	0,0063285	0,0079776	0,0047466	0,0058136	0,0058663
14.403	0,004454	0,004531	0,0080893	0,0082876	0,010504	0,0069423	0,0022754	0,0021732
15.431	0,009868	0,00972	0,012919	0,012919	0,01581	0,012969	0,0015847	0,0017044
16.46	0,009974	0,009778	0,011279	0,010735	0,012207	0,011998	0,0028161	0,0030371

LENDUTAN DAN KONVERGENSI PENATARAN KOSONG

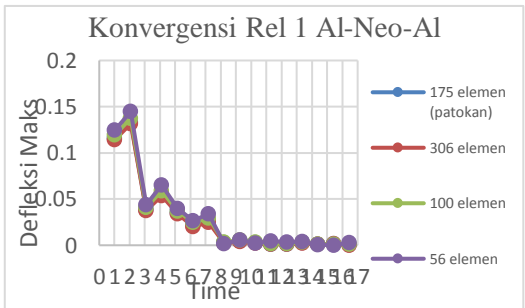
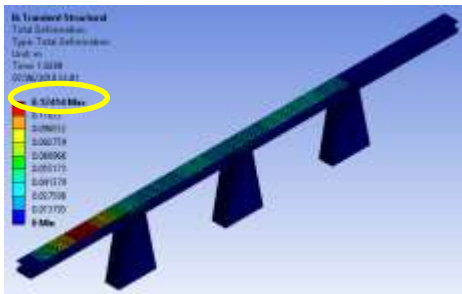
1. Aluminium-Rubber-Aluminium



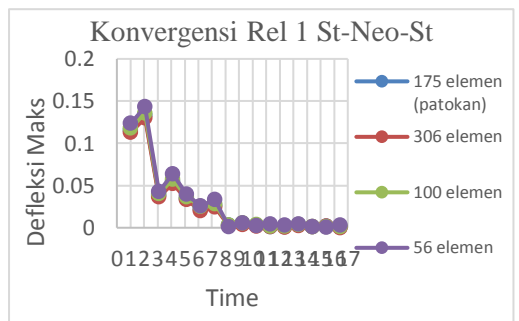
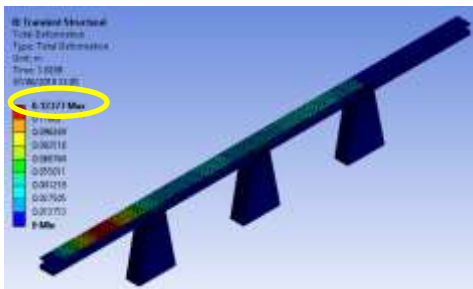
2. Steel-Rubber-Steel



3. Aluminium-Neoprene-Aluminium



4. Steel-Neoprene-Steel

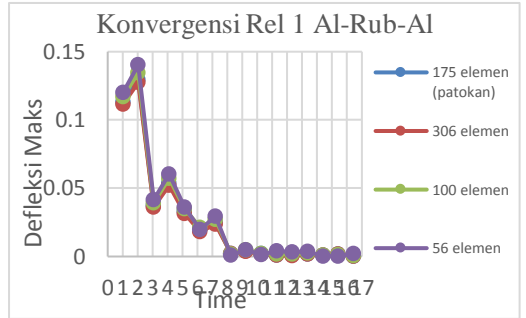
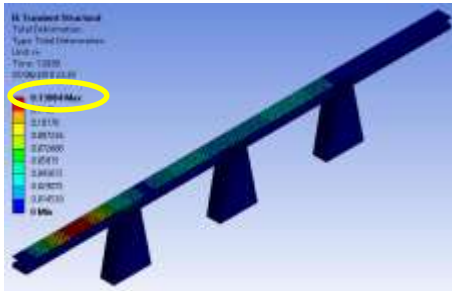


LAMPIRAN G (LENDUTAN KERETA API PENATARAN PENUH)

