



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 184835

**ANALISA NUMERIK TEGANGAN DINAMIK  
PADA REL KERETA API AKIBAT BEBAN *IMPACT*  
DENGAN KENAIKAN SUHU**

EKA HIKMAH APRILIA  
NRP. 021 1 15 40000 050

Dosen Pembimbing  
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**TUGAS AKHIR - TM184835**

**ANALISA NUMERIK TEGANGAN DINAMIK  
PADA REL KERETA API AKIBAT BEBAN *IMPACT*  
DENGAN KENAIKAN SUHU**

**Eka Hikmah Aprilia**  
**0211154000050**

Dosen Pembimbing  
**Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.**  
**196807061999031004**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA - 2019**



**FINAL PROJECT- TM184835**

**NUMERICAL DYNAMIC VOLTAGE ANALYSIS  
OF RAIL TRAIN DUE TO *IMPACT* LOADS  
BY INCREASING TEMPERATURE**

**Eka Hikmah Aprilia  
0211154000050**

Supervisor  
**Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.  
196807061999031004**

**MECHANICAL ENGINEERING  
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA - 2019**

**ANALISA NUMERIK TEGANGAN DINAMIK  
PADA REL KERETA API AKIBAT BEBAN *IMPACT*  
DENGAN KENAIKAN SUHU**

**TUGAS AKHIR**


Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**EKA HIKMAH APRILIA**

NRP. 02111540000050

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Julendra Bambang Ariatedia, MT, Log. (Pembimbing)  
NIP. 196807061999031004
  2. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc., Dr.Eng. (Penguji I)  
NIP. 197805102001121004
  3. Alief Wikarta, ST, M.Sc.Eng., PhD (Penguji II)  
NIP. 198202102006041002
  4. Agus Sigit Pramono, Ir. Dr. DEA (Penguji III)  
NIP. 196508101991021001
- 

**SURABAYA**

**JULI, 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan

# **ANALISA NUMERIK TEGANGAN DINAMIK PADA REL KERETA API AKIBAT BEBAN *IMPACT* DENGAN KENAIKAN SUHU**

**Nama Mahasiswa** : Eka Hikmah Aprilia  
**NRP** : 0211154000050  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT

## **Abstrak**

*Penggunaan kereta api sebagai transportasi massal di Indonesia meningkat tinggi sejalan dengan tingkat mobilisasi masyarakat. Maka dibutuhkan adanya perawatan dan kontrol terhadap kondisi kereta api agar terhindar dari kerusakan. Salah satu penyebab kerusakan atau kecelakaan kereta api adalah kegagalan kontak antara roda dan rel kereta api. Kegagalan ini disebabkan oleh cacat pada permukaan rel dan perubahan geometri pada roda atau rel akibat ekspansi suhu. Salah satu cara untuk mencegah kerusakan atau kecelakaan ini dapat dilakukan melalui analisa dari beban impact yang terjadi di rel pada saat roda kereta melintas menggunakan alat ukur (strain gauge) yang menghasilkan output berupa tegangan. Tegangan ini bisa menggambarkan beban impact yang terjadi yang diakibatkan ketidak-rataan (profil) roda kereta api. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisa hubungan beban impact dengan tegangan namun belum adanya pengaruh kenaikan suhu. Sedangkan besarnya tegangan akan berubah jika terdapat perubahan suhu. Begitu pula dengan peletakan dari alat ukur mempengaruhi besarnya tegangan yang terbaca sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai peletakan alat ukur tersebut.*

*Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan Finite Element Software yaitu Ansys Workbench 18.1. Pembebanan impact berupa gaya tepat di atas permukaan rel bagian tengah yang mempresentasikan adanya kontak antara roda*

*dan rel. Gaya impact yang terjadi di variasikan sebesar 10-90kN. Analisa dilakukan pada titik ditempatkannya strain gauge yaitu titik tengah pada rel kereta api di antara dua bantalan. Ada tujuh titik node yang dianalisa sepanjang garis lurus kebawah.*

*Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa tegangan impact yang terbaca akan semakin besar pada node yang terletak semakin ke bawah (node 1-7) menjauhi letak beban impact di berikan. Semakin besar beban impact yang diberikan maka tegangan impact yang terbaca juga semakin besar. Besarnya selisih tegangan impact maksimum meningkat dari node 1 ke node 7. Hal ini akan mempermudah pembacaan tegangan impact ketika alat ukur diletakkan pada bagian bawah sisi sampir rel kereta api (antara node 5-7). Adanya kenaikan suhu juga mempengaruhi besarnya tegangan impact yang terjadi akibat beban impact. Besarnya kenaikan tegangan impact yang terjadi antara 119.5% hingga 3005.6% pada beban impact 10-450kN dari tegangan impact tanpa pengaruh kenaikan suhu.*

***Kata Kunci: Beban Impact, Kenaikan suhu, Metode Elemen Hingga, Rel Kereta Api.***



# NUMERICAL DYNAMIC VOLTAGE ANALYSIS OF RAIL TRAIN DUE TO *IMPACT* LOADS BY INCREASING TEMPERATURE

**Student Name** : Eka Hikmah Aprilia  
**NRP** : 0211154000050  
**Department** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Supervisor** : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT

## **Abstract**

*The use of trains as mass transportation in Indonesia has increased high in line with the level of community mobilization. So it takes care and control of the condition of the train to avoid damage. One of the causes of train damage or accidents is the failure of contact between the wheels and the railroad tracks. This failure is caused by defects in the rail surface and changes in geometry on the wheels or rails due to temperature expansion. One way to prevent this damage or accident can be done through an analysis of the impact loads that occur on the rail when the train wheels pass using a gauge (strain gauge) which produces output in the form of voltage. This voltage can describe the impact load that occurs due to the unevenness (profile) of the train wheels. In the previous study an analysis of the relationship of impact loads with stress has been carried out but there is no effect of temperature rise While the magnitude of the voltage will change if there is a change in temperature. Likewise, the laying of a measuring instrument affects the magnitude of the voltage that is read so that further research is needed regarding the placement of the measuring instrument.*

*This research was conducted numerically by using Finite Element Software namely Ansys Workbench 18.1. Impact impact force is just above the center of the rail surface which represents contact between the wheels and rails. Impact styles that occur vary by 10-90kN. The analysis is carried out at the point where the strain gauge is placed which is the midpoint on the railroad tracks*

*between the two bearings. There are seven node points analyzed along a straight line down.*

*From this study, the results show that the impact voltage that is read will be greater in the nodes located further down (nodes 1-7) away from the location of the impact load given. The greater the impact load given, the greater the impact voltage that is read. The amount of the maximum impact voltage difference increases from node 1 to node 7. This will facilitate the reading of the impact voltage when the measuring instrument is placed at the bottom side of the railroad side (between nodes 5-7). The increase in temperature also affects the magnitude of the impact voltage caused by the impact load. The magnitude of the increase in the impact voltage that occurs between 119.5% to 3005.6% of the impact voltage from 10-450kN without the influence of temperature rise.*

***The key words: Impact Load, Temperature Increase, Finite Element Method, Railroad.***

## **Kata Pengantar**

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Melalui kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada ibuk, bapak dan adek-adek tercinta serta semua pihak yang telah membantu dan memberi dukungan baik secara moral dan material, antara lain:

1. Pak Julendra selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, terima kasih atas motivasi, dukungan dan selalu membimbing penulis dengan sangat sabar selama ini sehingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir
2. Pak Alief Wikarta, Pak Agus Sigit dan Pak Unggul Wasiwiono terima kasih atas waktu, saran dan bimbingan yang diberikan kepada penulis
3. Pak Herman Sasongko yang berusaha membimbing penulis selaku mahasiswa anak perwaliannya dalam perwalian dari awal hingga saat ini
4. Terima kasih teramat besar kepada sahabat baikku Alifatul Laila yang sabar menemani sejak menjadi mahasiswa baru hingga penulis menyelesaikan tugas akhirnya
5. Kenjeran tim Rina, Nilam, Mitha, Cem, Vidi yang sabar, mau menjadi teman makan, jalan jalan, dan menjadi pagar pelindung penulis
6. Elicia Novita, Retno, Tamara Ara, Resti, Carla yang menjadi teman kos ambis yang membawa pengaruh baik bagi penulis dan dengan sabar mengajari dan menjadi teman belajar penulis
7. Heny, Dhina, Iit, Farra, Devinda, Lucia, Hasan, Okky, Luki, Galih, Prapanca yang mengisi hari-hari penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini yang mau mendengarkan cerita penulis dan menjadi teman bertukar cerita.

8. Saudaraku Deva, SC ku Mas Nico dan sahabatku Dewi menjadi tempat penulis berkeluh kesah dan mencari solusi dalam setiap masalah guna mempersiapkan hal-hal yang ingin penulis capai.
9. Seluruh bapak karyawan dan staff Departemen Teknik mesin yang membantu penulis dalam melaksanakan kegiatan-kegiatan organisasi, menjalani perkuliahan, dan menyelesaikan tugas akhir
10. Kawan - kawan M58, kalian adalah tempat kembali, tetap junjung solidaritas di antara kita. Buat ciwi-ciwi M58, tetep semangat dan selamat berjuang.
11. Dan semua pihak yang turut membantu, tetapi tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, segala saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, penulis berharap agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangan bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Amin

Surabaya, Juli 2019

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>Abstrak</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vii
<b>Kata Pengantar</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xx
<b>Daftar Simbol Dan Satuan</b> .....	xxi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xxiii
<b>BAB I</b> .....	1
<b>PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat.....	3
<b>BAB II</b> .....	5
<b>TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
a. Tinjauan Pustaka.....	5
b. Dasar Teori.....	14
i. Rel Kereta Api.....	14
ii. Gaya Pada Rel Kereta Api.....	16
iii. Pemodelan <i>Impact Load</i> Pada Rel Kereta Api.....	18

iv.	Konsep Buckling .....	23
v.	Diskripsi Tegangan Pada Suatu Titik .....	27
vi.	Konsep Tegangan .....	29
<b>BAB III</b>	.....	31
<b>METODE PENELITIAN</b>	.....	31
3.1	Prosedur penelitian .....	31
3.2	Flow Chart Metode Penelitian.....	33
3.3	Data yang Diperlukan dalam Tugas Akhir .....	35
3.3.1	Geometri Rel Kereta Api 42 kg .....	35
3.3.2	Karakteritis Struktur Rel Kerata Api dan Karakteristik .....	36
3.4	Posisi Pembebanan <i>Impact</i> .....	37
3.4.1	Prosedur Penggambaran Model Menggunakan Solidworks 2017 .....	39
3.5	Validasi Model .....	40
3.5.1	Prosedur Validasi Pertama Rel Kereta Api .....	40
3.5.2	Validasi Kedua .....	48
3.5.3	Validasi Ketiga .....	51
3.6	Penentuan Jenis Analisa pada ANSYS Workbench 18.1 .....	55
<b>BAB IV</b>	.....	69
4.1	Analisa Tegangan Akibat Beban <i>Impact</i> Model Tiga Layer .....	71
4.1.1	Analisa Tegangan Akibat Kenaikan Beban <i>Impact</i> Pada <i>Node</i> Dengan Model Rel Kereta Api Tiga <i>Layer</i> Tanpa Kenaikan Suhu.....	71

4.1.2 Analisa Tegangan Akibat Beban <i>Impact</i> Model Tiga Layer Tanpa Pengaruh Suhu Pada Model .....	78
4.2 Analisa Tegangan Akibat Beban <i>Impact</i> Model Satu Layer .....	102
4.2.1 Analisa Tegangan Akibat Kenaikan Beban <i>Impact</i> Pada <i>Node</i> Dengan Model Rel Kereta Api Satu <i>Layer</i> Tanpa Pengaruh Kenaikan Suhu .....	102
4.2.2 Analisa Tegangan Akibat Kenaikan Beban <i>Impact</i> Pada <i>Node</i> Dengan Model Rel Kereta Api Satu <i>Layer</i> Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu .....	109
4.3 Diskusi Hasil dengan Penelitian Terdahulu .....	116
<b>BAB V</b> .....	119
V.I KESIMPULAN .....	119
V.II SARAN .....	120
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	121
<b>LAMPIRAN</b> .....	125
Lampiran A .....	125
Lampiran B .....	126
.....	128
Lampiran C .....	129
Lampiran D .....	133
Lampiran E .....	141

Lampiran F .....	142
Lampiran G.....	143
Lampiran H.....	147
Lampiran J .....	153
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>121</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Rel kereta api yang mengalami buckling <sup>[16]</sup> .....	10
Gambar 2. 2 Pemasangan Strain Gauge Pada Rel Kereta Api ...	11
Gambar 2. 3 Pemodelan Rel Kereta Api Tiga <i>Layer</i> <sup>[11]</sup> .....	13
Gambar 2. 4 Perkembangan Profil Rel Kereta Api .....	14
Gambar 2. 5 Bagian-bagian Rel Kereta Api.....	15
Gambar 2. 6 Gaya Pada Rel .....	17
Gambar 2. 7 Model Dinamik oleh I Made P et al. (2008) <sup>[12]</sup> .....	18
Gambar 2. 8 Pemodelan Rel oleh Nielsen dan Igeland (1994) <sup>[11]</sup> .....	19
Gambar 2. 9 Pergerakan roda dengan cacat pada kecepatan tinggi dan rendah <sup>[11]</sup> .....	21
Gambar 2. 10 Pemodelan tiga <i>layer</i> <sup>[11]</sup> .....	21
Gambar 2. 11 Basic parameters <sup>[23]</sup> .....	22
Gambar 2. 12 Model Simulasi oleh Bian et al. <sup>[23]</sup> .....	23
Gambar 2. 13 Contoh Track yang Mengalami Buckling <sup>[14]</sup> .....	24
Gambar 2. 14 Tampak Atas Rel <sup>[16]</sup> .....	25
Gambar 2. 15 Buckling dari sebuah ideal column <sup>[16]</sup> .....	25
Gambar 2. 16 Kondisi tegangan secara tiga dimensi pada suatu titik <sup>[11]</sup> .....	28
Gambar 3. 1 Flow Chat .....	34
Gambar 3. 2 Geometri Rel Kereta Api Tipe 42 kg <sup>[11]</sup> .....	35
Gambar 3. 3 Skema Pembebanan <sup>[11]</sup> .....	37
Gambar 3. 4 Free Body Diagram .....	37
Gambar 3. 5 Sketsa Rel .....	39
Gambar 3. 6 Desain 3D Rel Kereta Api.....	39
Gambar 3. 7 Skema Pembebanan.....	40
Gambar 3. 8 Free body diagram potongan .....	41
Gambar 3. 9 Diagram Gaya Normal, Gaya Vertikal, dan Momen .....	43
Gambar 3. 10 Grafik Konfigurasi Validasi Pertama .....	47
Gambar 3. 11 Validasi Pertama Defleksi pada Ansys Workbench 18.1 .....	48
Gambar 3. 12 Skema Validasi Kedua .....	48

Gambar 3. 13 Grafik Konfigurasi Validasi Kedua .....	50
Gambar 3. 14 Gambar Validasi Tahap Kedua.....	51
Gambar 3. 15 Menentukan Tipe Simulasi dengan Explicit Dynamic .....	56
Gambar 3. 16 Input Karakteristik Material Dan Suhu Model Rel .....	56
Gambar 3. 17 Massa Bantalan Beton dan Kerikil .....	58
Gambar 3. 18 Pemodelan bantalan beton dan kerikil .....	59
Gambar 3. 19 Input geometri dengan klik import geometri .....	59
Gambar 3. 20 Pengaturan Proses Meshing .....	61
Gambar 3. 21 Hasil Proses Meshing .....	62
Gambar 3. 22 Penyederhanaan Susunan Spring Tampak Depan	63
Gambar 3. 23 Model Spring dari Penyederhanaan .....	63
Gambar 3. 24 Tabel Pengaturan Spring.....	65
Gambar 3. 25 Pembuatan Connection Spring .....	65
Gambar 3. 26 Pembebanan 50kN Tepat Berada Ditengah Rel Kereta Api.....	66
Gambar 4. 1 Penunjukkan letak <i>node</i> dan Arah Sumbu x, y, dan z terhadap desain rel kereta api .....	70
Gambar 4. 2 Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh <i>node</i> (a) beban <i>impact</i> 50kN (b) 10-40kN (c) 60-90kN .....	73
Gambar 4. 3 History Tegangan Von Mises Pada (a) <i>Node</i> 7 (b) <i>Node</i> 1-3 (c) <i>node</i> 4-6 Dengan Beban <i>Impact</i> yang Berbeda.....	76
Gambar 4. 4 Tegangan Maksimum pada <i>node-node</i> dengan variasi beban <i>impact</i> .....	77
Gambar 4. 5 Time history Tegangan Von Mises Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 20kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu.....	79
Gambar 4. 6 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	80

Gambar 4. 7	Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 20kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu .....	81
Gambar 4. 8	Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	83
Gambar 4. 9	Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 30kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu .....	84
Gambar 4. 10	Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	85
Gambar 4. 11	Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 40kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu .....	87
Gambar 4. 12	Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	88
Gambar 4. 13	Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 60kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu .....	89
Gambar 4. 14	Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	90
Gambar 4. 15	Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 60kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu .....	91
Gambar 4. 16	Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh	

kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	92
Gambar 4. 17 Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 70kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu.....	94
Gambar 4. 18 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	95
Gambar 4. 19 Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 80kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu.....	96
Gambar 4. 20 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	97
Gambar 4. 21 Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban <i>Impact</i> 90kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu.....	99
Gambar 4. 22 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu .....	100
Gambar 4. 23 perbandingan nilai tegangan maksimum akibat beban <i>impact</i> .....	101
Gambar 4. 24 Grafik Time history Tegangan Von Misses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 450kN pada model satu layer support.....	104
Gambar 4. 25 Grafik Time history Tegangan Von Misses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 350kN pada model satu layer support.....	105
Gambar 4. 26 Grafik Time history Tegangan Von Misses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 250kN pada model satu layer support.....	106

Gambar 4. 27 Grafik Time history Tegangan Von Miseses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 250kN pada model satu layer support.....	107
Gambar 4. 28 Grafik Time history Tegangan Von Miseses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 250kN pada model satu layer support.....	108
Gambar 4. 29 Grafik Time history Tegangan Von Miseses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 450kN pada model satu layer support.....	110
Gambar 4. 30 Grafik Time history Tegangan Von Miseses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 350kN pada model satu layer support.....	111
Gambar 4. 31 Grafik Time history Tegangan Von Miseses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 250kN pada model satu layer support.....	112
Gambar 4. 32 Grafik Time history Tegangan Von Miseses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 150kN pada model satu layer support.....	113
Gambar 4. 33 Grafik Time history Tegangan Von Miseses pada tujuh <i>node</i> akibat beban <i>impact</i> 150kN pada model satu layer support.....	114
Gambar 4. 34 Melihat kenaikan nila tegangan akibat beban <i>impact</i> dengan model susunan support satu layer .....	115
Gambar 4. 35 Melihat kenaikan nila tegangan akibat beban <i>impact</i> dengan model susunan support satu layer .....	116
Gambar 4. 36 Hasil penelitian Bian (2013).....	117

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Uji konvergensi validasi pertama .....	46
Tabel 3. 2 Uji konvergensi untuk validasi kedua .....	49
Tabel 4. 1 Koordinat <i>Node</i> .....	69
Tabel 5. 1 Rangkuman tegangan maksimum akibat beban <i>impact</i> .....	117

## Daftar Simbol Dan Satuan

$\sigma$	Tegangan (N/ m <sup>2</sup> )
F	Gaya Luar (N)
A	Luasan tempat bidang bekerja (m <sup>2</sup> )
$\sigma_n$	Tegangan normal (N/ m <sup>2</sup> )
$\tau_n$	Tegangan geser (N/ m <sup>2</sup> )
F <sub>n</sub>	Gaya normal (N)
F <sub>t</sub>	Gaya tangensial (N)
$\sigma_x$	Tegangan ke arah - x (N/ m <sup>2</sup> )
$\sigma_y$	Tegangan ke arah - y (N/ m <sup>2</sup> )
$\sigma_z$	Tegangan ke arah - z (N/ m <sup>2</sup> )
$\tau_{xy}$	Tegangan geser pada bidang - x ke arah - y (N/ m <sup>2</sup> )
$\tau_{yz}$	Tegangan geser pada bidang - y ke arah - z (N/ m <sup>2</sup> )
$\tau_{zx}$	Tegangan geser pada bidang - z ke arah - x (N/ m <sup>2</sup> )
$\tau_{yx}$	Tegangan geser pada bidang - y ke arah - x (N/ m <sup>2</sup> )
$\tau_{xz}$	Tegangan geser pada bidang - x ke arah - z (N/ m <sup>2</sup> )
$\tau_{zy}$ ,	Tegangan geser pada bidang - z ke arah - y (N/ m <sup>2</sup> )
$\epsilon$	Regangan
$\delta$	Pertambahan panjang (m)
l	Panjang mula –mula (m)
$\epsilon_{xx}$	Regangan pada bidang -x ke arah - x
$\epsilon_{yy}$	Regangan pada bidang -y ke arah - y
$\epsilon_{zz}$	Regangan pada bidang -z ke arah - z
$\epsilon_{yz}$	Regangan pada bidang - y ke arah - z
$\epsilon_{xy}$	Regangan pada bidang -x ke arah -y
$\epsilon_{zx}$	Regangan pada bidang -z ke arah - x
$\sigma_{xx}$	Tegangan pada bidang -x ke arah - x (N/ m <sup>2</sup> )
$\sigma_{yy}$	Tegangan pada bidang -x ke arah - x (N/ m <sup>2</sup> )
$\sigma_{zz}$	Tegangan pada bidang -y ke arah - y (N/ m <sup>2</sup> )
$\sigma_{yz}$	Tegangan pada bidang -y ke arah - z (N/ m <sup>2</sup> )
$\sigma_{zx}$	Tegangan pada bidang -z ke arah - x (N/ m <sup>2</sup> )
$\sigma_{xy}$	Tegangan pada bidang -x ke arah - y (N/ m <sup>2</sup> )

$n_{yz}$	Poisin rasio pada bidang - y ke arah - z
$n_{zx}$	Poisin rasio pada bidang - z ke arah - x
$n_{xy}$	Poisin rasio pada bidang - x ke arah - y
$E_x$	Young's modulus ke arah - x (Pa)
$E_y$	Young's modulus ke arah - y (Pa)
$E_z$	Young's modulus ke arah - z (Pa)
$G_{z\ x}$	Modulus Geser bidang - z ke arah - x (Pa)
$G_{y\ z}$	Modulus Geser bidang - y ke arah - z (Pa)
$G_{x\ y}$	Modulus Geser bidang - x ke arah - y (Pa)
$\Upsilon_{xy}$	Regangan Geser bidang - x ke arah - y
$L$	Panjang Rel Kereta (m)
$\Delta t$	time step (s)



## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran A** Kelas jalan rel
- Lampiran B** Tabel material *properties* AISI 4000 series *steel*
- Lampiran C** Rangkuman hasil grafik respon tegangan terhadap kenaikan beban *impact*
- Lampiran D** Tabel data tegangan *Von mises* vs waktu akibat beban *impact*
- Lampiran E** Tegangan maksimum pada setiap *node*
- Lampiran F** Tabel data tegangan *Von mises* vs waktu akibat beban *impact* dengan pengaruh kenaikan suhu
- Lampiran G** Grafik respon tegangan terhadap kenaikan beban *impact* tanpa pengaruh kenaikan suhu pada Ansys Workbench
- Lampiran H** Grafik respon tegangan terhadap kenaikan beban *impact* dengan pengaruh kenaikan suhu pada Ansys Workbench
- Lampiran I** Grafik tegangan akibat beban *impact* pada setiap *node*
- Lampiran J** Tabel perbandingan nilai tegangan maksimum dengan dan tanpa pengaruh kenaikan suhu



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penggunaan alat transportasi massal di Indonesia meningkat tinggi sejalan dengan tingkat mobilisasi masyarakat. Salah satu alat transportasi yang menjadi pilihan adalah kereta api. Peningkatan penggunaan alat transportasi ini mendorong kebutuhan akan perawatan dalam rangka menjaga kereta api tetap beroperasi dengan baik. Salah satu penyebab kerusakan atau kecelakaan kereta api adalah kegagalan kontak antara roda dan rel kereta api. Kegagalan ini disebabkan oleh cacat pada permukaan rel, perubahan geometri pada roda atau rel akibat ekspansi suhu. Salah satu cara untuk mencegah kerusakan atau kecelakaan ini dapat dilakukan melalui analisa dari tegangan yang terjadi di rel pada saat roda kereta melintas menggunakan alat ukur (*strain gauge*) yang menghasilkan output berupa tegangan. Tegangan ini bisa menggambarkan beban *impact* yang terjadi yang diakibatkan ketidak-rataan (*profil*) roda kereta. Namun peletakan dari alat ukur mempengaruhi besarnya tegangan yang terbaca sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai peletakan alat ukur tersebut. Begitu pula dengan besarnya tegangan yang harus di atur dalam menganalisa kecacatan profil roda. Ketidak-sempurnaan *profil* roda ini diakibatkan keausan maupun perubahan bentuk sejalan dengan jam operasi yang tinggi. Besar tegangan akibat beban *impact* ini dipengaruhi oleh kecepatan kereta dan beban kereta api. Di lain pihak, kegagalan kontak antara roda dan rel juga bisa disebabkan oleh perubahan geometri rel akibat ekspansi kenaikan suhu yang tinggi. Kedua parameter ini (beban *impact* dan ekspansi akibat suhu) merupakan parameter penting dalam menjaga operasi kereta api agar berjalan dengan baik dan tidak menimbulkan kerusakan pada komponen rel lainnya.

Pada penelitian sebelumnya oleh **Ade Irma Yunita (2008)** dilakukan analisa pada satu *node* yang terletak pada sisi rel tempat pemasangan *strain gauge* yang berfungsi membaca besarnya

tegangan akibat beban *impact* untuk mengetahui hubungan antara cacat pada roda dengan besar tegangan *impact* yang terjadi pada rel kereta api yang menjadi bahan untuk mengevaluasi kerusakan dari roda kereta api. Namun, pada penelitian tersebut pengaruh suhu belum diperhitungkan sehingga tidak diketahui pengaruh suhu terhadap tegangan yang terbaca akibat beban *impact* tersebut.

Pada penelitian ini akan melanjutkan penelitian oleh Ade Irma Yunita dengan menganalisa tegangan *node-node* pada sisi peletakan *strain gauge* untuk mengetahui besarnya tegangan sebagai referensi peletakannya. Kemudian diambil salah satu *node* guna dianalisa lebih lanjut untuk mengetahui hubungan beban *impact* dan tegangan dengan memperhitungkan pengaruh kenaikan suhu. Analisa dilakukan dengan beban *impact* untuk melihat respon rel pada suhu awal 38<sup>0</sup>C dan variasi suhu akhir dengan menyesuaikan kondisi di Indonesia suhu rel sebesar 500C dan mempertimbangkan suhu ekstrim di negara lain sebesar 90<sup>0</sup>C yang mengalami perubahan beban *impact* antara 10-90kN untuk model rel kereta api dengan susunan *support 3 layer (pad and clip, ballast, sleeper)* dan 50-450kN dengan susunan *support 1 layer (pad and clip)* untuk mengetahui pembacaan besarnya tegangan pada *node* yang di analisa.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dari uraian pendahuluan di atas, permasalahan yang perlu dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana besarnya distribusi tegangan yang terjadi akibat pembebanan *impact* pada rel kereta api (sisi peletakan alat ukur)
2. Bagaimana perubahan tegangan yang terjadi akibat beban *impact* pada rel kereta api yang dikenai kenaikan suhu

## 1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisa besarnya distribusi tegangan yang terjadi akibat pembebanan *impact* pada rel kereta api (sisi peletakan alat ukur)

2. Mengetahui perubahan tegangan yang terjadi akibat beban *impact* pada rel kereta api yang dikenai kenaikan suhu

#### **1.4 Batasan Masalah**

Beberapa hal yang diajukan pada penyusunan tugas akhir ini, untuk menyederhanakan permasalahan yang akan dibahas adalah:

1. Panjang rel kereta api yang dianalisa adalah 3 kali jarak antar bantalan (tiga *layer*)
2. Pembebanan pada rel kereta api diberikan tepat pada titik tengah rel kereta api. Dengan asumsi beban maksimum terjadi saat beban berada di tengah dan merupakan tempat peletakan sensor *Wheel Impact Load Detector* (WILD) yang berada di tengah antara bantalan.
3. Material propertis yang digunakan dalam pemodelan rel kereta api berupa linier elastis
4. Moving load tidak di variasikan

#### **1.5 Manfaat**

Adapun manfaat dari penyusunan tugas akhir ini adalah:

- 1 Mengetahui hubungan beban *impact* dan besarnya tegangan pada rel kereta api dengan adanya pengaruh kenaikan suhu.
- 2 Menjadi salah satu acuan dalam menentukan peletakan alat ukur untuk mendeteksi kecacatan profil roda
- 3 Menjadi salah satu acuan untuk mengatur nilai batas tegangan pada alat ukur untuk mendeteksi kecacatan profil roda
- 4 Media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya *solid mechanic*
- 5 Menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **a. Tinjauan Pustaka**

Penggunaan alat transportasi massal di Indonesia meningkat tinggi sejalan dengan tingkat mobilisasi masyarakat. Salah satu alat transportasi yang menjadi pilihan adalah kereta api. Peningkatan penggunaan alat transportasi ini mendorong kebutuhan akan perawatan dalam rangka menjaga kereta api tetap beroperasi dengan baik. Salah satu penyebab kerusakan atau kecelakaan kereta api adalah kegagalan kontak antara roda dan rel kereta api. Kegagalan ini disebabkan oleh cacat pada permukaan rel, perubahan geometri pada roda atau rel akibat ekspansi suhu. Salah satu cara untuk mencegah kerusakan atau kecelakaan ini dapat dilakukan melalui analisa dari tegangan yang terjadi di rel pada saat roda kereta melintas menggunakan alat ukur (strain gauge) yang menghasilkan output berupa tegangan. Tegangan ini bisa menggambarkan beban *impact* yang terjadi yang diakibatkan ketidak-rataan (profil) roda kereta. Namun peletakan dari alat ukur mempengaruhi besarnya tegangan yang terbaca sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai peletakan alat ukur tersebut. Begitu pula dengan besarnya tegangan yang harus di atur dalam menganalisa kecacatan profil roda. Ketidak-sempurnaan profil roda ini diakibatkan keausan maupun perubahan bentuk sejalan dengan jam operasi yang tinggi. Besar tegangan akibat beban *impact* ini dipengaruhi oleh kecepatan kereta dan beban kereta api. Di lain pihak, kegagalan kontak antara roda dan rel juga bisa disebabkan oleh perubahan geometri rel akibat ekspansi kenaikan suhu yang tinggi. Kedua parameter ini (beban *impact* dan ekspansi akibat suhu) merupakan parameter penting dalam menjaga operasi kereta api agar berjalan dengan baik dan tidak menimbulkan kerusakan pada komponen rel lainnya.

Kereta api menjadi salah satu alat transportasi pilihan karena harga yang relative murah dan dapat mengangkut dalam jumlah besar serta ramah lingkungan jika dibandingkan dengan alat

transportasi yang lain <sup>[1]</sup>. Kerusakan yang terjadi pada rel kereta dapat disebabkan karena adanya beban *impact* yang berulang maupun perubahan suhu ekstrim. Pada perkembangan rel kereta api saat ini untuk menyambungkan rel dilakukan pengelasan pada ujung rel. Dengan dilakukan pengelasan maka pada suhu tinggi tidak ada celah untuk rel memuai yang menimbulkan gaya kompresi pada ujung sambungan. Selain itu juga terdapat beban *impact* yang terjadi karena adanya ketidaksempurnaan bentuk dari profil roda maupun rel kereta api. Besarnya dampak dari beban *impact* ini terhadap kerusakan dari roda dan rel kereta api dapat dipengaruhi oleh kecepatan kereta dan beban kereta api. Jika beban *impact* dalam kondisi suhu tinggi yang ada tidak segera mendapatkan perawatan dan tindakan akan menimbulkan kerusakan tidak hanya pada permukaan rel dan roda tapi juga komponen rel lainnya yang dapat menyebabkan kecelakaan dikemudian hari.

Perawatan jalan rel meliputi pemeriksaan kondisi jalan rel dan penyusunan program perawatan. Perawatan jalan rel dilakukan sebagai tindakan awal yang untuk memperoleh data mengenai kondisi suatu petak lintas. Kondisi geometrik jalan rel yang baik sangat diperlukan untuk keamanan dan kenyamanan perjalanan kereta api <sup>[3]</sup>. Dari segi teknis masalah utama yang terdapat pada dunia perkeretaapian adalah keausan dan kegagalan baik pada roda maupun rel. **Clayton (1995)** menyatakan bahwa keausan dan kegagalan ini sering terjadi pada lintasan belok, sambungan rel dan persimpangan. Hal ini akibat *rolling contact* antara roda dan rel. Pada rel kereta kerusakan yang terjadi pada kepala rel kereta yang mengalami kontak dengan roda kereta api. Usaha untuk mengurangi dampak keausan ini pernah dilakukan **oleh Dahlan dan Satryo S. B (2002)** dengan pemasangan *elastomer*. Kerusakan pada rel menyebabkan ketidaknyamanan penumpang, kebisingan dan yang lebih berbahaya lagi adalah keluarnya roda dari rel (*derailment*) <sup>[2]</sup>.

Kerusakan yang terjadi pada rel kereta api maupun roda serta komponen lainnya dapat terjadi karena adanya gaya dinamik yang



terjadi pada roda kereta api. Gaya dinamik dapat terjadi apabila terdapat cacat pada roda maupun rel kereta api seperti *wheel flat*, retakan pada kepala rel dan cacat-cacat lainnya<sup>[5]</sup>. Salah satu bentuk cacat pada roda kereta api yaitu adanya ketidak rataan pada permukaan roda (*out of round*) yang dapat disebabkan karena adanya prosedur pengereman yang kurang benar sehingga menyebabkan gesekan antara roda dan rel. Dengan adanya cacat ketidakrataan roda (*out of round*) dapat menyebabkan retak pada *sleeper*, kerusakan *railhead*, kegagalan pada rel akibat *rolling contact*, serta kelelahan (*fatigue*) yang menyebabkan patah pada *track weld*<sup>[6]</sup>.

Interaksi roda-rel adalah salah satu topik penelitian paling penting dalam rekayasa kereta api. Ini terkait dengan keselamatan lintasan. Kekuatan tumbukan bisa sangat besar dan dapat menyebabkan kegagalan serius pada struktur lintasan, yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan bagi pemilik lintasan melalui kerusakan pada rel dan tidur di bawahnya. Gaya dampak roda-rel terjadi karena ketidaksempurnaan pada roda atau rel seperti cacat roda, cacat rel dan perbedaan ketinggian rel yang terhubung pada sambungan yang dilas<sup>[9]</sup>. Dari penelitian yang dilakukan **Ade Irma Yunita (2008)** diketahui bahwa terdapat tiga level *wheel impact*, yang pertama yaitu “*low alarm level*” menunjukkan *impact* yang terjadi karena kerusakan roda melebihi batas *low level* yaitu 250kN, untuk “*mid level*” menunjukkan sebaiknya roda segera diperbaiki yaitu 350kN, sedangkan “*high alarm level*” sebesar 450kN menunjukkan bahwa roda sebaiknya tidak digunakan lagi<sup>[11]</sup>. Maka dapat disimpulkan jika beban *impact* yang besarnya 300-400kN dapat menyebabkan kelelahan. Namun pada penelitian yang dilakukan oleh **Mok.H dan Chiu (2000)** melakukan penelitian pada roda yang tidak terdeteksi adanya *impact* namun pada *WILD* tercatat gaya sebesar 80kN. Sedangkan dari penelitian yang dilakukan dengan variasi besar cacat pada roda berupa flat dengan ukuran 30-60 mm didapatkan besarnya tegangan yang terbaca memiliki *range* 150-530kN. Dari pertimbangan tersebut maka pada penelitian sebelumnya dilakukan

penelitian tegangan terhadap beban *impact* antara 50-450kN. Namun karena keterbatasan kemampuan dari computer untuk memproses dengan error yang kecil maka di ambil beban *impact* 10-90kN.

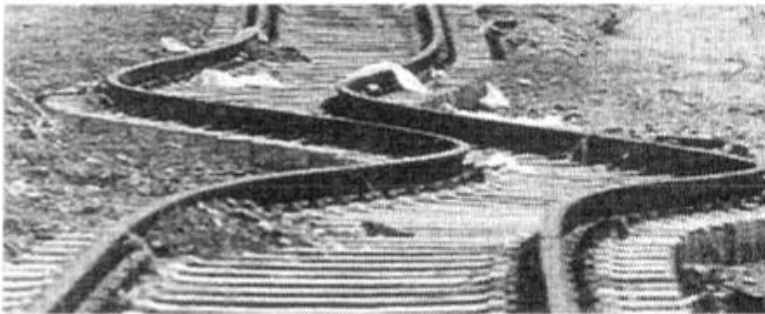
Penelitian tentang pengaruh cacat roda kereta pada rel sudah banyak dilakukan dengan pemodelan rel mendekati keadaan *real*. **Jerkins et al. (1974)** melakukan penelitian dengan memvariasikan kecepatan kereta hingga 160 km/jam, cacat yang ada dihasilkan oleh cekungan akibat sambungan pada rel. Dari hasil pengujian didapatkan hasil adanya dua gaya yang sangat besar akibat *impact*. **Frohling et al. (1997)** mendapatkan hasil dari eksperimen yang dilakukan di Afrika Selatan dengan tujuan penelitian yaitu untuk mengetahui dan memahami kemungkinan kerusakan yang disebabkan oleh gaya kontak yang berfrekuensi rendah <sup>[7]</sup>. **R.V. Dukupati dan R. Dong (1999)** melakukan pengujian menggunakan basis elemen tak hingga dengan membandingkan hasilnya dengan eksperimen. Dari hasil yang didapatkan bahwa terdapat kesamaan antara metode elemen tak hingga dengan eksperimen. Dari hasil beberapa eksperimen yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa respon dinamik dari rel dipengaruhi oleh beban kereta, kecepatan kereta, bentuk geometri, dan kekakuan rel, serta padatnya lalu lintas kereta api. Didapatkan juga hasil bahwa *impact load* yang terjadi pada rel di atas tumpuan lebih besar daripada yang terjadi di antara dua tumpuan <sup>[11]</sup>.

Selain kemungkinan kerusakan karena adanya *impact* pada roda dan rel kereta api kerusakan akibat beban *impact* yang berulang juga memberikan dampak kelelahan yang dapat merusak kereta. Dengan tingkat kepadatan lalu lintas kereta api yang berubah-ubah dapat menyebabkan beban dinamik yang dapat menyebabkan kelelahan dari rel kereta api. **R.A. Smith (2009)** melakukan tinjauan umum tentang masalah kelelahan yang memengaruhi kereta api. Dimulai dengan mempertimbangkan kelelahan pada antarmuka roda-rel, terutama efek beban dinamis pada rel, bantalan, gandar, suspensi, dan komponen lainnya <sup>[8]</sup>. Pada analisa kasus kecelakaan kereta api yang dilakukan oleh tim

KNKT 2009 karena adanya as roda lokomotif yang patah ditemukan bahwa penyebabnya yaitu pada saat pengoperasian, as mengalami penambahan tegangan dinamik dan mengakibatkan as mengalami *fatigue failure*. Tegangan dinamik ini disebabkan karena adanya beban *impact* yang terjadi antara roda-rel dengan adanya *out of round* secara berulang yang memungkinkan terjadinya *fatigue failure* pada rel. *Fatigue failure* juga dapat terjadi pada rel kereta api karena beban dari roda kereta api. Tidak adanya *early warning* menyebabkan *fatigue failure* ini tidak dapat diketahui lebih awal hingga menyebabkan kerusakan yang lebih parah <sup>[10]</sup>.

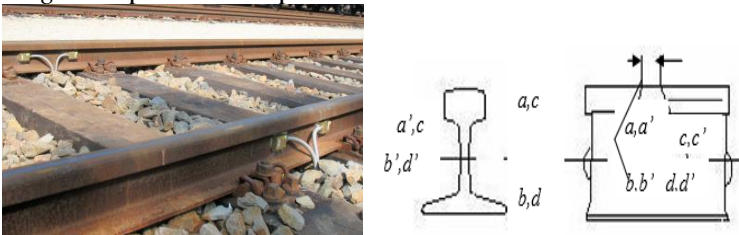
Penyebab kerusakan lain pada roda dan rel kereta api adanya perubahan suhu *extreme* yang dapat menyebabkan terjadinya *buckling* (rel yang mengalami perpindahan lateral karena adanya perubahan panjang akibat perubahan suhu). **Zayne Kristian Ole (2008)** menyatakan bahwa *buckling* merupakan salah satu hal penting bagi insinyur kereta api dalam mendesain maupun pemeliharaan. Adanya *buckling* menimbulkan tergelincirnya kereta api. **Howie (2005)** menyatakan 10% penyebab kereta tergelincir adalah karena adanya *buckling*. Pada rel kereta api memiliki suhu neutral 38°C <sup>[14]</sup>. **Minh N et al. (2012)** menyebutkan *buckling* yang disebabkan oleh suhu *extreme* menjadi masalah utama pada rel kereta api <sup>[15]</sup>. *Buckling* mungkin terjadi pada saat pukul 11.00 hingga 17.00, dimana suhu pada rel kereta api 20°C lebih besar dari suhu udara sekitar <sup>[19] & [20]</sup>. **M.A Van (1996)** melakukan penelitian *buckling* yang terjadi pada rel didapatkan hasil bahwa *buckling* pada rel mulai terjadi pada suhu maksimum 49,4°C dan suhu minimum 33,5°C. Pada suhu tinggi rel mencapai 70°C akan menyebabkan adanya tegangan tekan pada. Rel dengan suhu tinggi sangat berbahaya, dengan panjang rel 20meter dapat menyebabkan perpindahan sebesar 1meter ke arah lateral seperti pada gambar 2.1 <sup>[16]</sup>. **Andrew Kish et al. (2011)** melakukan penelitian *buckling* dan melakukan penelitian hingga *temperature* 88°C untuk mendapatkan *buckling*. Dari beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya didapatkan bahwa *buckling*

mulai terjadi pada *temperature* rel  $49,4^{\circ}\text{C}$  yang berarti *temperature* sebesar  $30^{\circ}\text{C}$ . Namun diketahui pada daerah tertentu seperti di Kuwait suhu lingkungan dapat mencapai  $60^{\circ}\text{C}$  yang berarti suhu pada rel mencapai  $80^{\circ}\text{C}$ . Untuk di Indonesia sendiri suhu maksimum lingkungan yang mungkin terjadi sebesar  $32-36^{\circ}\text{C}$  ini berarti suhu pada rel kereta api sebesar  $56^{\circ}\text{C}$ . Dari besarnya suhu yang disebutkan di atas maka diketahui besarnya suhu ekstrim yang mungkin terjadi di beberapa negara berkisar  $36-60^{\circ}\text{C}$  yang dapat menyebabkan rel mengalami ekspansi sehingga menimbulkan *buckling*. Dimana dalam hal ini suhu pada rel kereta api memiliki nilai yang lebih besar  $20^{\circ}\text{C}$  di bandingkan suhu sekitarnya. Karena tidak dilakukan variasi kenaikan *temperature*, dengan mempertimbangkan besarnya suhu ekstrim terbesar yang mungkin terjadi sebesar  $60^{\circ}\text{C}$  yang berarti suhu pada rel kereta api  $80^{\circ}\text{C}$  dan penelitian yang dilakukan oleh **Andrew Kish et al. (2011)** untuk menganalisa *buckling* hingga suhu  $88^{\circ}\text{C}$ . Maka pada penelitian ini di ambil suhu yang akan di terapkan pada rel kereta api yaitu suhu awal  $38^{\circ}\text{C}$  dan suhu akhir menyesuaikan kondisi di Indonesia sebesar  $50^{\circ}\text{C}$  dan dengan mempertimbangkan kondisi di negara lain di ambil nilai suhu ekstrim  $90^{\circ}\text{C}$  yang memiliki besar 2 kali lipat dari suhu yang mungkin terjadi pada rel di Indonesia. Sehingga hasil dari penelitian ini nantinya juga dapat menjadi referensi yang digunakan di negara lainnya dengan suhu ekstrim yang terjadi di lingkungan mencapai  $60-70^{\circ}\text{C}$  yang mengakibatkan suhu pada rel sebesar  $80-90^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 2. 1** Rel kereta api yang mengalami *buckling* <sup>[16]</sup>

*Buckling* terjadi karena adanya perubahan panjang dari rel akibat adanya kenaikan suhu. Oleh karena itu perawatan kereta sangat diperlukan. Untuk mendeteksi adanya cacat pada roda maupun rel kereta api untuk mendeteksi adanya cacat yang mengakibatkan adanya suatu *impact* dapat menggunakan *Wheel Impact Monitor* yang biasa disebut sebagai *Wheel Impact Load Detector (WILD)*. Alat ini dapat mengukur besarnya beban atau gaya pada *railhead* and dapat mencegah kerusakan komponen rel dan kereta api dengan mendeteksi dan mengganti komponen rel atau roda yang mengalami cacat sehingga mengurangi jumlah kecelakaan kereta api dan meningkatkan life time dari komponen rel kereta api. Studi yang dilakukan **Tse dan Steet (1996)** menunjukkan bahwa penghematan hingga lima juta US dollar dapat dicapai dengan penggunaan *wheel impact detection*. Ada dua metode untuk mengukur besarnya gaya pada rel yang dipasang diantara dua bantalan secara langsung sehingga dapat diketahui besarnya tegangan regangan yang terjadi. Dimana satu *strain gauge based* terdiri dari 11 *strain gauge crib* per rel seperti pada gambar 2.2. hasil pembacaan yaitu berupa perbedaan nilai peak load yang ada pada dua roda yang diset berbeda, maka *out of roughness* pada roda dapat diukur<sup>[10]</sup>.