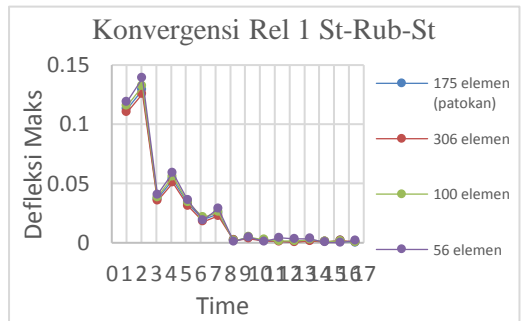
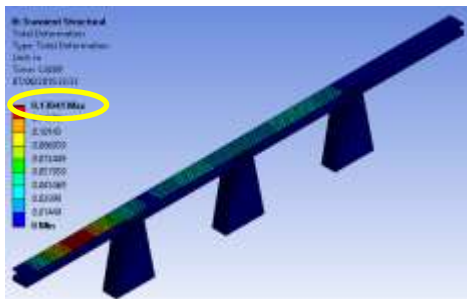
Time	Al-Ru-Al	St-Rub-St	Al-Neo-Al	St-Neo-St	FRP-Neo-FRP	FRP-Rub-FRP	Al-Al-Al	St-St-St
1,0287	0,11326	0,11286	0,11589	0,11549	0,12194	0,11935	0,078039	0,079177
2,0575	0,13084	0,13041	0,13514	0,13473	0,1436	0,13943	0,075946	0,077556
3,0862	0,067878	0,067253	0,071651	0,070969	0,083336	0,079446	0,033212	0,033843
4,115	0,094722	0,093919	0,10286	0,10206	0,11953	0,11138	0,046776	0,047797
5,1437	0,070224	0,069157	0,075532	0,074476	0,087786	0,082172	0,030511	0,030958
6,1725	0,084218	0,082692	0,090551	0,089009	0,10559	0,099195	0,037099	0,037902
7,2012	0,082141	0,081274	0,085245	0,084368	0,090175	0,087249	0,052957	0,0541
8,23	0,1083	0,10732	0,11179	0,11079	0,1182	0,11491	0,069195	0,070408
9,2587	0,00848	0,008502	0,0099181	0,0099957	0,014379	0,010738	0,0051221	0,005358
10,288	0,020842	0,020624	0,023002	0,022831	0,026127	0,023858	0,0096623	0,0099881
11,316	0,024325	0,024029	0,026722	0,026416	0,029904	0,027668	0,011763	0,012123
12,345	0,017964	0,017642	0,018399	0,01796	0,019888	0,019926	0,010391	0,010638
13,374	0,005791	0,005587	0,0073918	0,0076764	0,0078044	0,0051144	0,0068824	0,0069394
14,403	0,005444	0,005559	0,0095844	0,0098453	0,012335	0,0082394	0,0026844	0,0025604
15,431	0,011159	0,011011	0,014724	0,01469	0,018043	0,014795	0,0017673	0,0019016
16,46	0,011197	0,010958	0,012637	0,012008	0,013802	0,013635	0,003347	0,0036073

LENDUTAN DAN KONVERGENSI PENATARAN PENUH

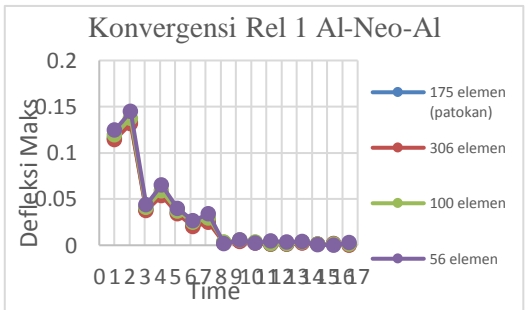
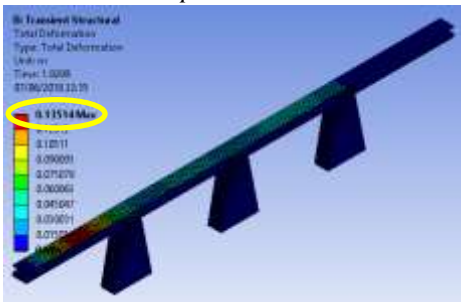
1. Aluminium-Rubber-Aluminium