**Gambar 2. 2 Pemasangan Strain Gauge Pada Rel Kereta Api**

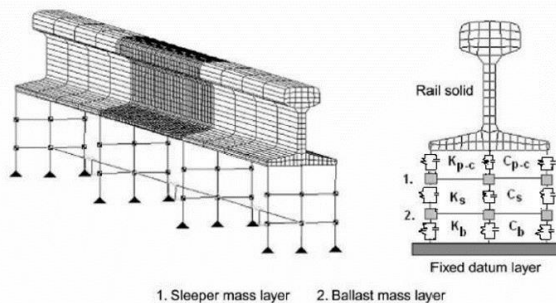
Metode *non contact* yang lain adalah memasang *accelerometer* pada rel, dimana *output* dari *accelerometer* akan dikonversi menjadi gaya. *Wheel impact detector* ini akan membaca besarnya gaya *impact* yang berupa data kemudian data tersebut dianalisa sehingga dapat diketahui distribusi besarnya beban *impact* pada rel kereta untuk menentukan tindakan *maintenance*. Walaupun *Wheel*

*Impact Load Detector (WILD) System* sudah banyak dipakai di dunia, tetapi masih terjadi perdebatan akan besarnya level alarm yang harus diset dan juga akan konsistensi pembacaan yang bervariasi terhadap kecepatan kereta. **Mok dan Chiu** mengeset besarnya *level alarm* untuk menentukan besarnya *impact* pada roda yang digunakan untuk mengukur *Vertical Split Head (VSH)* sehingga diketahui bahwa beban *impact* yang besarnya 300-400 kN bisa menyebabkan kelelahan. **Zeta-Tech (1997)** menyatakan roda sebaiknya diganti pada saat roda tersebut menyebabkan sebesar 378kN (*independent axle load*). **Newton dan Chark Albeck** mengidentifikasi roda yang Panjang cacatnya 0.25-0.44m dan kedalaman 2-4mm akan menghasilkan *impact* 400kN, di mana pendeteksian sulit dilakukan dengan menggunakan *visual inspection*. **Johanson dan Nielson (2003)** melakukan inspeksi perawatan roda menghasilkan beban *impact* sebesar 290kN pada roda dengan cacat 40-60mm. <sup>[11]</sup>

Dari penelitian **Ade Irma Yunita (2008)** diketahui untuk mensimulasikan interaksi dinamis anatara roda dan rel kereta banyak dilakukan dengan model matematik seperti dua model *layer track* yang dikembangkan oleh **Dong et al., Newton dan clark, Neilson dan Igeland**, serta tiga model *layer track* yang dipakai oleh **Zhai dan Sun**, dan empat model *layer track* dikembangkan oleh **Sun et al**. Pemilihan model *layer* tersebut didasarkan pada pertimbangan akan kemudahan pemvariasian dari besaran tiap *layer*. Dalam pemodelan tersebut tidak berarti model yang memiliki *layer* lebih banyak akan memberikan hasil yang lebih baik, tetapi tergantung dari tujuan penelitian <sup>[11]</sup>. **Ade Irma Yunita (2008)** menggunakan model dinamik tiga *layer* setelah diketahui dari penelitian **Y.Q. Sun dan M. Dhanasekar (2002)** yang mengembangkan model dinamik empat *layer* untuk mengetahui interaksi vertical antara kereta dan rel ternyata memiliki hasil yang sama dengan dua model *layer* milik **Dot.et al (1994), Newton dan Clark (1979)**, dan **Fermer dan Nielson (1995)** dan tiga model *layer* dari **Zhai (1996)** <sup>[11]</sup>. Namun dari beberapa penelitian tersebut belum di ketahui besarnya nilai jika

menggunakan satu *layer* apakah memiliki nilai yang sama dengan model *layer* 2-4.

Maka penelitian ini menggunakan pemodelan satu dan tiga *layer track* model yang mempresentasikan rel kereta. Dengan pertimbangan dimana saat menggunakan satu *layer* proses simulasi tidak memerlukan waktu yang lama seperti pada tiga *layer*. Dengan mempertimbangkan beban yang akan diberikan. Mengingat keterbatasan dari perangkat yang digunakan. Diketahui kekakuan dan redaman pada *rail pad*, *clip*, *sleeper*, dan *ballast* ditunjukkan dengan pegas dan redaman yang *linier*. Seperti pada gambar dibawah ini:



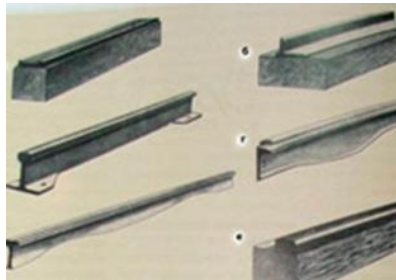
**Gambar 2. 3 Pemodelan Rel Kereta Api Tiga *Layer*** <sup>[11]</sup>

Penelitian tentang *impact load* terhadap *rail* sebelumnya sudah banyak dilakukan. **Ade Irma Yunita (2008)** melakukan penelitian untuk menganalisa tegangan dinamik akibat beban *impact* pada rel kereta api, namun belum memasukkan adanya pengaruh perubahan suhu pada penelitian tersebut. Maka diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai hubungan antara beban *impact* dengan respon rel dengan suhu rel mengalami kenaikan dari suhu awal sebesar 50°C dan 90°C yang mengalami perubahan beban *impact* antara 10-90kN untuk model tiga *layer* dan 50-450kN untuk model satu *layer* untuk mengetahui pembacaan besarnya tegangan. Sehingga diketahui tegangan maksimum rel kereta api untuk mencegah adanya kerusakan yang lebih buruk akibat rel yang menerima beban ketika terjadi kenaikan suhu.

## b. Dasar Teori

### i. Rel Kereta Api

Kereta pertama kali ditemukan menggunakan tenaga kuda. Namun dengan berkembangnya pengetahuan di temukan teknologi kereta dengan rel yang terbuat dari balok kayu yang dianggap dapat membawa beban 4 kali lebih besar dari pada jalan biasa. Penyebutan rel pertama dari pertengahan abad XVI disebut dengan palang kayu. Namun, rel yang terbuat dari bahan kayu tersebut mudah rusak. Untuk mengurangi memakai bantalan kayu, maka rel diperkuat dengan besi atau jeruji besi. Dalam pengoperasian rel ditemukan bahwa permukaan rel menjadi tersumbat dan memiliki *rolling resistance* yang lebih besar. Alasan ini, rupanya, menyebabkan munculnya rel cembung dengan bentuk *elips*, dikenakan pertama kali oleh seorang insinyur pertambangan PK Frolov. Roda yang meluncur sesuai dengan bentuk kepala rel.

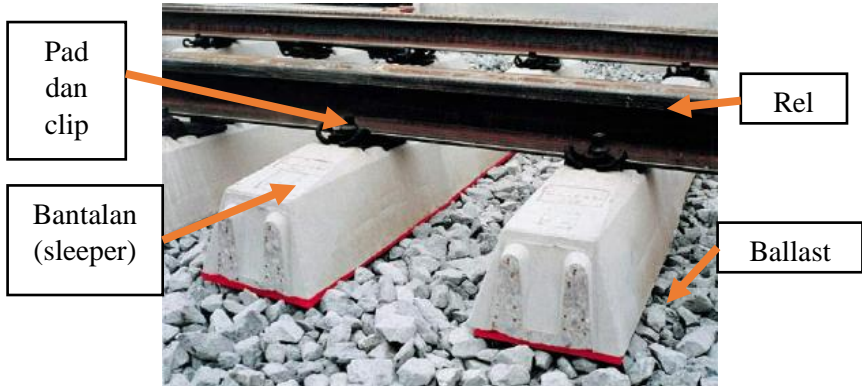


**Gambar 2. 4 Perkembangan Profil Rel Kereta Api**

Dengan munculnya mesin uap, maka beban roda dan kecepatan semakin besar (sudah di lokomotif pertama) mencapai 50 km / jam atau lebih. Mengingat muatan dinamis tinggi dari roda *rolling stock* dan kebutuhan untuk bekerja dalam menekuk di semua perwujudan rel sampai batas tertentu maka profil dari rel kereta api mulai mendekati bentuk balok-I seperti pada gambar 2.4. Saat pertama kali ditemukan rel biasanya terbuat dari besi cor. Kemudian ditemukan bahwa penggunaan bahan baku rel baja lebih sedikit dan lebih merata dari pada besi cor. Saat ini, penggunaan di



seluruh dunia yaitu rel baja, yang logam (kecuali karbon) mengandung silikon, mangan, dan zat tambahan lainnya yang meningkatkan kualitasnya.



**Gambar 2. 5 Bagian-bagian Rel Kereta Api**

Dalam rel kereta api terdapat beberapa bagian yang mendukung kerja dari rel kereta api seperti:

**a. *Ballast***

Pada tahun 1913, panjang jaringan kereta api adalah 71,700 km dengan penempatan yang tidak rata. Bagian utama dari jaringan (83%) berada di bagian Eropa. Sebagian besar menggunakan rel jenis ringan (1 m) 30 kg. Diputuskan untuk memperkuat struktur track, termasuk mulai memperkenalkan *ballast ballast*. *Ballast* merupakan material yang biasanya berupa *crushed stone*, *gravel*, dan material lainnya yang memenuhi syarat untuk diletakkan di sekeliling atau dibawah rel kereta api. Adapun kegunaan dari *ballast* ini yaitu untuk meneruskan beban dari bantalan menuju area yang lebih luas yaitu tubuh jalan (*subgrade*), menahan atau mengikat *track* sebaik-baiknya, meningkatkan elastisitas dari *track*, memelihara *track alignment*, menahan gerakan-gerakan *longitudinal*, *lateral*, *dynamic*, dan *vibrating load* dari *moving train*. Bahan *ballast* yang baik biasanya yaitu batu pecah (*crushed stone*)

### **b. Bantalan (*Sleeper*)**

Bantalan beton bertulang banyak digunakan di Eropa dan Asia, terutama sejak 1950 bantalan beton memiliki *life time* sekitar 50 - 60 tahun. Bantalan diletakkan dibawah rel kereta api secara melintang ataupun memanjang. Bantalan rel berfungsi untuk memberikan daya dukungan pada rel dan untuk menambatkan rel, menjaga stabilitas *permanent way*, menahan beberapa gaya lateral, menahan beban dari rel menuju permukaan ballast, menyerap getaran dan beban *impact*. Maka dapat disimpulkan fungsi dari bantalan yaitu sebagai *elastic medium* antara *rail* dan *ballast*. Saat ini bantalan yang sering digunakan yaitu terbuat dari beton, namun masih ada beberapa yang menggunakan bantalan dari kayu. Keuntungan menggunakan bantalan dari beton yaitu stabilitas rel menjadi lebih baik, usia penggunaan lebih lama, pemeliharaan rendah, dan komponennya lebih sedikit.

### **c. Penambat (*Pad*)**

Penambat rel atau *pad* digunakan untuk menambatkan rel pada bantalan agar letak dari rel tidak bergeser. Untuk mengurangi pengaruh getaran pada rel maka digunakan penambat yang memiliki sifat elastis. Penambat yang memiliki sifat elastis dapat meredam getaran dan memiliki gaya jepit (*clamping force*) yang baik sehingga dapat memberikan perlawanan rangkak (*creep resistane*) yang baik.

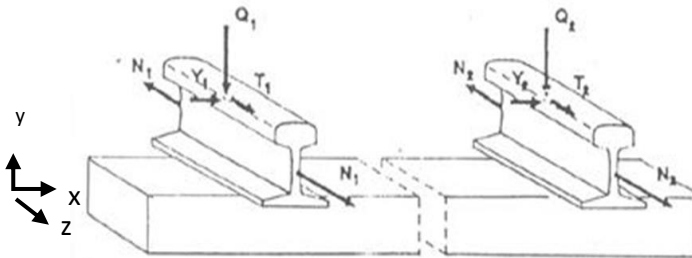
### **d. *Subgrade***

Merupakan tanah asli yang dipersiapkan untuk menerima beban *ballast*, *sleeper*, dan rel untuk struktur jalan rel. Permukaan *subgrade* disebut *formation* yang berupa timbunan tanah yang dinaikkan atau konstruksi tanah lainnya yang di atas tanah asli (*embankment*), tanah yang digali dibawah tanah asli (*cutting*), dan permukaan yang dipersiapkan untuk menerima *ballast (level)* untuk analisa gaya dinamis yang disebabkan oleh beban *impact*.

## **ii. Gaya Pada Rel Kereta Api**

Pada saat kereta berjalan dalam keadaan lurus maupun berbelok maka diperlukan optimalisasi dari rel untuk mendapatkan kestabilan dari kereta. Kestabilan dari kereta api dapat didaparka

dengan mengantisipasi gaya-gaya yang mungkin terjadi dan mempengaruhi kestabilan dari kereta. Seperti pada gambar 2.6 terdapat tiga gaya yang terjadi pada rel kereta api akibat pembebanan yaitu gaya longitudinal, gaya vertical, dan gaya lateral.



**Gambar 2. 6 Gaya Pada Rel**

- **Gaya Longitudinal**

Pada gambar 2.6 gaya longitudinal ditunjukkan dengan lambing  $N_1$  dan  $N_2$ . Gaya *longitudinal* diakibatkan oleh perubahan suhu pada rel (*thermal stress*). Gaya longitudinal ini diperhitungkan dalam analisis pembebanan pada rel. Gaya *longitudinal* juga merupakan gaya adhesi (akibat gesekan roda dan kepala rel) dan gaya pengereman. Sehingga mempengaruhi panjang rel dan dapat menyebabkan tegangan pada sambungan rel.

- **Gaya Lateral**

Gaya *lateral* yaitu gaya *sentrifugal* dapat terjadi ketika kereta api sedang berbelok yang dapat menyebabkan tercabutnya penambat rel dan anjoknya kereta api (*derailment*). Dalam gambar 2.6 gaya *lateral* ditunjukkan dengan lambang  $Y_1$  dan  $Y_2$ .

- **Gaya Vertical**

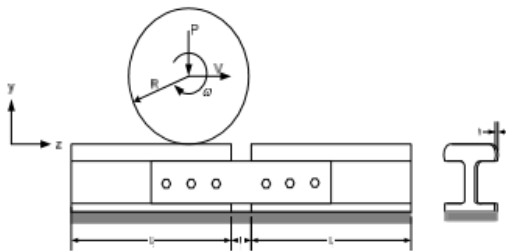
Beban atau gaya *vertical* yang diterima oleh rel berasal dari beban gandar dan roda pada lokomotif dan gerbong. Pada

gambar 2.6 gaya *vertical* ditunjukkan oleh lambang Q1 dan Q2.

### iii. Pemodelan *Impact Load* Pada Rel Kereta Api

Adanya beban *impact* yang terjadi pada roda maupun rel kereta api berdasarkan penelitian-penelitian yang sebelumnya besarnya beban *impact* yang terjadi dipengaruhi oleh cacat pada roda, beban kereta, kecepatan kereta, adanya cacat pada rel kereta api, dan adanya sambungan rel kereta api. Beban *impact* yang terjadi secara terus-menerus dapat menyebabkan kerusakan pada rel kereta api.

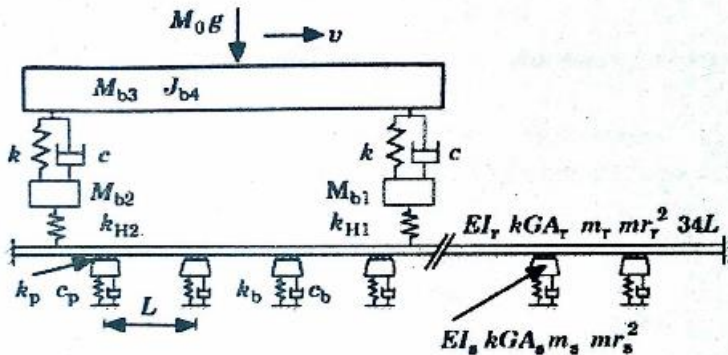
**I Made P et al. (2008)** melakukan analisa terhadap distribusi tegangan kontak pada roda akibat beban *impact* ketika roda melewati sambungan rel dengan adanya pergeseran rel ke arah lateral. Besarnya beban ini bisa 1.1 sampai 3 kali beban statis bahkan 5 kali di beberapa tempat. Pada penelitian ini akan diamati tegangan dan regangan akibat beban *impact* ketika roda melewati sambungan rel yang memiliki tonjolan kearah lateral. Dengan menggunakan pendekatan numerik fenomena ini akan dimodelkan dan dibuatkan simulasi untuk mengamati pengaruh beban poros, kecepatan kereta, perbedaan tonjolan arah lateral terhadap tegangan dan regangan pada roda dengan bantuan *software finite element* <sup>[12]</sup>.



**Gambar 2. 7 Model Dinamik oleh I Made P et al. (2008)** <sup>[12]</sup>

Rel yang digunakan dalam pemodelan adalah type rel UIC 54 dengan inklinasi 1:40 sedangkan roda adalah type ORES 1002 dengan radius nominal  $R = 457.1$  mm. Analisis dinamik dilakukan dengan menggunakan software Ansys LS-Dyna. Hasil numerik memperlihatkan kecepatan kereta memberikan pengaruh yang paling besar dan lebih sensitive terhadap tegangan dengan kecenderungan sebesar 1.8525, sedangkan berat poros memberikan pengaruh yang paling besar terhadap regangan pada roda dengan kecenderungan sebesar  $7e-6$  [12].

Sedangkan Nielsen dan Igeland (1994) melakukan pengujian tentang interaksi dinamik antara kereta dan rel akibat cacat roda dan rel yang tidak baik. Adanya cacat pada permukaan roda dan rel akan menyebabkan adanya beban *impact* yang dapat menyebabkan kerusakan. Dalam penelitiannya Nielsen dan Igeland menggunakan pemodelan rel seperti pada gambar 2.18 untuk mempermudah penelitian [13].

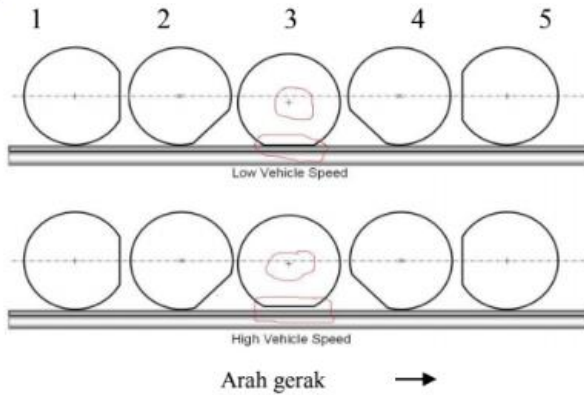


Gambar 2. 8 Pemodelan Rel oleh Nielsen dan Igeland (1994) [11]

Dari hasil dari penelitian didapatkan hasil interaksi dinamik antara *impact load* yang terjadi pada rel dengan kecepatan kereta dan besarnya cacat pada roda. Dapat disimpulkan dari penelitian tersebut jika *impact load* yang terjadi semakin besar seiring dengan bertambahnya kecepatan kereta dan semakin

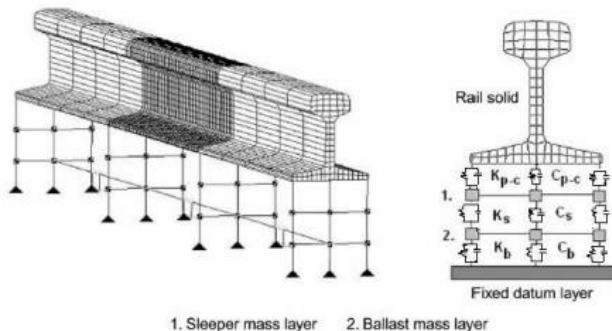
besarnya cacat pada roda kereta api namun hubungan antara keduanya tidak linier <sup>[11]</sup>.

Dari penelitian yang dilakukan oleh **Ade Irma Yunita (2008)**, diketahui bahwa **Johansson dan Nielsen (2003)** melakukan penelitian dengan menggunakan metode numerik dan dibandingkan dengan **Sannahed (1997)** didapatkan bahwa semakin besar *impact load* yang terjadi akibat semakin besarnya beban kereta, tetapi hubungan yang didapatkan tidak linier. Hal ini dapat disebabkan karena hubungan antara *impact force* dan *track response* terdapat perbedaan perilaku tumbukan antara roda dan rel untuk kecepatan rendah dan tinggi seperti pada gambar 2.9 dibawah. Dari gambar tersebut terdapat lima buah roda yang memiliki cacat bergerak dalam kecepatan rendah dan tinggi. *Impact* terjadi pada roda ketiga yang menunjukkan adanya tumbukan sesaat oleh roda ditunjukkan dengan letak titik pusat putaran dari roda tidak tepat berada pada sumbu putar roda. Titik pusat putaran berada dibawah sumbu putar roda. Pada saat kecepatan roda rendah tumbukan antara roda dan rel menghasilkan *impact* yang rendah, karena *impact* yang terjadi hanya dikarenakan oleh *inertia* dari roda ketika roda berputar, sedangkan pada saat kecepatan tinggi *impact* yang terjadi sangat besar, karena pada saat kecepatan tinggi roda kereta akan lepas kontak sesaat, dan kemudian jatuh menumbuk rel dengan kecepatan tinggi dan durasi yang singkat menyebabkan besarnya *impact* lebih besar dari pada kecepatan rendah <sup>[11]</sup>.



**Gambar 2. 9 Pergerakan roda dengan cacat pada kecepatan tinggi dan rendah <sup>[11]</sup>**

Pada penelitian yang dilakukan oleh **Ade Irma Yunita (2008)** pemodelan rel kereta api menggunakan tiga *layer track*. Dengan menggambarkan redaman dan pegas dari *clip and pad*, *sleeper*, dan *ballast* dalam *node node* yang kemudian di masukkan nilai dari redaman dan pegas tersebut. Pemodelan tiga *layer* yang digunakan seperti pada gambar 2.10 berikut.



**Gambar 2. 10 Pemodelan tiga *layer* <sup>[11]</sup>**

Dari penelitian yang dilakukan didapatkan besarnya tegangan yang terbaca oleh *strain gauge* pada rel kereta api akibat beban *impact* dengan mengatur letak *node* yang diamati berada posisi *strain gauge* dipasang yaitu diantara dua bantalan.

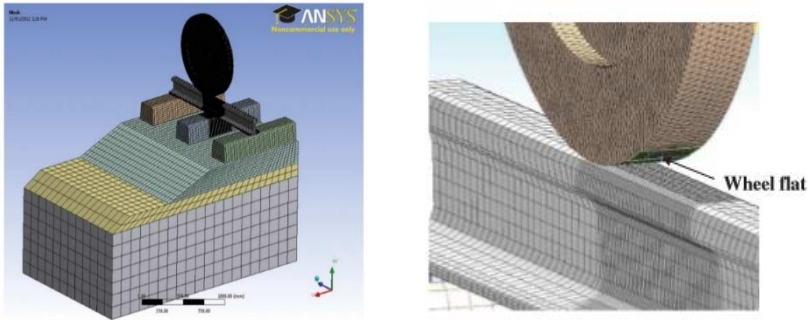
**Bian et al. (2013)** menyatakan bahwa interaksi dari roda dan rel kereta api menjadi salah satu topik penelitian yang sangat penting. Penelitian ini mencakup respon dari *track* terhadap beban *impact*, *track vibration* dan *track safety*. **Bian et al. (2013)** melakukan penelitian mengenai pengaruh dari *impact* akibat roda kereta api yang *flat* terhadap rel. dalam penelitiannya Bian et al. menggunakan parameter sebagai berikut:

Basic parameters	
Wheel	Radius: 457.5 mm;nd thickness: 72 mm
Sleeper	Top width: 220 mm; bottom width: 250 mm; height: 208 mm and length: 2200 mm
Rail pad	Length: 180 mm, width: 150 mm and thickness: 7.5 mm
Ballast	Top length: 1356 mm;nd depth: 250 mm
Sub-ballast	Top length: 2596.2 mm;nd depth: 150 mm
Formation	Depth: 1000 mm

**Gambar 2. 11 Basic parameters** <sup>[23]</sup>

Dari parameter tersebut lalu dilakukan pemodelan *impact* dengan variasi flat pada roda sebesar 30 mm, 40 mm, 50 mm, dan 60 mm. Dengan variasi flat tersebut Bian et al. melakukan simulasi pada ansys dengan pemodelan seperti pada gambar 2.12





**Gambar 2. 12 Model Simulasi oleh Bian et al. [23]**

Dari hasil simulasi yang dilakukan didapatkan kesimpulan analisis bahwa adanya flat pada roda menyebabkan beban *impact* yang signifikan. Dengan semakin besarnya flat pada roda maka beban *impact* yang terjadi akan semakin besar namun memiliki hubungan yang tidak linier. [23]

Pada simulasi dinamis untuk mengetahui besarnya tegangan yang terjadi pada rel kereta api dengan model oleh Bian et al. membutuhkan perangkat lunak dengan spesifikasi yang tinggi untuk menyelesaikan simulasi dan juga waktu proses running yang lama. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan dengan pemodelan yang lebih sederhana dengan menggunakan model rel kereta api oleh Ade Irma Yunita dengan dilakukan penyederhanaan pada susunan spring untuk menggambarkan adanya *pad* dan klip, *sleeper*, dan *ballast*. Pemodelan ini dipilih untuk meminimalkan waktu proses yang dibutuhkan namun hasil yang di dapatkan tetap akurat.

#### **iv. Konsep Buckling**

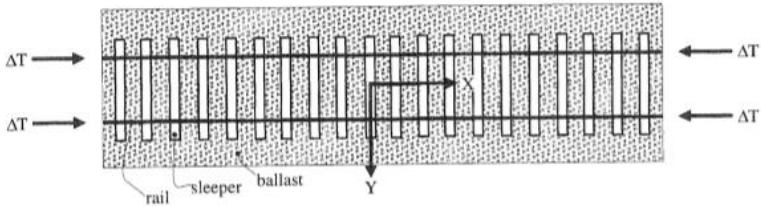
*Buckling Stress* (tegangan tekuk) adalah ketidakstabilan dari rel kereta api yang dapat menyebabkan kegagalan. Adanya tegangan tekuk disebabkan oleh perubahan suhu yang ekstrim dan juga beban yang diterima oleh rel kereta api. Ini terjadi karena struktur dari rel tidak dapat mempertahankan bentuk aslinya karena adanya tegangan kompresi dan beban yang diterima. Sehingga

terbentuk suatu lendutan yang dapat menyebabkan rel bergeser atau mengalami defleksi ke arah lateral <sup>[22]</sup>. **The Civil Engineering Track Standards (QR 2005)** mendefinisikan bukling sebagai terjadinya *misalignment track* yang disebabkan oleh suhu dan / atau *creep rail stres* yang diinduksi, maka diperlukan pembatasan kecepatan dan / atau perhatian langsung oleh Pemelihara Infrastruktur untuk memungkinkan melatih untuk melanjutkan dengan aman <sup>[14]</sup>.



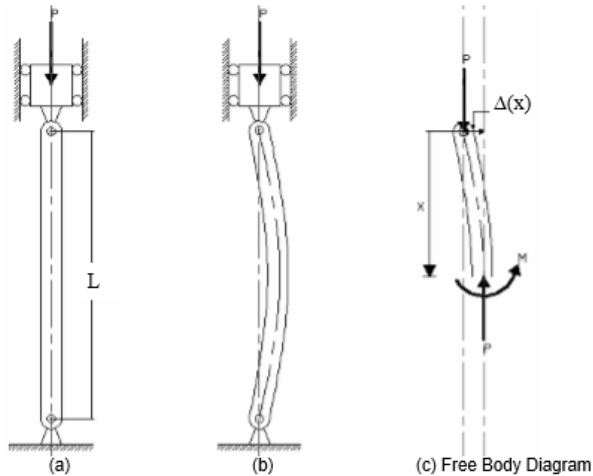
**Gambar 2. 13 Contoh Track yang Mengalami Buckling** <sup>[14]</sup>

**M.A Van (1996)** menyatakan bahwa *buckling* sebagian besar terjadi ke arah horizontal meskipun juga terdapat kemungkinan terjadi ke arah vetikal. Tekuk disebabkan oleh beban termal ( $L_t$ ) dan atau pemuatan mekanis yang menghasilkan gaya tekan tinggi seperti pada gambar 2.13. Suhu, pemuatan mekanis, dan misalignment menyebabkan adanya gaya ke arah lateral ( $Y$ ). Gaya lateral ini dapat di tahan oleh resistensi lateral dari bantalan yang bergerak di dalam ballast <sup>[16]</sup>.



**Gambar 2. 14 Tampak Atas Rel** <sup>[16]</sup>

Leonhard Euler, seorang ahli matematika dan fisika Swiss, diakui secara universal sebagai pencetus formula tekuk kritis. Euler menerima hipotesis bahwa kelengkungan pada setiap titik di rel sebanding dengan momen lentur pada titik itu di rel.



**Gambar 2. 15 Buckling dari sebuah ideal column** <sup>[16]</sup>

Rumus tekuk kritis Euler untuk kolom yang ideal adalah sebagai berikut <sup>[16]</sup> & <sup>[22]</sup>:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \quad (2.1)$$

Dimana:

- $P_{crit}$  : beban kritis *buckling* (kN).  
 $E$  : modulus elastisitas dari column material (MPa).  
 $I$  : *momen inertia* ( $m^4$ ).  
 $L$  : Panjang *column* (m)  
 $K$  : koefisien  $k$  adalah faktor panjang efektif tergantung pada jenis kendala pada ujung rel.

Nilai  $k$  tergantung pada jenis kendala atau tumpuan pada kedua ujungnya. Jika kedua ujung mendapat tumpuan *fix* maka  $k=0.5$ , sedangkan jika tumpuan pada kedua ujungnya *pin* maka nilai  $k=1.0$ , dan untuk salah satu ujung mendapat tumpuan *fix* dan salah satu ujung tanpa tumpuan nilai  $k=2.0$  <sup>[15] & [22]</sup>. *Buckling* tidak hanya diamati dalam kolom saja, setiap beban kompresi yang menekan suatu material biasanya akan mengalami *buckling* pada sumbu minornya sebelum mengalami kegagalan akibat gaya tekan tersebut <sup>[16]</sup>. Untuk mengetahui besarnya perubahan Panjang dari rel kereta api, Ole (2008) mencantumkan rumus sebagai berikut <sup>[14]</sup> :

$$\Delta l = \alpha \Delta T l_0 \quad (2.2)$$

Dimana:

- $\Delta l$  : perubahan panjang  
 $\alpha$  : *coefficient of thermal expansion* untuk rel *steel*.  
 $\Delta T$  : perubahan *temperature*.  
 $L_0$  : Panjang awal rel

Perubahan *temperature* terjadi dari *temperature* neutral menuju *temperature* ekstrim. *Temperature* neutral merupakan suhu rel dimana gaya thermal yang diinduksi kepada rel adalah nol atau merupakan suhu awal rel yang normal tanpa adanya gaya induksi termal dari luar <sup>[23]</sup>. Suhu neutral rel kereta api yaitu  $38^{\circ}\text{C}$  sedangkan suhu ekstrim dari rel kereta api dapat mencapai  $50^{\circ}\text{C}$  dan  $90^{\circ}\text{C}$  seperti yang sudah di jelaskan pada sub bab 2.1.

#### v. Diskripsi Tegangan Pada Suatu Titik

Pada umumnya, gaya yang bekerja pada suatu luasan tertentu mempunyai besar dan arah. Komponen gaya yang tegak lurus terhadap luasan disebut sebagai tegangan normal sedangkan gaya-gaya yang bekerja sejajar dengan bidang luasan disebut sebagai tegangan geser. Dalam bidang teknik sering terjadi suatu permasalahan yang mengharuskan para perancang memperhatikan dan memperhitungkan adanya tegangan-tegangan (stress) dan kekuatan (strength).

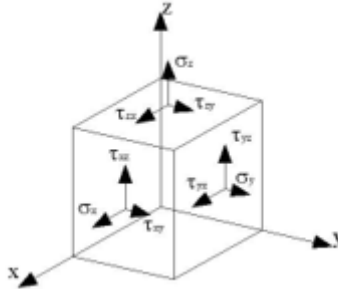
Secara general hal ini dimulai dengan:

1. Memperhatikan beban-beban luar yang bekerja pada suatu struktur
2. Menentukan lokasi kritis dari struktur tersebut
3. Menghitung besar beban yang bekerja pada daerah kritis tersebut.

Untuk menjelaskan kondisi tegangan pada suatu kontinum maka akan ditinjau suatu titik pada kontinum tersebut. Kondisi tegangan pada suatu bidang dengan orientasi tertentu yang melalui titik tersebut. Tegangan tidak hanya mempunyai besar dan arah seperti vektor tetapi juga tergantung pada orientasi dari bidang dimana tegangan tersebut bekerja. Titik yang kita tinjau pada kontinum bila diperbesar akan terlihat sebagai kubus dengan dimensi  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , (seperti terlihat pada Gambar 2.16) dengan mengambil suatu sistem sumbu referensi orthogonal

(cartesian)  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Disana akan terlihat 9 komponen tegangan yang bekerja pada kubus tersebut, yaitu:



**Gambar 2. 16 Kondisi tegangan secara tiga dimensi pada suatu titik <sup>[11]</sup>**

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  disebut sebagai tegangan normal yaitu tegangan-regangan yang bekerja tegak lurus bidang. Dengan menggunakan dua indeks akan lebih jelas karena indeks pertama menyatakan bidang kerja gaya dan indeks yang ke dua menyatakan arah kerja gaya. Tegangan normal bertanda positif bila merupakan tegangan tarik dan bertanda negatif bila berupa tegangan kompresi.

$\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{zy}$ , disebut sebagai tegangan geser yaitu tegangan-regangan yang bekerja berimpit dengan bidang. Arti kedua indeks sama dengan yang diatas. Tegangan ini bertanda positif bila mempunyai kecenderungan memutar elemen kubus searah jarum jam (cw) dan sebaliknya bertanda negatif bila mempunyai kecenderungan memutar elemen kubus berlawanan dengan arah jarum jam (ccw).

Tegangan-regangan pada suatu titik bila dituliskan dalam bentuk matriks:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Sembilan komponen tegangan tersebut dapat disederhanakan menjadi hanya enam komponen tegangan karena:  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ . Sehingga komponen tegangan yang bekerja pada suatu titik secara tiga dimensi akan terdiri dari  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ .

#### vi. Konsep Tegangan

Masalah utama dalam proses pendesainan suatu system konstruksi adalah penyelidikan tentang tahanan dalam atau gaya-gaya dalam suatu benda untuk menahan gaya luar yang bekerja pada sistem tersebut. Baik beban statis maupun beban dinamis akan mengakibatkan tegangan pada sebuah elemen dari struktur. Keterkaitan antara beban luar dan tegangan dapat dijabarkan atau ditinjau secara analitik maupun eksperimental. Tegangan didefinisikan sebagai perbandingan gaya yang bekerja pada bidang per-satuan luas penampang dari bidang kerja. Secara matematis tegangan normal dapat dituliskan sebagai:

$$\sigma = F / A \quad (2.4)$$

Dimana:

$\sigma$  = Tegangan (N/m<sup>2</sup>)

F = Gaya Luar (N)

A = Luasan tempat bidang bekerja (m<sup>2</sup>)

Karena resultan gaya dapat diuraikan ke arah normal dan tangensial, maka demikian juga halnya dengan tegangan. Tegangan kearah normal disebut tegangan normal, sedangkan tegangan kearah tangensial disebut tegangan geser.

Halaman ini sengaja dikosongkan



## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Prosedur penelitian**

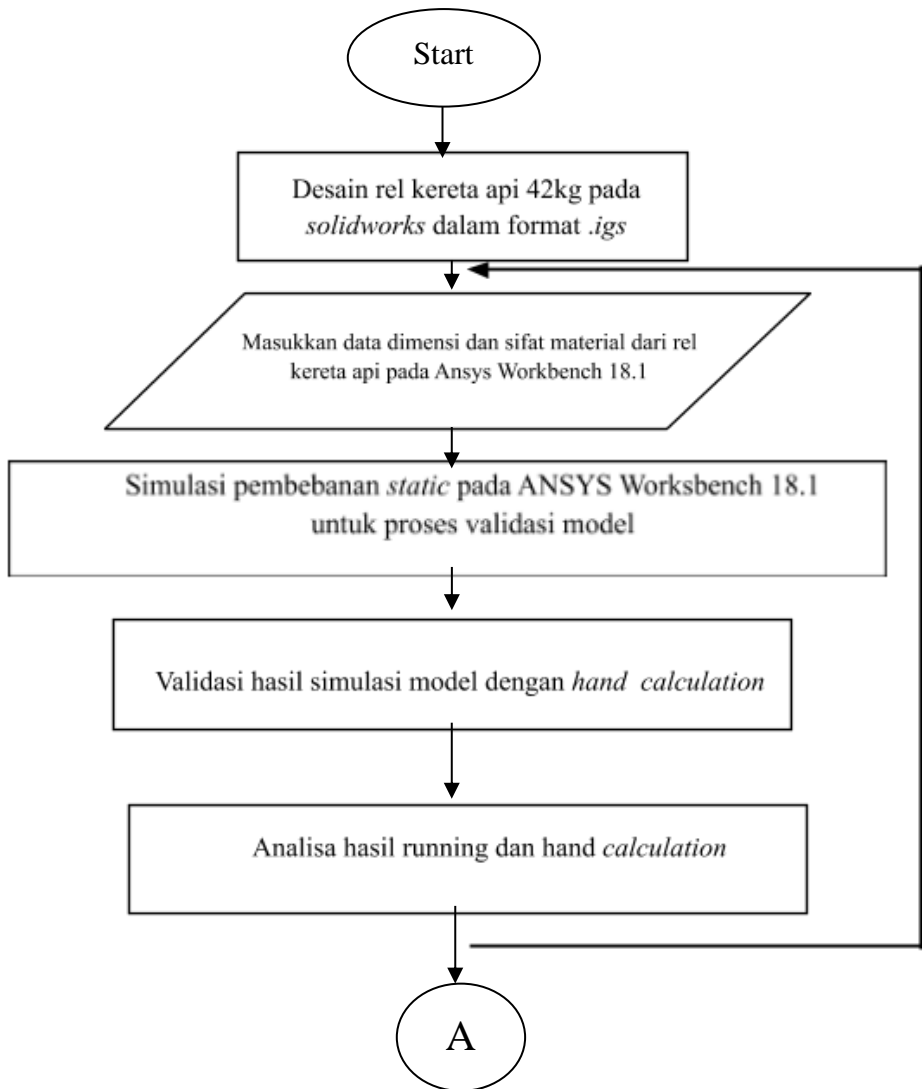
Penelitian dilakukan dengan pemodelan menggunakan Ansys Workbench 18.1. Adapun prosedur penelitian dalam Tugas Akhir ini adalah:

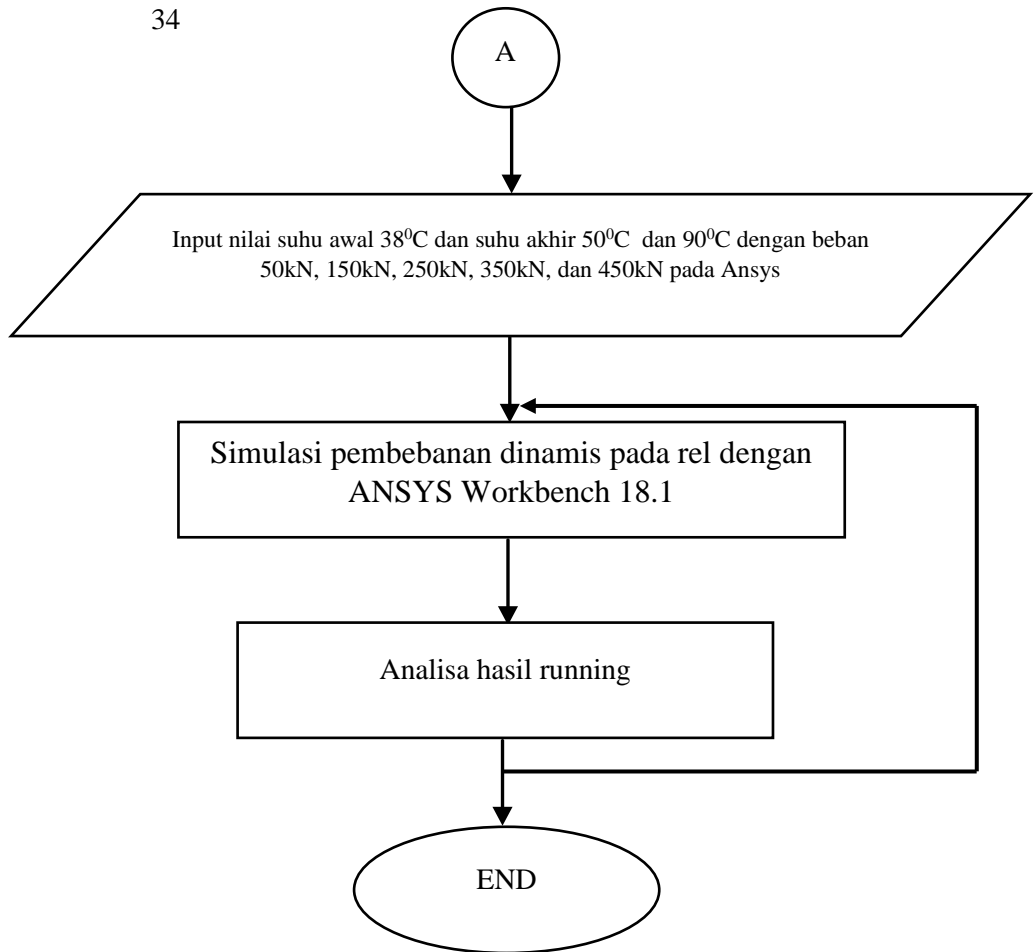
1. Study literatur pengujian *impact* pada rel kereta api. Study literatur dilakukan dengan menyimpulkan beberapa jurnal tentang penelitian terdahulu, dari kesimpulan tersebut diperoleh beberapa cara pengujian *impact* dan pemodelan pengujian rel kereta api yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini.
2. Mencari spesifikasi rel kereta api yang akan dianalisa dan data-data teknis untuk pemodelan rel kereta api. Spesifikasi rel kereta api dan data-data teknis disesuaikan dengan kondisi mendekati sebenarnya di Indonesia sehingga hasil yang diperoleh dalam penelitian akurat. Namun suhu yang digunakan tidak sesuai dengan suhu maksimum yang mungkin terjadi di Indonesia
3. Pemodelan rel kereta api dilakukan dengan menggunakan software ANSYS Workbench 18.1 dengan spesifikasi dan data-data teknis yang telah diperoleh.
4. Dilakukan validasi statis terhadap model rel kereta api sebagai berikut:
  - Validasi pertama dilakukan dengan membandingkan nilai defleksi pada simulasi Ansys dengan nilai yang didapatkan pada perhitungan matematis akibat beban 100kN yang diberikan tepat pada tengah model rel kereta api
  - Validasi kedua dilakukan dengan membandingkan nilai ekspansi pada simulasi Ansys dengan nilai yang didapatkan pada perhitungan matematis model rel

kereta api akibat kenaikan suhu dengan suhu awal  $38^{\circ}\text{C}$  dan suhu akhir  $90^{\circ}\text{C}$ .