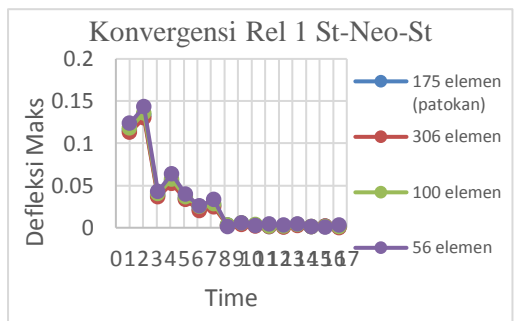
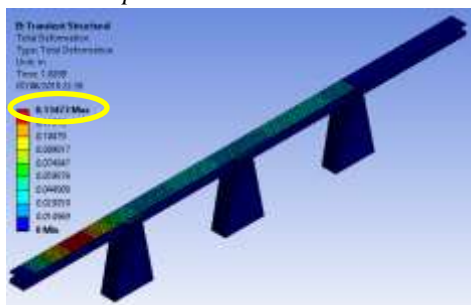
2. Steel-Rubber-Steel



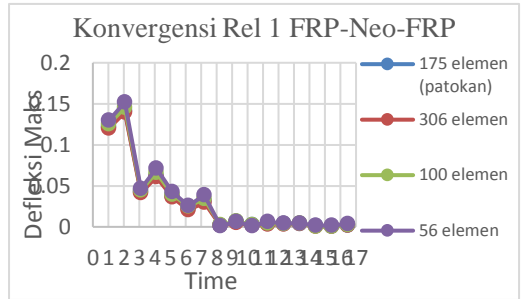
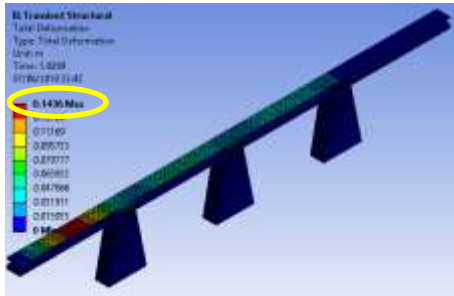
3. Aluminium-Neoprene-Aluminium



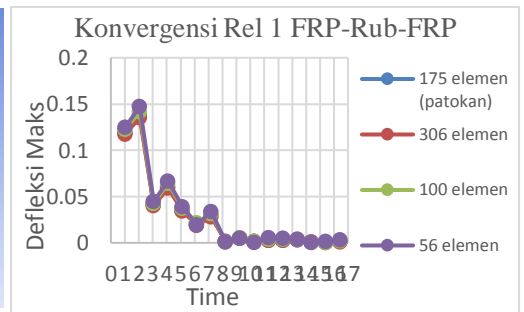
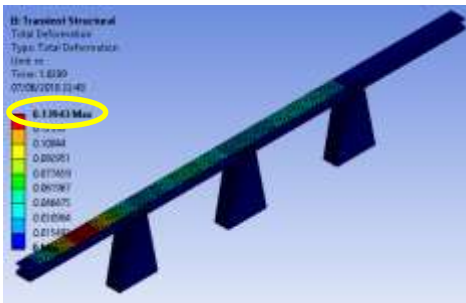
4. Steel-Neoprene-Steel