- Validasi ketiga dilakukan dengan membandingkan nilai defleksi dari eksperimen yang dilakukan oleh **Youshuo Song, Zhonghua Yu (2013)** dengan hasil simulasi dari software untuk melihat kecocokan dari hasil simulasi dengan hasil eksperimen
5. Melakukan simulasi analisa beban *impact* pada rel kereta api. Simulasi menghasilkan nilai tegangan yang terbaca pada lokasi pemasangan *strain gauge* sebagai akibat dari beban *impact* yang dihasilkan oleh rel kereta api yang mengalami beban *impact* dengan adanya pengaruh kenaikan suhu yang di aplikasikan pada rel kereta api.
  6. Menganalisa hasil running rel kereta api
  7. Menarik kesimpulan dari hasil Analisa

### 3.2 Flow Chart Metode Penelitian

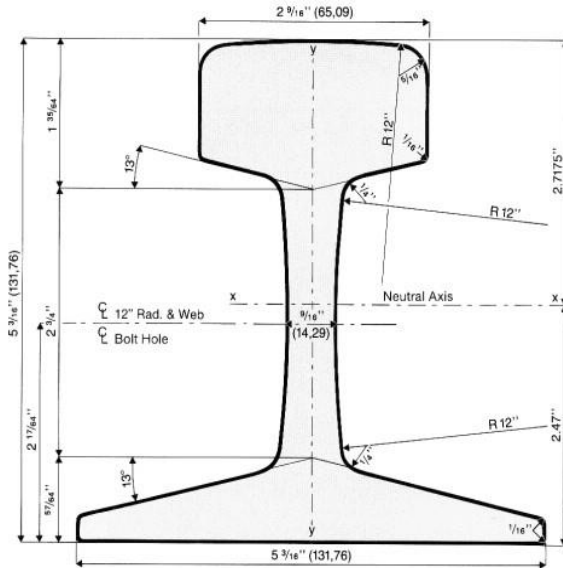




**Gambar 3. 1 Flow Chat**

### 3.3 Data yang Diperlukan dalam Tugas Akhir

#### 3.3.1 Geometri Rel Kereta Api 42 kg



**Gambar 3. 2 Geometri Rel Kereta Api Tipe 42 kg** <sup>[11]</sup>

Pada penelitian ini menggunakan tipe rel kereta api yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh **Ade Irma Yunita (2008)** yaitu tipe rel kereta 42 kg yang termasuk dalam Australian Standard 1085.1-2000. Dalam penelitiannya diketahui bahwa pemodelan dengan rel tipe 42 kg mendekati dengan keadaan *real*. Rel ini termasuk kelas lima dalam tata urutan pembagian kelas jalan rel di Indonesia. Rel ini mampu dilewati kereta dengan kecepatan maksimum 80 km/jam. Pembagian kelas jalan rel bisa dilihat pada lembar lampiran A.

### 3.3.2 Karakteristik Struktur Rel Kereta Api dan Karakteristik

#### A. Karakteristik struktur rel kereta api <sup>[11]</sup> & <sup>[21]</sup>

- **Pad**

K pad dan clip	=	420 MNm-1
C pad dan clip	=	50 kNsm-1

- **Sleeper**

K Sleeper	=	99 MNm-1
C Sleeper	=	130 kNsm-1
Densitas beton ( <i>sleeper</i> )	=	2403 kgm <sup>-3</sup>
Modulus Young beton	=	24 GPa
Poisson Rasio	=	0.3

- **Ballast**

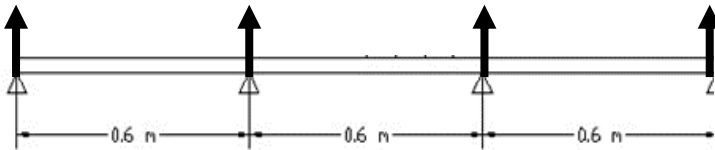
K ballast	=	30 MNm-1
C ballast	=	40 kNsm-1
Densitas kerikil (ballast)	=	1602 kgm <sup>-3</sup>
Modulus Young <i>ballast</i>	=	13 GPa
Poisson Rasio	=	0.3

#### B. Karakteristik rel kereta api 42 kg

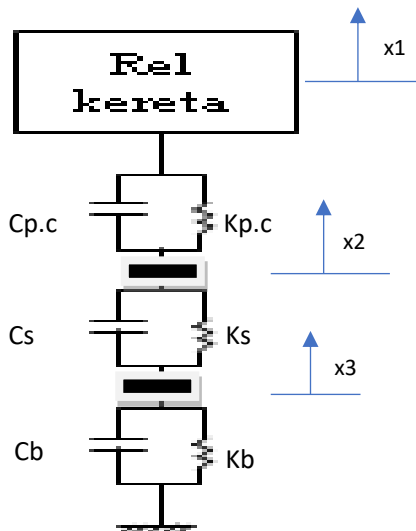
Momen Inersia	=	0.00002 m <sup>4</sup>
Total Face Area	=	1046066.55 mm <sup>2</sup>
Densitas Rel	=	8000 kgm-3
Modulus Young rel	=	207 Gpa
Poisson Rasio	=	0.3
Jarak antar bantalan	=	0.6 m
Tensile strength ultimate	=	1655 Mpa
Tensile strength yield	=	296-1940 Mpa
Tensile Yield Strength Minimal	=	350 Mpa
Compression yield strength	=	1650-1800 Mpa

### 3.4 Posisi Pembebanan *Impact*

Penelitian ini dilakukan pada rel kereta api pada jarak 3 kali antar bantalan dengan posisi beban *impact* berada pada tengah rel. Panjang jarak antar bantalan adalah 0.6 m sehingga panjang keseluruhan rel yang dianalisa adalah 1,8 m. Berikut adalah gambar posisi pembebanan *impact*:



Gambar 3. 3 Skema Pembebanan <sup>[11]</sup>



Gambar 3. 4 Free Body Diagram

Dari gambar 3.4 merupakan gambar free body diagram untuk pemodelan rel kereta api dengan adanya komponen di bawah rel berupa pad clip, bantalan beton, dan kerikil. Gambar 3.4 merupakan FBD dari salah satu tumpuan dari ke empat tumpuan

yang tersusun seri. Dengan acuan massa rel yang sama maka untuk menemukan persamaan gerak dapat menggunakan salah satu rangkaian seri tumpuan. Karena pada setiap rangkaian pad clip, bantalan, dan kerikil memiliki nilai  $k, c$ , dan massa yang sama. Dari gambar 3.4 didapatkan persamaan gerak sebagai berikut untuk setiap rangkaian seri tumpuan rel.

$$\bullet \quad m_{rel} \cdot \ddot{x} + c_{p.c}(-\dot{x}_1 + \dot{x}_2) + k_{p.c}(-x_1 + x_2) - F = 0 \quad (3.1)$$

$$\bullet \quad m_s \cdot \ddot{x}_2 + c_{p.c}(-\dot{x}_1 + \dot{x}_2) + k_{p.c}(-x_1 + x_2) + k_s(x_2 - x_3) + c_s(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = 0 \quad (3.2)$$

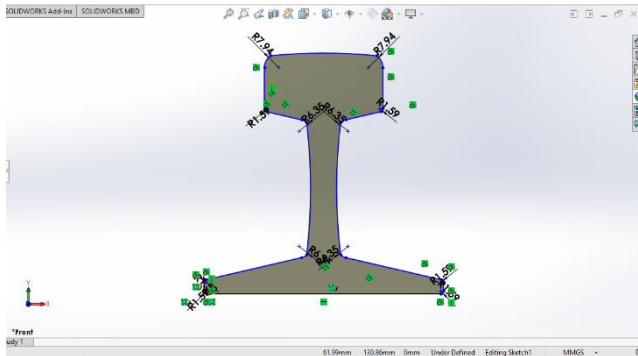
$$\bullet \quad m_b \cdot \ddot{x}_3 + c_s(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_s(x_3 - x_2) + k_b x_3 + c_b \dot{x}_3 = 0 \quad (3.3)$$

Dari persamaan 3.1 hingga 3.3 diketahui bahwa parameter yang memberikan pengaruh terhadap nilai yang nantinya dicari dalam susunan *support* rel kereta api yaitu massa *support*, nilai kekakuan, nilai redaman, dan perpindahan pusat massa. Dari hal tersebut menjadi pertimbangan untuk melakukan mengubah pemodelan bantalan beton dan kerikil dimana di pemodelan yang digunakan Ade Irma Yunita berupa *node* diubah menjadi geometri dengan geometri sederhana yang memiliki dimensi yang lebih kecil. Dengan mengubah nilai densitas untuk mendapatkan besarnya nilai massa sesungguhnya. Sebagaimana diketahui dari persamaan 3.1 bahwa nilai massa menjadi salah satu parameter yang dapat mempengaruhi hasil. Berikutnya untuk mendapatkan nilai  $k$  dan  $c$  dalam simulasi dibuat dengan membuat koneksi antara geometri berupa *spring* yang memiliki Panjang 300mm. Penentuan Panjang *spring* ini tidak akan mempengaruhi nilai yang dihasilkan nantinya, sebagaimana diketahui pada persamaan 3.1 nilai yang akan mempengaruhi hasil yang dicari yaitu perubahan Panjang *spring* ketika dikenai gaya. Maka dapat disimpulkan dari persamaan yang didapatkan dari gambar 3.4 menjadi dasar bagi peneliti untuk melakukan pemodelan *support* rel kereta api.



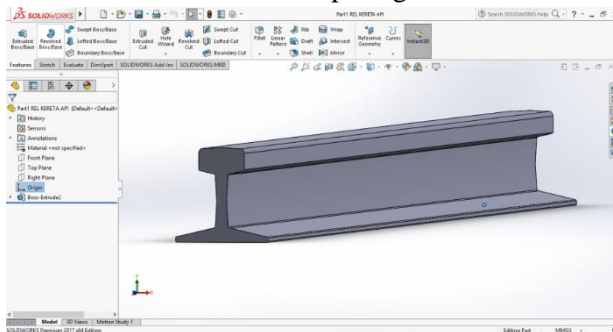
### 3.4.1 Prosedur Penggambaran Model Menggunakan Solidworks 2017

Pertama buka Solidworks lalu klik *New* dan pilih *Part* untuk membuat satu part rel kereta api. *Setting Unit* dalam *inch* lalu buat geometri dari rel kereta api sesuai dengan gambar 3.2. Maka akan didapatkan desain geometri rel tampak depan gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Sketsa Rel

- Setelah sketsa dari rel kereta api dibuat, lalu buat 3D dari desain dengan menggunakan menu *Extrude* lalu akan muncul hasil 3D dari rel seperti gambar 3.6 berikut:



Gambar 3. 6 Desain 3D Rel Kereta Api

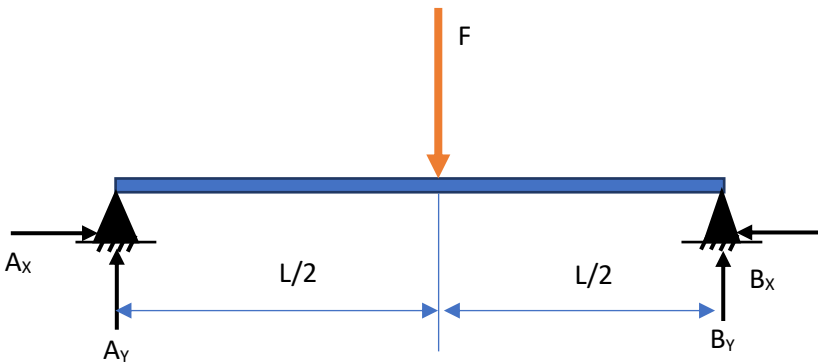
Simpan file dengan *format* \*.igs agar dapat di impor ke dalam ANSYS Workbench 18.1 untuk melakukan simulasi.

### 3.5 Validasi Model

Validasi merupakan bagian penting dari suatu penelitian untuk mendapatkan hasil yang akurat. Validasi diperlukan untuk menguji suatu model yang digunakan dalam penelitian apakah sudah benar atau sesuai dengan kondisi sebenarnya. Dalam validasi di penelitian ini dilakukan dengan membandingkan nilai yang didapatkan dari *hand calculation* dengan hasil simulasi pada ANSYS Workbench 18.1.

#### 3.5.1 Prosedur Validasi Pertama Rel Kereta Api

Validasi yang pertama yaitu dengan melakukan pembebanan statis dengan menggunakan ANSYS Workbench 18.1 terhadap rel kereta api. Validasi pertama ini bertujuan untuk melihat kemampuan dari rel untuk terdefleksi apakah sudah sesuai dengan teori. Pembebanan dilakukan dengan memberikan tumpuan sederhana di kedua ujung rel kereta api berupa tumpuan *pin* di kedua ujungnya yang kemudian rel kereta api diberikan beban sebesar 100kN. Besarnya beban yang diberikan tepat berada di tengah dari rel kereta api.



Gambar 3. 7 Skema Pembebanan

Dari gambar skema 3.7 dapat dilakukan perhitungan untuk menemukan persamaan besarnya momen seperti berikut:

- Gaya-gaya pada sumbu X

$$\sum F_x = 0$$

$$A_x - B_x = 0$$

$$A_x = B_x$$

- Gaya pada sumbu Y

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y + B_y = F$$

- Momen pada titik A

$$(ccw) \sum M_A = 0$$

$$B_y \cdot x - F \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$B_y = F \cdot \frac{x \cdot 1}{2 \cdot x}$$

$$B_y = \frac{F}{2}$$

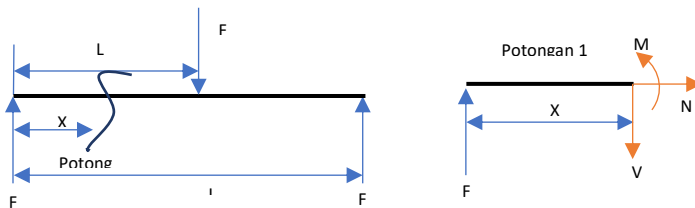
- Maka

$$A_y + B_y = F$$

$$A_y = F - \frac{F}{2}$$

$$A_y = \frac{F}{2}$$

Setelah diketahui besarnya nilai  $A_y$  dan  $B_y$  langkah selanjutnya gambarkan kembali free body diagram yang baru untuk menggambarkan diagram momen :



**Gambar 3.8 Free body diagram potongan**

Dari free body diagram potongan pada gambar 3.8 dapat ditemukan gaya-gaya yang bekerja dan juga momen sebagai berikut:

- Gaya-gaya pada sumbu X

$$\sum_{N_1=0} F_x = 0$$

- Gaya pada sumbu Y

$$\sum F_y = 0$$

$$\frac{F}{2} - V_1 = 0$$

$$\frac{F}{2} = V_1$$

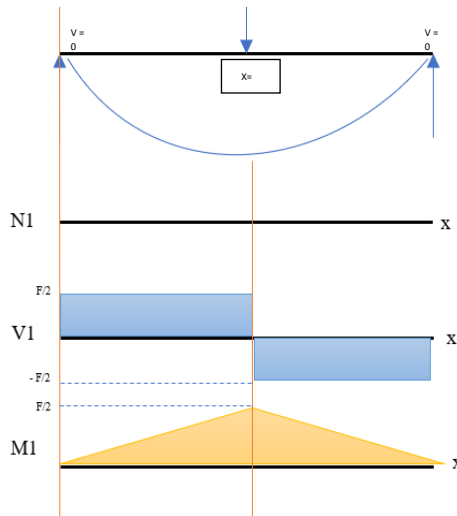
- Momen pada titik A

$$(cw) \sum M_1 = 0$$

$$\frac{F}{2} \cdot x - M_1 = 0$$

$$M_1 = \frac{F}{2} \cdot x_1$$

Dari persamaan rumus di atas maka diagram gaya normal, gaya vertikal dan momen dapat digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 3. 9 Diagram Gaya Normal, Gaya Vertikal, dan Momen**

Karena beban  $F$  berada tepat di tengah batang rel kereta api maka bentuk diagram dari ruas kanan dari  $x=0$  hingga  $x=l/2$  sama dengan ruas kiri dari  $x=l/2$  hingga  $x=l$  (simetri). Karena bentuk dari diagram gaya simetri maka untuk mendapatkan persamaan defleksi maksimum dapat dilakukan satu kali saja pada ruas kanan. Persamaan defleksi dapat ditemukan dengan menggunakan metode double integral sebagai berikut:

Dari gambar 3.8 didapatkan boundary condition yaitu  $\theta = dv/dx = 0$  pada  $x=l/2$  dan  $v=0$  pada  $x=0$ , dengan boundary condition tersebut dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan berikut: Untuk  $0 \leq x_1 \leq l/2$ :

$$EI v \frac{d^2 v}{dx^2} = M(x)$$

$$EI v \frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{F}{2} \cdot x_1$$

$$EI v \frac{dv}{dx} = \frac{F}{4} \cdot x^2 + C_1$$

$$EI v = \frac{F}{12} \cdot x^3 + C_1 x + C_2$$

Mencari nilai C1 dan C2:

Untuk  $\theta = dv/dx = 0$  pada  $x=L/2$ :

$$EI v \frac{dv}{dx} = \frac{F}{4} \cdot x^2 + C_1$$

$$0 = \frac{F}{4} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 + C_1$$

$$C_1 = -\frac{FL^2}{16}$$

Untuk  $v = 0$  pada  $x=0$ :

$$EI v = \frac{F}{12} \cdot x^3 + C_1 x + C_2$$

$$0 = \frac{F}{12} \cdot 0 + C_1 \cdot 0 + C_2$$

$$0 = C_2$$

Setelah didapatkan besarnya nilai C1 dan C2 lalu disubstitusikan ke dalam persamaan awal untuk mencari besarnya defleksi maksimum yang berada pada  $x = L/2$  sebagai berikut:

$$EI v = \frac{F}{12} \cdot x^3 + C_1 x + C_2$$

$$EI v = \frac{F}{12} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^3 - \frac{FL^2}{16} \cdot L + 0$$

$$EI v = \frac{FL^3}{96} - \frac{FL^3}{32}$$

$$EI v = \frac{FL^3}{96} - \frac{3FL^3}{96}$$

$$EI v = -\frac{2FL^3}{96}$$

$$EI v = -\frac{FL^3}{48}$$

Dengan demikian defleksi dari beam (rel kereta api) dengan tumpuan pin pada kedua ujungnya dapat diperhitungkan dengan menggunakan persamaan:

$$\Delta = -\frac{PL^3}{48EI}$$

Dimana  $\Delta$  merupakan besarnya defleksi yang terjadi pada beam, P tegangan terpusat, L Panjang beam, E modulus young, dan I modulus inersia dari rel kereta api. Tanda negative pada persamaan defleksi menunjukkan defleksi yang terjadi kearah negative(kebawah). Besarnya nilai dari masing-masing besaran pada persamaan defleksi dapat dilihat pada sub bab 3.1. Maka dapat dilakukan perhitungan seperti di bawah ini:

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$\Delta = \frac{100000 \text{ N} \cdot (1.8 \text{ m})^3}{48 \cdot \left(270 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \cdot 0.00002 \text{ m}^4}$$

$$\Delta = 2.25 \text{ mm}$$

Selanjutnya dilakukan simulasi pembebanan statik pada *ansys workbench* 18.1 dengan menentukan besarnya ukuran *meshing* dengan mempertimbangkan waktu proses, *quality element*, dan *error* maka didapatkan besarnya ukuran elemen 6 mm. *Range* nilai *element* di ambil dengan mempertimbangkan dimensi terkecil dari model yaitu 6-10 mm pada bagian bawah rel (tepi *flat bottom*). Besarnya *meshing* bisa didapatkan dengan melakukan uji konvergensi dengan mencari besarnya nilai error yang kurang dari lima dan dipilih error yang mendekati nol (paling kecil). Besarnya error didapatkan dengan mengkonfigurasi nilai tegangan yang terbaca pada *node*. *Node* yang dianalisa pada simulasi statik ini memiliki lokasi sumbu x 72.9 mm, sumbu y 57.5 mm dan sumbu z 900 mm Berikut tabel konvergensi untuk mencari besarnya ukuran *meshing* untuk validasi pertama :

**Tabel 3. 1 Uji konvergensi validasi pertama****a. Dengan Sweep method**

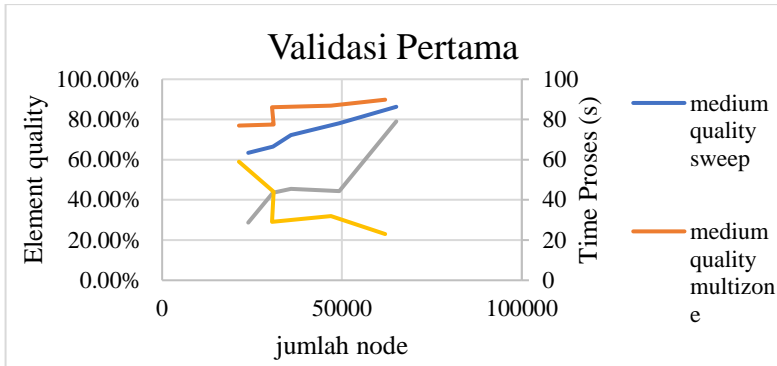
Size Mesh (mm)	Mesh Resolution	Jumlah Node	Jumlah Elemen	Tegangan Pada Node (Mpa)	Element Quality	Error	Waktu Proses (Detik)
10	Medium	121452	23940	29.2	63.40%	0.00%	28.7
9	Medium	152958	30800	29.15	66.50%	0.17%	43.5
8	Medium	177878	35775	29.01	72.30%	0.48%	45.4
7	Medium	238554	49278	29.1	78.10%	-0.31%	44.3
6	Medium	314870	65100	29.2	86.30%	-0.34%	79.03

**b. Dengan Multi zone method**

Size Mesh (mm)	Mesh Resolution	Jumlah Node	Jumlah Elemen	Tegangan Pada Node (Mpa)	Element Quality	Error	Waktu Proses (Detik)
10	Medium	108494	21358	29.13	76.97%	0.00%	59
9	Medium	151301	30954	29.19	77.44%	0.21%	44
8	Medium	154858	30510	29.2	86.01%	0.03%	29
7	Medium	230015	46956	29.25	86.82%	0.17%	32
6	Medium	301735	62006	29.21	89.84%	0.14%	23

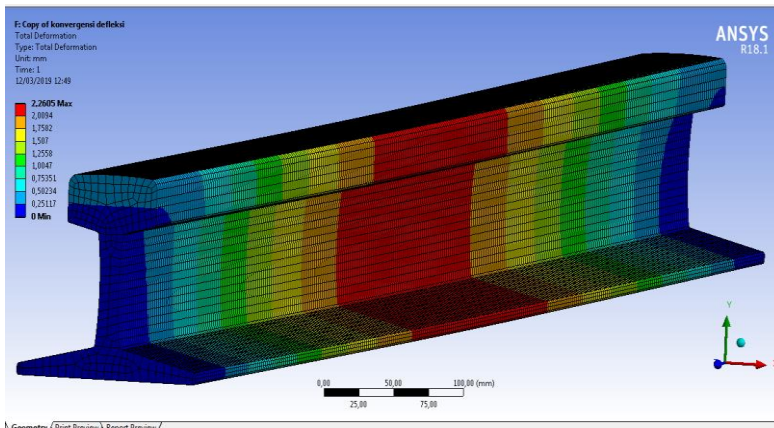
Dari uji konvergensi dengan menggunakan metode *sweep* dan *multizone* di ketahui bahwa dengan metode *multizone* size mesh yang sama memiliki element quality yang lebih baik. Sehingga didapatkan besarnya ukuran meshing untuk validasi pertama ini 6 mm. Pada saat size meshing sebesar 6mm didapatkan besarnya *element quality* sebesar 89.84%.





**Gambar 3. 10 Grafik Konfigurasi Validasi Pertama**

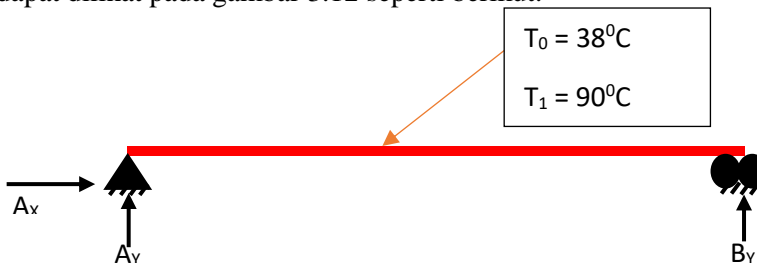
Dengan dilakukan simulasi pada model didapatkan nilai defleksi dari yaitu 2.2605 mm seperti pada gambar 3.11. Adanya perbedaan dari hasil validasi tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain pengaruh tegangan geser yang tidak diperhitungkan dalam metode matematis namun diperhitungkan dalam metode *finite element*. Perbedaan hasil dari perhitungan dan model ANSYS memiliki nilai error sebesar 0.46% tidak menunjukkan besar yang signifikan maka model layak untuk digunakan.



**Gambar 3. 11 Validasi Pertama Defleksi pada Ansys Workbench 18.1**

### 3.5.2 Validasi Kedua

Pada validasi kedua rel kereta api diberikan pengaruh suhu awal sebesar  $38^{\circ}\text{C}$  dan suhu akhir  $90^{\circ}\text{C}$  pada ANSYS Workbench 18.1. Ini bertujuan untuk melihat kemampuan dari rel untuk memuai atau bertambah Panjang ketika ada perubahan suhu. Rel tidak mendapatkan pembebanan karena pada kondisi ini bertujuan untuk melihat perubahan panjang dari rel kereta api akibat perubahan suhu. Rel diberikan tumpuan sederhana di kedua ujung rel kereta api berupa tumpuan *pin*. Skema simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 3.12 seperti berikut.



**Gambar 3. 12 Skema Validasi Kedua**

Dalam metode matematis dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.3 pada bab dua. Dari persamaan tersebut dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$\Delta l = \alpha \Delta T l_0$$

$$\Delta l = 0.0000104 \cdot (90 - 38)^{\circ}C \cdot 1800 \text{ mm}$$

$$\Delta l = 0,973 \text{ mm}$$

Selanjutnya dilakukan simulasi pembebanan statik pada *ansys workbench* 18.1 dengan menentukan besarnya ukuran *meshing* dengan mempertimbangkan waktu proses, *quality element*, dan *error* maka didapatkan besarnya ukuran elemen 6 mm. *Range* nilai *element* di ambil dengan mempertimbangkan dimensi terkecil dari model yaitu 6-10 mm pada bagian bawah rel (tepi *flat bottom*). Besarnya *meshing* bisa didapatkan dengan melakukan uji konvergensi dengan mencari besarnya nilai *error* yang kurang dari lima dan dipilih *error* yang mendekati nol (paling kecil). Besarnya *error* didapatkan dengan mengkonfigurasi nilai tegangan yang terbaca pada *node*. *Node* yang dianalisa pada simulasi statik ini memiliki lokasi sumbu x 72.9 mm, sumbu y 57.5 mm dan sumbu z 900 mm. Berikut tabel konvergensi untuk mencari besarnya ukuran *meshing* untuk validasi kedua :

**Tabel 3. 2 Uji konvergensi untuk validasi kedua**

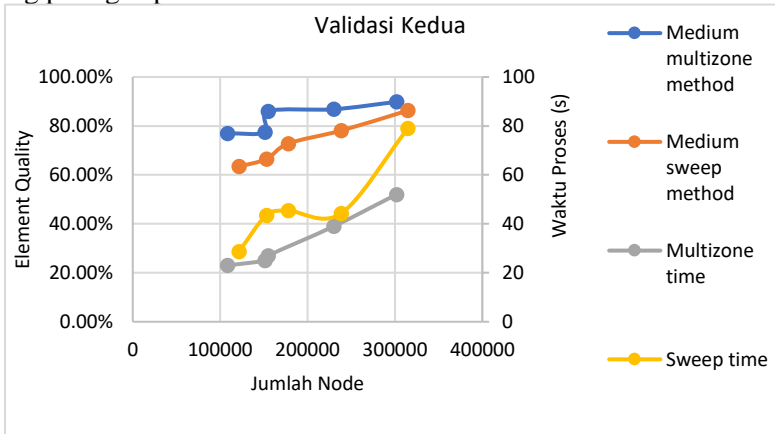
### c. Dengan *Sweep method*

Size Mesh (mm)	Mesh Resolution	Jumlah Node	Jumlah Elemen	Tegangan Pada Node (Mpa)	Element Quality	Error	Waktu Proses (Detik)
10	Medium	121452	23940	63.23	63.40%	0.00%	28.7
9	Medium	152958	30800	63.03	66.50%	0.32%	43.5
8	Medium	177878	35775	62.85	72.80%	0.29%	45.4
7	Medium	238554	49278	62.61	78.10%	-0.38%	44.3
6	Medium	314870	65100	62.36	86.30%	-0.40%	79.03

#### d. Dengan *Multi zone method*

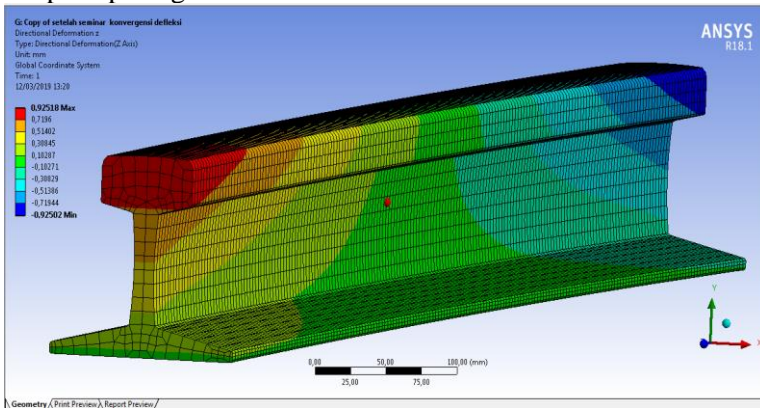
Size Mesh (mm)	Mesh Resolution	Jumlah Node	Jumlah Elemen	Tegangan Pada Node (Mpa)	Element Quality	Error	Waktu Proses (Detik)
10	Medium	108494	21358	82.379	76.97%	0.00%	23
9	Medium	151301	30954	82.24	77.44%	0.16%	25
8	Medium	154858	30510	82.2	86.01%	0.05%	27
7	Medium	230015	46956	81.79	86.82%	0.50%	39
6	Medium	301735	62006	81.54	89.84%	0.31%	52

Dari uji konvergensi dengan menggunakan metode *sweep* dan *multizone* di ketahui bahwa dengan metode *multizone* size mesh yang sama memiliki element quality yang lebih baik. Sehingga didapatkan besarnya ukuran *meshing* untuk validasi pertama ini 10 mm. Pada saat *size meshing* sebesar 10 mm didapatkan besarnya *element quality* sebesar 76.97%. *Size meshing* 10 mm dipilih karena memiliki hasil yang mendekati dengan hasil pada *hand calculation*. Selain itu nilai kualitas elemen yang didapatkan di atas 50% yaitu sebesar 76.97% dan waktu proses yang paling cepat 23 detik.



**Gambar 3. 13 Grafik Konfigurasi Validasi Kedua**

Maka didapatkan besarnya perubahan panjang dari persamaan 2.3 sebesar 0.973 mm. sedangkan dengan metode *finite element* didapatkan besarnya *directional deflection* ke arah sumbu Z seperti pada gambar 3.14 sebesar 0.92518 mm.



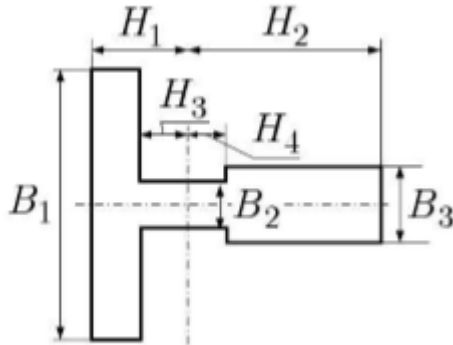
**Gambar 3. 14 Gambar Validasi Tahap Kedua**

Adanya perbedaan dari hasil validasi tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain pengaruh tegangan geser yang tidak diperhitungkan dalam metode matematis namun diperhitungkan dalam metode *finite element*. Perbedaan hasil dari perhitungan dan model ANSYS tidak menunjukkan besar yang signifikan maka model layak untuk digunakan.

### 3.5.3 Validasi Ketiga

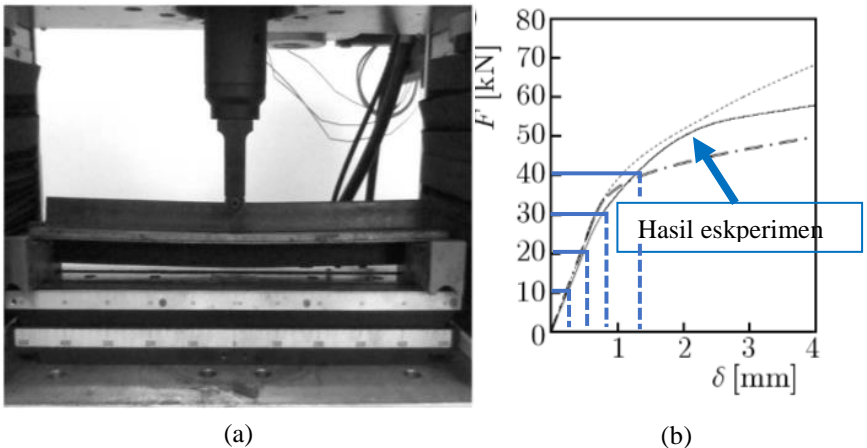
Pada validasi ketiga dilakukan validasi dinamis untuk melengkapi dari validasi pertama dan kedua yang merupakan validasi statis. Dari validasi ini dilakukan untuk melihat bahwa hasil simulasi yang dilakukan dalam Ansys Workbench Explicit Dynamic memiliki nilai yang mendekati kondisi sesungguhnya. Untuk memverifikasi model defleksi beban, **Youshuo Song, Zhonghua Yu (2013)** melakukan percobaan pada mesin uji universal dan mesin pelurus hidrolik buatan sendiri. Disini dilakukan validasi terhadap hasil eksperimen yang dilakukan oleh

**Youshuo Song, Zhonghua Yu (2013)** dengan desain rel kereta api seperti pada gambar berikut:



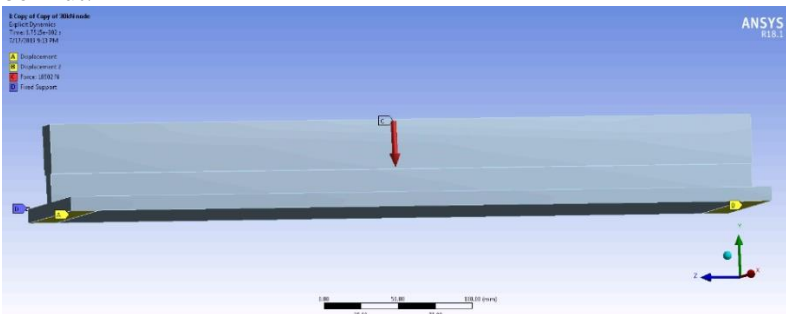
**Gambar 3. 15 Geometri Rel Untuk Eksperimen** <sup>[25]</sup>

Dengan tipe rel T / 89 untuk pengujian dan bahan untuk rel adalah baja karbon rendah Q235 dengan parameter nilai  $E = 206000\text{MPa}$ ,  $\sigma_s = 235\text{MPa}$ ;  $K = 200000\text{MPa}$ ,  $n = 1,02$ ,  $\lambda = 0,0173$ . Dan bagian rel pada gambar 3.15 memiliki dimensi  $H_1 = 20.9\text{mm}$ ,  $H_2 = 41.1\text{mm}$ ,  $H_3 = 11.3\text{mm}$ ,  $H_4 = 7.7\text{mm}$ ,  $B_1 = 89\text{mm}$ ,  $B_2 = 10\text{mm}$ ,  $B_3 = 15.88\text{mm}$ . Dari desain rel tersebut dilakukan eksperimen dan didapatkan hasil defleksi sebagai berikut:



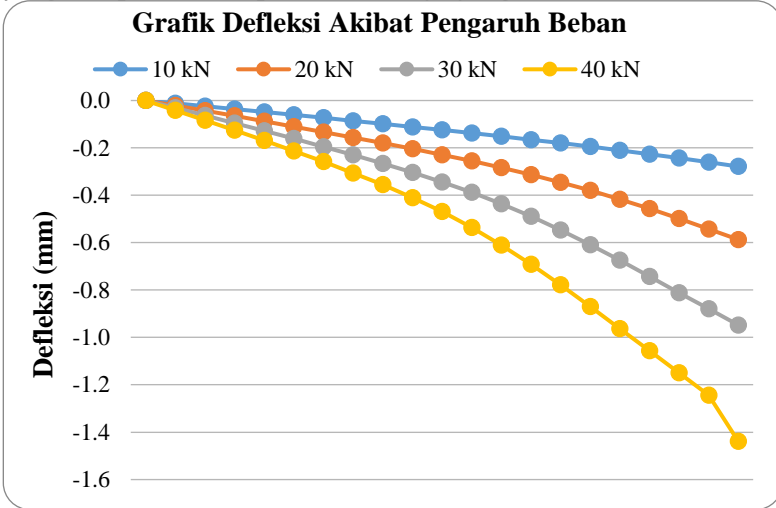
**Gambar 3. 16 (a) Pengaturan eksperimental pada mesin uji universal ( $2l = 500\text{mm}$ ) (b) Hasil eksperimen [25]**

Dari gambar 3.16 menunjukkan eksperimental *set-up* pada mesin uji universal AG-1 diperkenalkan dari Shima dzu Corporation. Rel adalah saat-bebas didukung di kedua ujungnya. Dan jarak antara akhir mendukung adalah 500mm, yaitu  $2l = 500\text{mm}$ . Dari eksperimen tersebut dilakukan pemodelan pada Ansys workbench explicit dynamic seperti pada gambar 3.17 berikut:



**Gambar 3. 17 Pemodelan pada Ansys Workbench Explicit Dynamic**

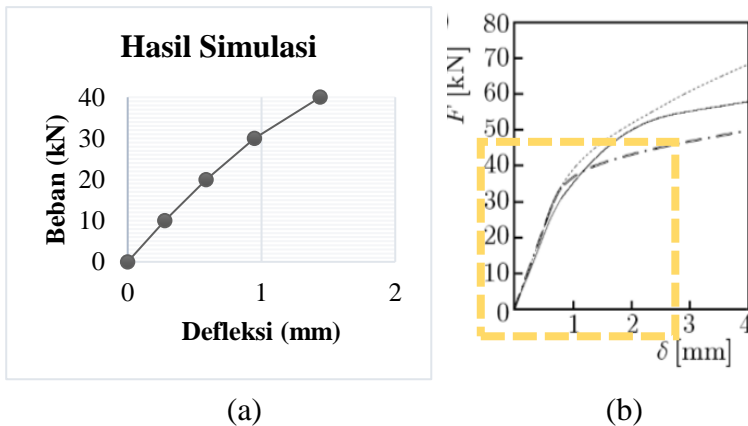
Dari pemodelan tersebut dilakukan pembeban dynamic dengan beban tekan 10-40kN dan didapatkan hasil yang mendekati dengan hasil yang didapatkan dari eksperimen yang dilakukan oleh **Youshuo Song, Zhonghua Yu (2013)**. Berikut merupakan hasil yang didapatkan dari percobaan ansys yang dilakukan :



**Gambar 3. 18 Hasil Simulasi defleksi akibat beban pada  
*Ansys Workbench***

Dari gambar tersebut menggambarkan defleksi yang terjadi ke arah sumbu y *negative*. Dengan membandingkan hasil yang didapatkan dari eksperimen pada gambar 3.16 dengan simulasi pada gambar 3.18 maka dapat disimpulkan bahwa hasil yang didapatkan pada ansys dapat dipergunakan sebagai validasi dari eksperimen. Untuk melihat perbandingan dari hasil eksperimen dengan simulasi dapat dilihat pada gambar 3.19. karena pada jurnal eksperimen yang didapatkan tidak ada data tabel maka hasil dari eksperimen dan simulasi tidak dapat dibuat dalam satu tabel. Untuk membandingkannya maka didapat dilihat pada gambar 3.19 berikut:





**Gambar 3. 19 (a) nilai defleksi dari eksperimen (b) nilai defleksi eksperimen**

Dari gambar 3.19 tersebut dapat dilihat pada beban *impact* 10kN didapatkan defleksi sebesar 0.2mm dan pada beban *impact* 30kN memiliki defleksi sebesar 0.9 mm dst. Maka dapat disimpulkan bahwa *software* yang digunakan memiliki nilai mendekati nilai eksperimen.