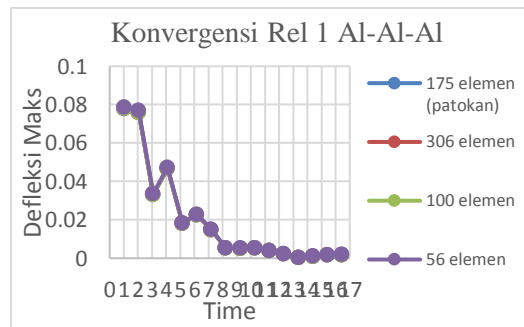
5. FRP-Neoprene-FRP



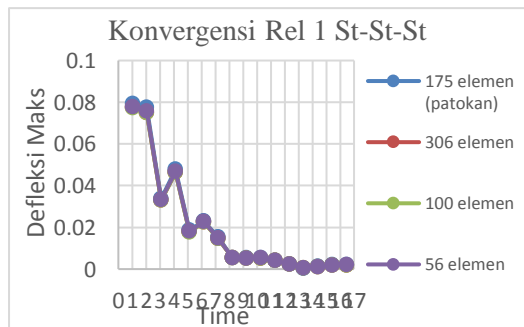
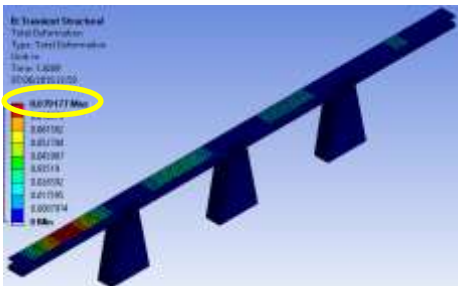
6. FRP-Rubber-FRP



7. Aluminium



8. Steel



LAMPIRAN H
VERIFIKASI *DISPLACEMENT, FORCE, MOMEN*
DENGAN *MATHCAD*

$$E := 2 \cdot 10^{11}$$

$$I := \frac{5 \cdot 20^3}{12} = 3.333 \times 10^3$$

$$L := 20$$

$$K = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \\ Y2 \\ M2 \end{pmatrix} = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta1 \\ \theta1 \\ \Delta2 \\ \theta2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \\ -840000 \\ 0 \end{pmatrix} = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta1 \\ \theta1 \\ \Delta2 \\ \theta2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta2 \\ \theta2 \end{pmatrix} := \left[E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \right]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -840000 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.36 \times 10^{-6} \\ -2.52 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \\ -840000 \\ 0 \end{pmatrix} = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.36 \times 10^{-6} \\ -2.52 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

$$E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.36 \times 10^{-6} \\ -2.52 \times 10^{-7} \end{pmatrix} \text{float, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} 840000.0 \\ 1.68e7 \\ -840000.0 \\ 8.4703e-22 \end{pmatrix}$$

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Ilvy Wiliyanti, adalah anak pertama dari Bapak Wiyadi dan Ibu Nikmatus Sholichah yang dilahirkan di Lamongan, 22 Oktober 1996. Pendidikan formal yang ditempuh penulis mulai dari SDN Deket Kulon 1 pada tahun 2002, SMPN 2 Lamongan pada tahun 2008, SMAN 2 Lamongan pada tahun 2011, dan mengambil S1 Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2014.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi dan kepanitiaan, seperti asisten Laboratorium Getaran dan Akustik Teknik Fisika ITS, staff media informasi Klub Keilmiahan ITS 15/16, staff riset dan teknologi HMTF ITS 15/16, wakil ketua departemen riset dan teknologi HMTF ITS 16/17, sekretaris ILTC dalam EPW (*Engineering Physics Week*) 2016, bendahara konferensi internasional getaran dan akustik (RECAV) 2017. Selain itu, penulis menyukai kegiatan keilmiahan dengan manjadi finalis di berbagai *event* lomba karya tulis ilmiah nasional.

Menjadi asisten Laboratorium Getaran dan Akustik, serta menyelesaikan kerja praktek bidang getaran di PT. Semen Gresik dan PT. Tiara Getaranndo Pratama, membuat penulis tertarik mengambil tugas akhir dengan judul “Pengaruh Bahan Isolasi Getaran terhadap Pola Lendutan Jembatan Rel Kereta Api dalam Tinjauan Elemen Hingga”. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis di wiliyantilvy@gmail.com.