### 3.6 Penentuan Jenis Analisa pada ANSYS Workbench 18.1

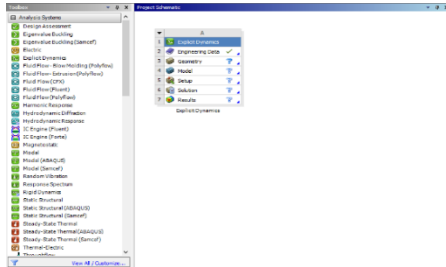
Sebelum memulai simulasi dengan software ANSYS Workbench 18.1, terlebih dahulu menentukan jenis analisa yang nantinya akan dilakukan pada software ANSYS 18.1. Karena akan mempengaruhi dengan fitur apa yang akan digunakan dan data apa saja yang dibutuhkan untuk melakukan analisa. Pada proses validasi analisa dilakukan dengan metode static karena untuk proses validasi pembebanan dilakukan secara sederhana. Untuk proses simulasi pada penelitian ini dilakukan analisa secara dinamis.

Proses permodelan pada penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan Perangkat lunak ANSYS Workbench 18.1 *Explicit Dynamic*. Pada simulasi yang

dilakukan akan didapatkan hasil tegangan yang terbaca akibat besarnya beban *impact* yang diberikan pada rel kereta api ketika suhu rel kereta api  $50^{\circ}\text{C}$  dan  $90^{\circ}\text{C}$ . Langkah-langkah yang dilakukan untuk simulasi sebagai berikut:

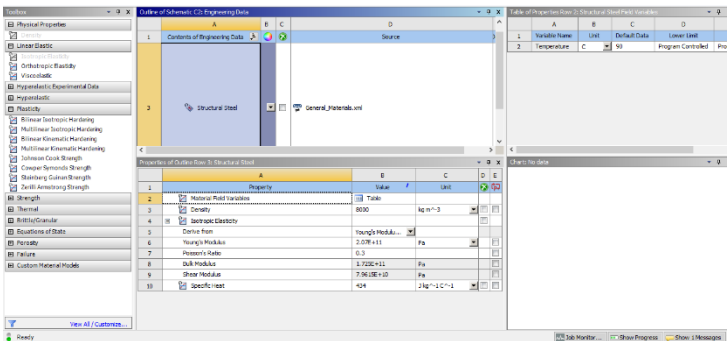
**a. Membuka aplikasi Ansys Workbench 18.1 lalu pilih *Explicit Dynamic***

Pilih Explicit dynamic untuk melakukan simulasi pada penelitian ini karena pembebanan yang dilakukan pada model dilakukan secara dinamis. Karena pembebanan yang diberikan memiliki durasi waktu.



**Gambar 3. 20 Menentukan Tipe Simulasi dengan Explicit Dynamic**

**b. Input Data Material Dari Rel Kereta Api**



**Gambar 3. 21 Input Karakteristik Material Dan Suhu Model Rel**

Masukkan nilai *modulus young*, *poison ratio*, dan *density* dari rel kereta api sesuai dengan data yang sudah didapatkan pada sub bab 3.1 serta suhu netral material  $38^{\circ}\text{C}$  dan suhu naik hingga  $90^{\circ}\text{C}$  (menggunakan 2kali lipat suhu yang mungkin terjadi di Indonesia). Kemudian dilakukan pembuatan material baru untuk mendefinisikan material dari beton sebagai sleeper dan juga kerikil sebagai ballas dari rel kereta api. Data yang dimasukkan dalam engineering data berupa *density*, *modulus young*, dan *poison ratio* dari *sleeper* dan *ballast*. Namun karena dimensi dari *sleeper* dan *ballast* yang dimodelkan lebih kecil dari aslinya, untuk mendapatkan besar massa yang sama dengan kondisi real diperlukan mengubah besarnya *density* dari *sleeper* dan *ballast*. Diketahui dari sub bab 3.1 besarnya densitas dari bantalan  $2403 \text{ kg/m}^3$  dan kerikil  $1258,2 \text{ kg/m}^3$ . Sedangkan massa dari bantalan untuk rel tipe R42 yaitu  $200\text{kg}$  [24]. Untuk massa dari kerikil dapat diketahui dengan mengalikan besarnya densitas dari kerikil dengan volume kerikil yang di ambil dari jurnal penelitian Bian et al. Dengan demikian besarnya densitas baru untuk mendapatkan besarnya massa yang sesuai dengan dimensi yang lebih sederhana sebagai berikut:

- **Mengitung besarnya densitas baru bantalan**

$$\text{Densitas beton (dimensi sebenarnya)} = 2403 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Massa bantalan beton} = 200 \text{ kg}$$

$$\text{Volume bantalan beton sebenarnya} = 0,083 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume bantalan baru (disederhanakan)} = 1000 \text{ mm}^3 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Densitas bantalan baru :

$$\rho_{2bantalan} = m / v$$

$$\rho_{2bantalan} = 200\text{kg} / 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\rho_{2bantalan} = 2 \times 10^8$$

- **Mengitung besarnya densitas baru kerikil**

$$\text{Densitas kerikil (dimensi sebenarnya)} = 1258,2 \text{ kg/m}^3$$

Volume bantalan kerikil sebenarnya:

$$volume = \frac{1356 + 1500}{2} \times 250 \times 220$$

$$volume = 1428 \times 250 \times 220$$

$$volume = 785400000 \text{ mm}^3$$

$$volume = 785,4 \text{ m}^3$$

Massa kerikil sebenarnya :

$$m = \rho \times v$$

$$m = \frac{1602 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m = 1258,2 \text{ kg}$$

Volume kerikil baru (disederhanakan) =  $1000 \text{ mm}^3 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

Densitas kerikil baru :

$$\rho_{2\text{kerikil}} = m / v$$

$$\rho_{2\text{kerikil}} = 1258,4 \text{ kg} / 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\rho_{2\text{kerikil}} = 12582 \times 10^5$$

Dengan mengubah besarnya densitas dari bantalan beton dan kerikil sebagai tumpuan rel kereta api maka di dapatkan besarnya massa yang sesuai dengan kondisi *real* walau dengan dimensi yang lebih sederhana seperti pada gambar di bawah ini:

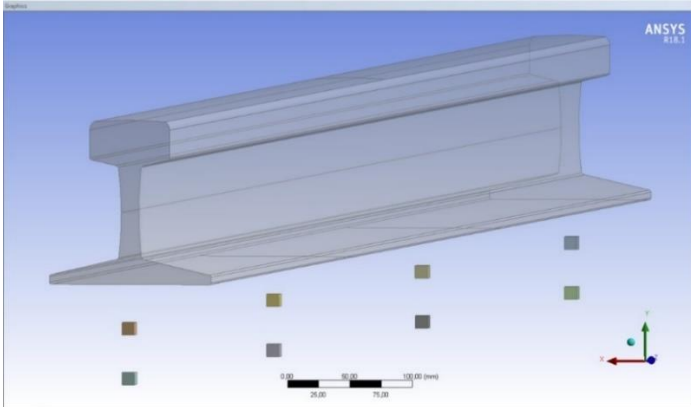
Properties		Properties	
Volume	1000, mm <sup>3</sup>	Volume	1000, mm <sup>3</sup>
Mass	1258,2 kg	Mass	200, kg
Centroid X	65,787 mm	Centroid X	65,787 mm
Centroid Y	-75, mm	Centroid Y	-35, mm
Centroid Z	1805, mm	Centroid Z	1805, mm
Moment of Inertia Ip1	20970 kg-mm <sup>2</sup>	Moment of Inertia Ip1	3333,3 kg-mm <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	20970 kg-mm <sup>2</sup>	Moment of Inertia Ip2	3333,3 kg-mm <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	20970 kg-mm <sup>2</sup>	Moment of Inertia Ip3	3333,3 kg-mm <sup>2</sup>

**Gambar 3. 22 Massa Bantalan Beton dan Kerikil**

### c. Penggambaran *ballast* dan *sleeper*

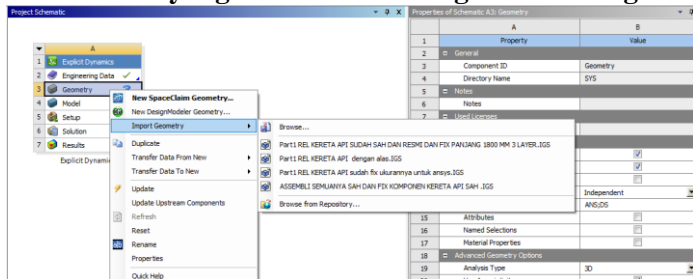
Untuk mendapatkan model mendekati keadaan real di Indonesia seperti pada model yang digunakan pada penelitian sebelumnya oleh **Ade Irma Yunita (2008)** maka dibuat sebuah

body baru untuk menggambarkan adanya bantalan dan kerikil. Pemodelan dilakukan dengan dimensi yang lebih kecil dengan mempertimbangkan waktu proses yang lebih singkat dengan dimensi yang lebih sederhana. Maka didapatkan hasil pemodelan sebagai berikut:



**Gambar 3. 23 Pemodelan bantalan beton dan kerikil**

**d. Input geometri dari rel kereta api dari aplikasi solidworks yang sudah dibuat dengan format \*.igs**



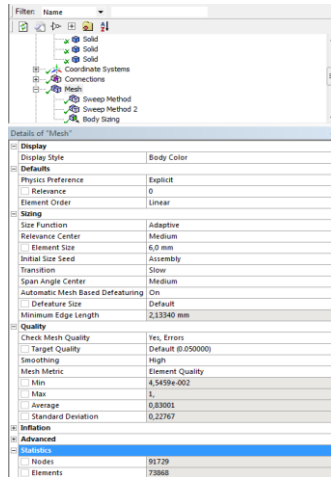
**Gambar 3. 24 Input geometri dengan klik import geometri**

Untuk menginputkan geometri dari model yang dibuat digunakan menu *import* geometri. Setelah geometri dimasukkan lalu *generate* geometri pada dengan membuka terlebih dahulu menu *Edit* geometri untuk membuat *body* yang di input dapat di

proses. Langkah selanjutnya membuat garis untuk meletakkan beban dan tumpuan spring pada permukaan rel. Untuk membuat garis langkah pertama yaitu membuat *plane* baru untuk membuat garis tengah pada permukaan rel kereta agar pembebanan dapat dilakukan tepat ditengah rel. Dengan cara membagi dua permukaan atas (*flip face*) dan mengatur jarak sepanjang 900mm. Untuk membuat garis pada bagian bawah untuk peletakan tumpuan dilakukan pembagian area menjadi tiga bagian sehingga muncul dua garis baru dengan jarak antar garis 600mm.

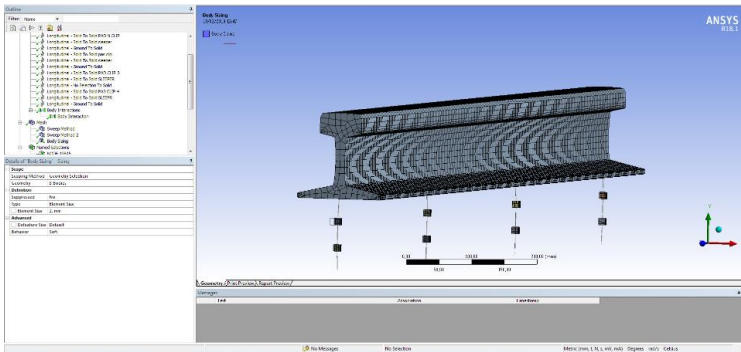
#### **e. Proses Meshing**

Proses *meshing* atau proses diskritisasi merupakan proses membagi sebuah benda kerja menjadi elemen elemen yang lebih kecil. Proses dapat mempengaruhi hasil analisa, dikarenakan perbedaan jumlah elemen dan *node* dalam meshing dapat mempengaruhi hasil simulasi. Proses meshing dilakukan dengan membuka menu model lalu setelah terbuka klik kanan mesh dan pilih generate mesh. Hasil meshing akan didapatkan seperti pada gambar 3.25 dengan pengaturan metode meshing seperti pada gambar tabel proses pada gambar 3.25.



**Gambar 3. 25 Pengaturan Proses Meshing**

Pemilihan metode meshing yang digunakan yaitu *multi zone meshing* karena dengan menggunakan *multi zone meshing* hasil meshing akan lebih *efisien* dengan membagi *body* menjadi elemen *hexahedral* dan elemen bebas (tidak terstruktur). Secara otomatis menghasilkan *mesh hexahedral* murni di mana mungkin dan mengisi bagian yang sulit dengan mesh tidak terstruktur sehingga waktu proses yang diperlukan lebih cepat. Besarnya meshing dapat ditentukan dengan melakukan uji konvergensi dengan melihat besarnya tegangan pada *node* yang berada pada lokasi sumbu x 72.9mm, sumbu y 57.5 mm dan sumbu z 900 mm. Dengan memilih eror yang kurang dari lima persen dan memiliki nilai paling kecil. Sehingga didapatkan hasil meshing sebagai berikut:



**Gambar 3. 26 Hasil Proses Meshing**

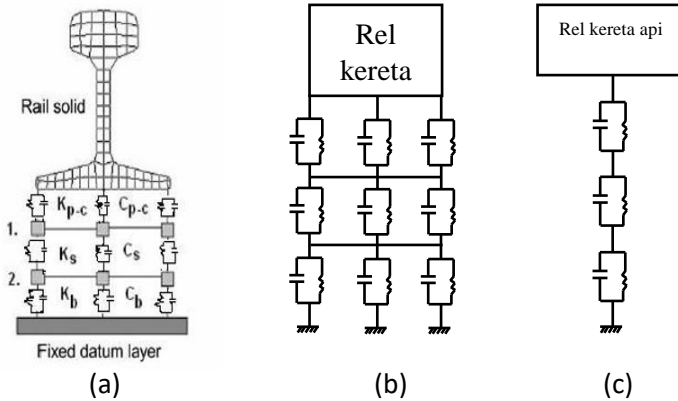
## f. Pemodelan

Pemodelan dari simulasi dilakukan dengan membuat rel kereta api dengan tumpuan spring pada bagian bawahnya untuk menggambarkan pad dan klip, *sleeper*, dan *ballast*. Dengan menyederhanakan pemodelan yang dilakukan oleh **Ade Irma Yunita (2008)** seperti pada gambar 3.27. Pada Ansys pembuatan *connection* berupa *spring* langkah yang harus dilakukan sebagai berikut:

- Klik pada model> klik kanan pada Model > insert > connection
- Klik kanan pada connection >insert> spring > lalu akan muncul tabel untuk menseeting sifat dari spring

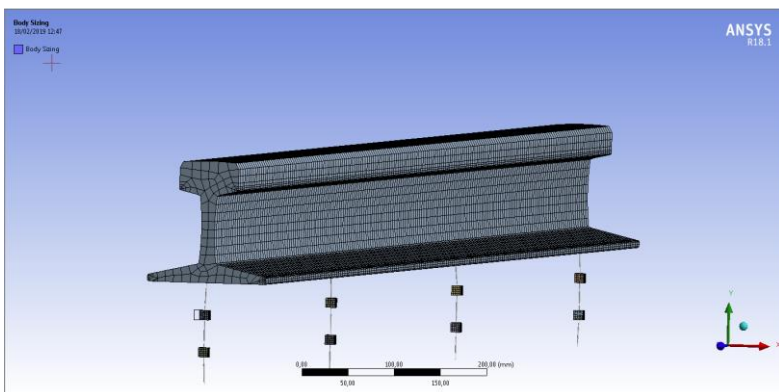
Dari pemodelan spring yang diambil dari penelitian sebleumnya dilakukan penyederhanaan susunan spring. Penyederhanaan dilakukan guna mereduksi waktu *running* pada proses simulasi Ansys Workbench 18.1 Explicit Dynamic. Skema penyederhanaan *spring* sebagai berikut:





**Gambar 3. 27 Penyederhanaan Susunan Spring Tampak Depan (a) Model oleh Jonhsons (b) model oleh Ade Irma Yunita (c) Penyederhanaan Model**

Dari penyederhanaan susunan spring yang dilakukan pada gambar 3.27 akan didapatkan model kereta api seperti pada gambar 3.28:



**Gambar 3. 28 Model Spring dari Penyederhanaan**

Untuk melakukan penyederhanaan seperti pada gambar 3.27 menjadi gambar 3.28 dilakukan proses perhitungan secara matematis sebagai berikut:

- Menghitung nilai K dan C parallel  
 $K_{p.c \text{ parallel}} = 420 + 420 + 420$   
 $K_{p.c \text{ parallel}} = 1260\text{MN/m}$

$$K_s \text{ parallel} = 99 + 99 + 99$$

$$K_s \text{ parallel} = 297\text{MN/m}$$

$$K_b \text{ parallel} = 30 + 30 + 30$$

$$K_b \text{ parallel} = 90\text{MN/m}$$

$$C_{p.c \text{ parallel}} = 50 + 50 + 50$$

$$C_{p.c \text{ parallel}} = 150 \frac{\text{Ns}}{\text{mm}}$$

$$C_{s \text{ parallel}} = 130 + 130 + 130$$

$$C_{s \text{ parallel}} = 390 \frac{\text{Ns}}{\text{mm}}$$

$$C_{b \text{ parallel}} = 40 + 40 + 40$$

$$C_{b \text{ parallel}} = 120 \frac{\text{Ns}}{\text{mm}}$$

Nilai k dan c yang didapatkan di inputkan kedalam tabel kolom *Longitudinal stiffness* untuk K dan *Longitudinal damping* untuk C. Scope dari *spring klik body-ground*. Untuk *reference coordinate* X, Y, dan Z berada pada *gorund* dan *mobile* koordinat pada *body*.

Details of "Longitudinal - Ground To Solid"	
<b>Graphics Properties</b>	
<b>Definition</b>	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both
<input type="checkbox"/> Longitudinal Stiffness	65480 N/mm
<input type="checkbox"/> Longitudinal Damping	56.93 N-s/mm
Suppressed	No
Spring Length	300. mm
<b>Scope</b>	
Scope	Body-Ground
<b>Reference</b>	
Coordinate System	Global Coordinate System
Reference X Coordinate	65.786 mm
Reference Y Coordinate	-300. mm
Reference Z Coordinate	1800. mm
Reference Location	Click to Change
<b>Mobile</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Edge
Body	Solid
Coordinate System	Global Coordinate System
Mobile X Coordinate	65.786 mm
Mobile Y Coordinate	0. mm
Mobile Z Coordinate	1800. mm
Mobile Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All

**Gambar 3. 29 Tabel Pengaturan Spring**

Lakukan pengulangan langkah tersebut sebanyak tiga kali dan untuk satu *layer* cukup dibuat satu *spring* yang menghubungkan *body* rel kereta api dengan *ground*. Dengan mengubah koordinat letak spring sehingga akan didapatkan peletakan spring seperti pada gambar 3.30 sebagai berikut:



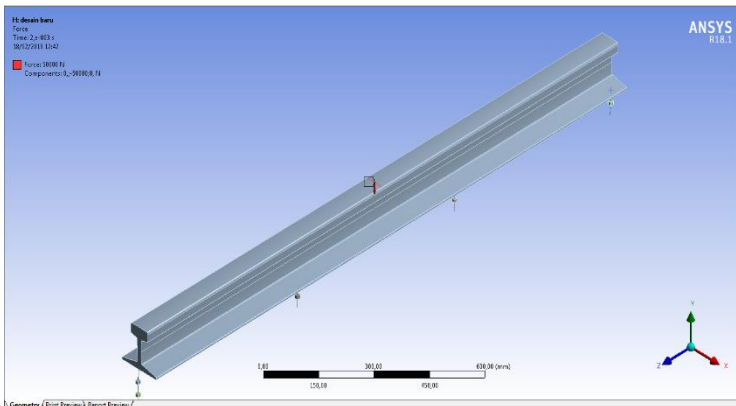
**Gambar 3. 30 Pembuatan Connection Spring**

### g. *Boundary Condition*

*Boundary Condition* yang digunakan pada penelitian untuk permodelan ini adalah berupa *Fixed Support* yang terletak pada ujung *spring* yang berada pada *ground* atau *reference coordinate* seperti pada gambar 3.30.

### h. Pembuatan Pembebanan

Pada penelitian kali ini pembebanan dilakukan pada tengah batang rel kereta api. Besarnya pembebanan 10-90kN pada model tiga *layer* dan 50-450kN untuk model satu *layer*. Besarnya beban ini didapatkan dari nilai skala aman sebesar 50kN hingga skala dimana harus dilakukan perbaikan segera dengan beban sebesar 450kN. Berikut merupakan gambar letak pembebanan yang diberikan pada rel kereta api.



**Gambar 3. 31 Pembebanan 50kN Tepat Berada Ditengah Rel Kereta Api**

Untuk memberikan beban pada model langkah yang dilakukan yaitu:

- Klik kanan initial condition > insert > force
- Pada kolom force klik edge yang akan di beri beban > atur besarnya beban > pilih arah pembebanan

Maka proses pemberian beban sudah selesai dan dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya.

**i. Pemilihan Hasil Analisa**

Hasil analisa yang dipilih untuk menyelesaikan penelitian ini adalah *Maximum Stress (Von Mises)* untuk mengetahui besarnya tegangan maximum yang terjadi pada rel kereta api akibat adanya beban *impact* dan perubahan suhu.

Halaman ini sengaja dikosongkan

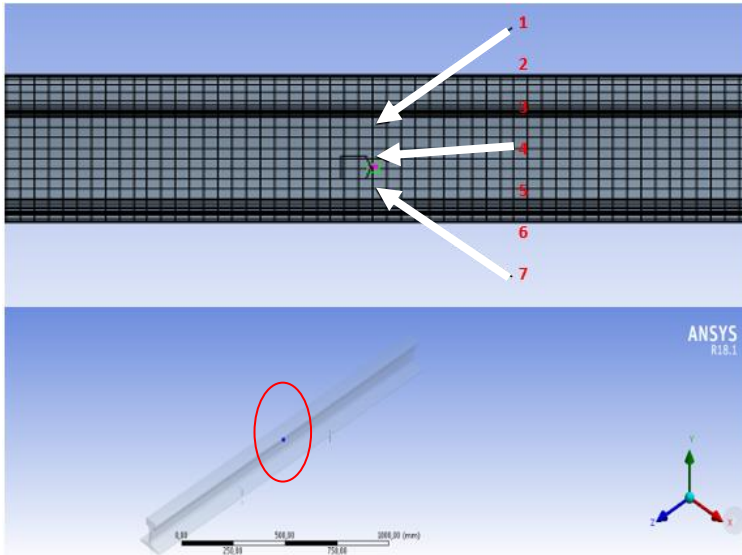
## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dari lampiran C dapat dilihat hasil *running* dengan diberikan beban *impact* pada tujuh *node* yang berada tepat di tengah sisi samping antara dua bantalan sepanjang garis lurus vertikal. Permukaan letak *node* yang dianalisa merupakan tempat peletakan *starin gauge* yang digunakan untuk mengukur besarnya tegangan yang terjadi akibat beban *impact*. Koordinat dari *node* yang akan diamati seperti pada tabel 4.1 berikut:

**Tabel 4.1 Koordinat Node**

No	Nama Node	Koordinat (x, y, z) mm
1	Node 1	(74,1; 84,8; 900)
2	Node 2	(73,5; 75,7; 900)
3	Node 3	(73,1; 66,6; 900)
4	Node 4	(72,9; 57,5; 900)
5	Node 5	(73,1; 48,5; 900)
6	Node 6	(73,5; 39,4; 900)
7	Node 7	(74,2; 30,3; 900)

Dari grafik 4.1 dapat diketahui letak dari *node* tersebut dari koordinat. Untuk arah dari sumbu x, y, dan z dapat dilihat dari gambar 4.1 yang menunjukkan arah dari sumbu terhadap rel kereta api.



**Gambar 4. 1** Penunjukkan letak *node* dan Arah Sumbu x, y, dan z terhadap desain rel kereta api

Pada *node-node* tersebut dilakukan analisa besarnya tegangan yang terjadi dengan menggunakan grafik yang dihasilkan seperti pada lampiran C. Dari grafik tersebut dilakukan analisa respon tegangan terhadap kenaikan beban *impact*. Pada penelitian ini jumlah *node* yang dianalisa berjumlah 7 titik. Pada penelitian sebelumnya dilakukan analisa hanya pada satu *node* di sisi permukaan peletakan alat ukur. Hal tersebut membuat nilai tegangan yang diketahui hanya pada satu titik saja. Sebagaimana diketahui bahwa tegangan yang terjadi pada sebuah batang yang dikenai beban *impact* memiliki nilai tegangan terbesar terletak pada sisi yang mengalami tegangan tarik dan tegangan tekan. Jika pada rel seperti ada gambar 4.1 tegangan maksimum mungkin terjadi pada *node* 1 dan 7. Namun dengan adanya kenaikan suhu rel kereta api akan mengalami ekspansi. Dengan adanya ekspansi rel kereta api akan mengalami *pressure* dari salah satu ujungnya yang memungkinkan perubahan letak nilai tegangan maksimum



yang terjadi. Maka perlu dilakukan analisa nilai tegangan pada beberapa titik untuk melihat perubahan nilai tegangan yang terjadi pada setiap *node* dengan adanya kenaikan suhu.

#### **4.1 Analisa Tegangan Akibat Beban *Impact* Model Tiga Layer**

Analisa yang pertama dilakukan dengan menggunakan model rel kereta api yang memiliki susunan *support* tiga *layer* yang menggambarkan *pad and clip*, *ballast*, dan *sleeper*. Dimana dimensi untuk menggambarkan *support* tersebut memiliki dimensi yang lebih kecil. Untuk mendapatkan beban yang sesungguhnya maka dilakukan perubahan nilai densitas. Sehingga di dapatkan hasil simulasi berupa nilai tegangan akibat beban *impact* 10-90kN dengan suhu awal 38°C hingga 90°C yang akan di bahas pada sub bab 4.1.1 dan 4.1.2.

##### **4.1.1 Analisa Tegangan Akibat Kenaikan Beban *Impact* Pada *Node* Dengan Model Rel Kereta Api Tiga Layer Tanpa Kenaikan Suhu**

Pada penelitian pertama dilakukan analisa tegangan yang terjadi pada *node-node* rel kereta api terhadap beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu. Pada pelaksanaan simulasi tugas akhir besarnya beban *impact* yang diberikan 10-90kN karena menggunakan model susunan tiga *layer* dengan massa *support* sesuai dengan kondisi sesungguhnya. Beban yang dapat diberikan hanya sebesar 10-90kN karena computer tidak dapat memproses simulasi. Pada rencana awal beban *impact* yang diberikan yaitu sebesar 50-450kN mengacu pada penelitian sebelumnya oleh Ade Irma Yunita (2008). Dikarenakan 50-450kN merupakan rentang nilai beban *impact* aman hingga roda perlu diganti dilihat dari besarnya beban *impact* yang terjadi akibat ketidaksilindrisan roda. Namun pada pelaksanaanya peneliti mengalami masalah dengan proses running dimana beban *impact* 100-450kN tidak dapat diselesaikan karena beban yang diberikan terlalu besar sehingga menyebabkan *computer* memiliki nilai *error* yang besar dan tidak

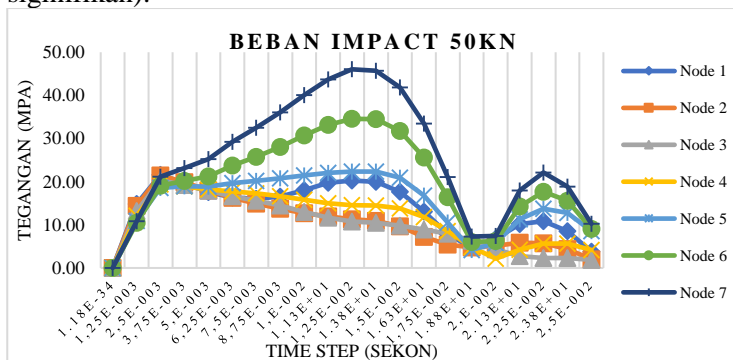
dapat memprosesnya. Maka diambil beban *impact* sebesar 10-90kN untuk melihat besarnya tegangan yang terjadi. Karena tujuan dari penelitian ini untuk melihat pengaruh kenaikan suhu terhadap perubahan tegangan yang terbaca akibat beban *impact*, maka dianggap perubahan besarnya beban *impact* yang di berikan tidak mengubah dari tujuan utama penelitian ini dilakukan.

**a. Analisa Tegangan Maksimum Dengan Variasi Letak Node Akibat Beban Impact**

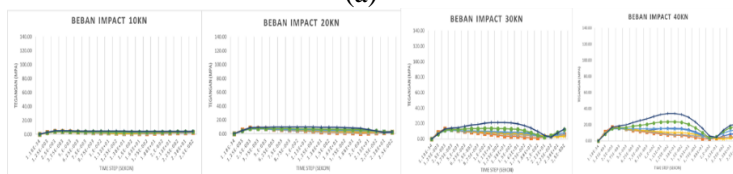
Dari gambar 4.2(a) menunjukkan *time history* tegangan *von mises* untuk beban *impact* 50kN dengan skala nilai maksimum sumbu y 50Mpa untuk melihat lebih jelas nilai tegangan yang terjadi. Dari gambar tersebut dapat terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada tiap *node* memiliki nilai yang berbeda. Semakin kebawah letak *node* yang diamati memiliki tegangan yang semakin besar pada beban *impact* 50kN. Tegangan maksimum terjadi pada *node* 7 namun tegangan minimum tidak terjadi pad *node* 1. Terlihat pada gambar 4.2(a) *node* 1 berada di tengah. Itu dapat terjadi karena pada titik bawah dan atas *node* yang diamati ketika mendapatkan beban *impact* mengalami tegangan tekan dan tegangan tarik. Memungkinkan tegangan maksimum terjadi pada *node* 1 dan 7. Sedangkan tegangan minimum mungkin terjadi pada *node* yang terletak di antara *node* 1 dan *node* 7.

Dari gambar 4.2(b) merupakan grafik nilai tegangan akibat beban *impact* 10-40kN dengan skala sumbu y memiliki nilai maksimum 140Mpa untuk melakukan perbandingan grafik. Maka dapat terlihat grafik tegangan akibat beban *impact* 10-40kN memiliki grafik history tegangan yang landai (tidak mengalami perubahan nilai yang signifikan). Namun ketika grafik tersebut diperbesar (Lampiran D) perubahan tegangan yang terjadi memiliki pola (trend) tegangan yang sama. Dimana tegangan berawal dari nol hingga mencapai nilai maksimum kemudian nilai tegangan turun tidak beraturan. Dari gambar 4.2(b) dengan skala grafik yang sama (140Mpa) kesamaan pola tegangan mulai terlihat pada beban *impact*

30kN hingga 90kN yaitu terjadi perubahan nilai tegangan secara signifikan. Pada beban *impact* 10kN dan 20kN belum terlihat kesamaan profil namun memiliki trend yang sama. Hal ini mungkin disebabkan beban *impact* yang diaplikasikan memiliki nilai yang kecil sehingga tegangan yang muncul bernilai kecil dan hampir sama, mengakibatkan profil grafik cenderung landai (tidak terjadi perubahan nilai yang signifikan).



(a)



(b)



(c)

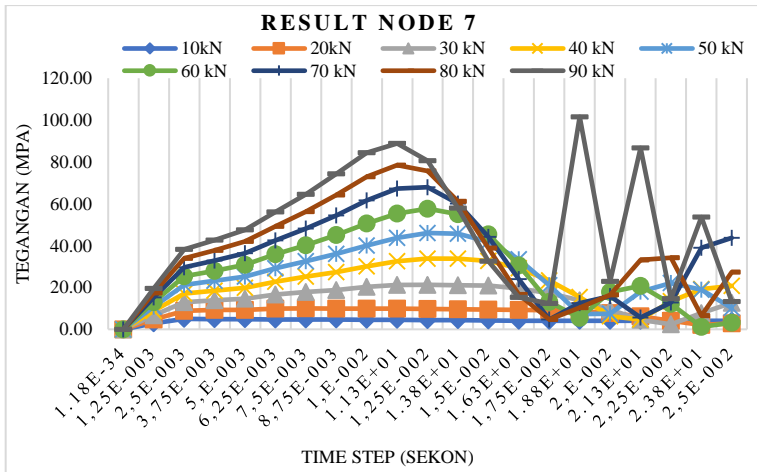
**Gambar 4. 2 Grafik *Time history* Tegangan Von Mises pada tujuh node (a) beban *impact* 50kN (b) 10-40kN (c) 60-90kN**

Dari hasil grafik 4.2(b) dan (c) (lampiran C) diketahui bahwa nilai tegangan terkecil terdapat pada *node* 3 (pada beban 10kN, 50kN, 60kN, 70kN, 80kN, dan 90kN) dan pada *node* 2 (pada beban 20kN, 30kN, dan 40kN) yang berada di sisi atas dan tegangan paling besar terletak pada *node* 7 yang terletak paling bawah dari permukaan sisi rel. Seperti pada gambar 4.2 diketahui tegangan berawal dari nol kemudian naik hingga titik tertentu pada semua *node*. Nilai tegangan mengalami kenaikan kembali hingga mencapai nilai maksimum kemudian turun dan naik kembali tidak beraturan. Hasil grafik dengan beban *impact* yang berbeda seperti 4.2(b) juga memiliki *trend* grafik yang hampir sama dimana grafik akan mencapai nilai maksimum dan turun. Grafik tersebut didapatkan dengan memberikan beban *impact* berupa *force* seperti pada gambar 4.3 dengan *end time* proses 0.025 s. Dengan besarnya *end time* 0.025 s sudah didapatkan besarnya nilai maksimum dari tegangan yang di ambil dari penelitian sebelumnya. Apabila *running* dilakukan dengan *end time* yang lebih lama tidak akan mempengaruhi besarnya hasil yang didapatkan. Dari grafik yang didapatkan (Lampiran C) juga diketahui bahwa semakin besar beban *impact* yang diberikan besarnya tegangan maksimum juga meningkat pada setiap *node*. Dari gambar 4.2(a) diketahui dengan beban *impact* 50kN besarnya tegangan yang terjadi berbeda setiap *node* nya berdasarkan letak *node* yang diamati. Sehingga besarnya tegangan sepanjang permukaan sisi rel tersebut tidak sama, semakin kebawah letak *node* yang di amati besarnya tegangan yang terjadi semakin besar. Dari gambar 4.2 *node* tujuh memiliki nilai maksimum yang didapatkan pada beban 50kN yaitu sebesar 46 Mpa hingga pada beban 90kN nilai maksimum yang didapatkan 101.5Mpa.

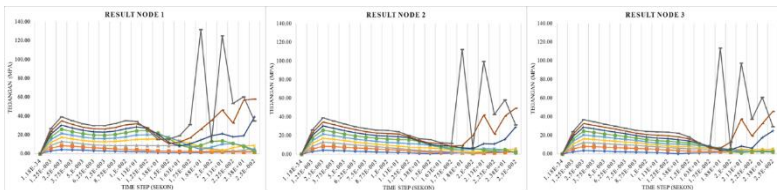
Dari gambar 4.3(a) dapat dilihat sebagai salah satu contoh tegangan yang terjadi pada *node*. *Trend* grafik gambar 4.3(b)&(c) yang terjadi pada *node* 1 hingga 6 juga memiliki kecenderungan *trend* grafik yang sama namun memiliki

kerapatan antara garis dan besar tegangan maksimum yang berbeda (Lampiran I). Semakin ke atas letak *node* yang di amati memiliki kerapatan garis yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan selisih besarnya tegangan maksimum yang terjadi semakin kecil. Menunjukkan adanya pengaruh letak *node* yang dianalisa terhadap besarnya tegangan. Dari gambar 4.3 diketahui bahwa hubungan antara beban *impact* yang diberikan dengan tegangan yang terjadi memiliki hubungan yang linier. Pada *node* tujuh tegangan yang terjadi akibat beban *impact* 10kN memiliki nilai terendah dan nilai tegangan dengan beban *impact* 90kN memiliki nilai tegangan yang paling besar. Demikian juga pada setiap *node* 1 hingga 6, diketahui semakin besar beban *impact* yang diberikan maka tegangan yang terjadi semakin besar.

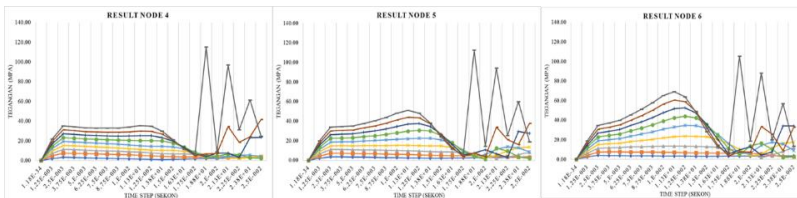
Untuk mengamati lebih lanjut maka besarnya tegangan maksimum yang terjadi pada *node* tujuh dengan variasi beban *impact* seperti pada gambar 4.3. Terlihat pada beban 90kN di akhir grafik mulai terjadi perbedaan *trend* grafik dengan beban *impact* yang lainnya. Ini dapat menunjukkan mulai terjadinya *error* pada beban 90kN. Terlihat pada detik ke 1,75e-002 besarnya tegangan yang terbaca mulai memiliki *profil* grafik yang berbeda dengan beban *impact* yang lainnya. Hal ini dapat menunjukkan batas maksimum beban *impact* yang dapat diproses oleh *computer*. Seperti yang dijelaskan pada 4.1 bahwa besarnya beban *impact* yang direncanakan oleh penulis 100-450kN tidak dapat diproses oleh *computer* karena terjadi *error* yang melebihi batas dari *computer*. *Error* yang terjadi mulai ditunjukkan pada grafik tegangan dengan beban *impact* 90kN. Hal ini juga terjadi pada beban *impact* 90kN pada *node* 1 sampai *node* 6 (Lampiran I).



(a)



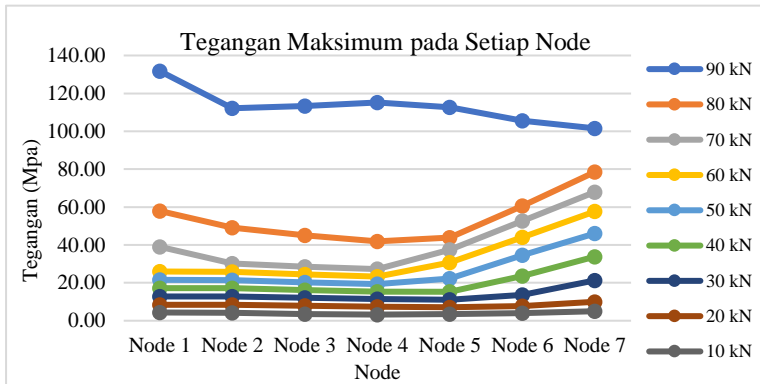
(b)



(c)

**Gambar 4. 3 History Tegangan Von Mises Pada (a) Node 7 (b) Node 1-3 (c) node 4-6 Dengan Beban Impact yang Berbeda**

Dari hasil yang didapatkan pada 4.1 diambil tegangan maksimum dari setiap pembebanan pada setiap *node*. Seperti pada gambar 4.4 dapat dilihat tegangan maksimum dari setiap *node* akibat beban *impact* yang bervariasi.



**Gambar 4. 4 Tegangan Maksimum pada *node-node* dengan variasi beban *impact***

Dari gambar grafik 4.4 dilihat bahwa profil tegangan yang terjadi memiliki kesamaan *trend line* pada beban *impact* 10-80kN dan mulai memiliki perbedaan pada beban 90kN. Pada beban 90kN bersanya selisih nilai tegangan lebih besar jika di bandingkan dengan beban *impact* yang lainnya. Hal ini dapat disebabkan karena pada proses *running* nya memiliki nilai *error* yang lebih besar. Sehingga hasil tegangan yang didapatkan dari proses *running* memiliki perbedaan nilai yang cukup jauh, walaupun memiliki *trend line* yang hampir sama. Besarnya tegangan yang terbaca pada *node* 1 hingga *node* 4 memiliki selisih nilai yang tidak besar di bandingkan dengan tegangan pada *node* 5,6, dan 7. Dengan semakin besarnya selisih tegangan maka akan lebih mudah untuk dilakukan pembacaan besarnya tegangan untuk menganalisa beban *impact* yang terjadi pada rel. Jika selisih tegangan *impact* memiliki nilai yang kecil dibutuhkan ketelitian alat ukur yang tinggi untuk mendapatkan hasil pengukuran yang akurat. Dari

hasil grafik 4.4 dapat disimpulkan besarnya tegangan yang terjadi memiliki selisih nilai yang semakin besar dari *node* pertama hingga *node* ketujuh. Maka dari itu untuk pemasangan alat ukur (*strain gauge*) disarankan di antara *node* 5,6, dan 7 (cenderung kebagian bawah dari sisi permukaan) karena nilai tegangan yang terbaca memiliki selisih yang semakin besar sehingga mempermudah pembacaan.

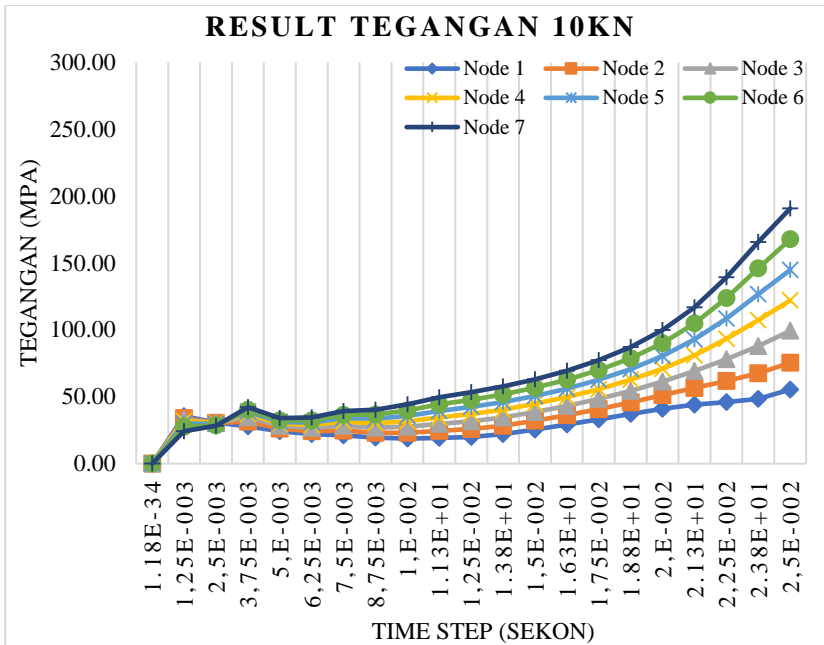
#### **4.1.2 Analisa Tegangan Akibat Beban *Impact* Model Tiga Layer Tanpa Pengaruh Suhu Pada Model**

Pada tujuan pertama penelitian ini diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi dengan beban *impact* akibat kenaikan suhu memiliki hubungan yang *linier* dan besarnya tegangan yang terjadi memiliki selisih nilai yang semakin besar dari *node* pertama hingga *node* ketujuh. Untuk melanjutkan dari data yang sudah didapatkan pada 4.1.1 dilakukan penelitian lebih lanjut dengan penerapan pengaruh kenaikan suhu awal 38°C hingga 90°C dengan beban *impact* 10-90°C pada 4.1.2. Berikut data *time history* tegangan yang terjadi akibat beban *impact*.

##### **a. Tegangan Von Misses Akibat Beban *Impact* 10kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:

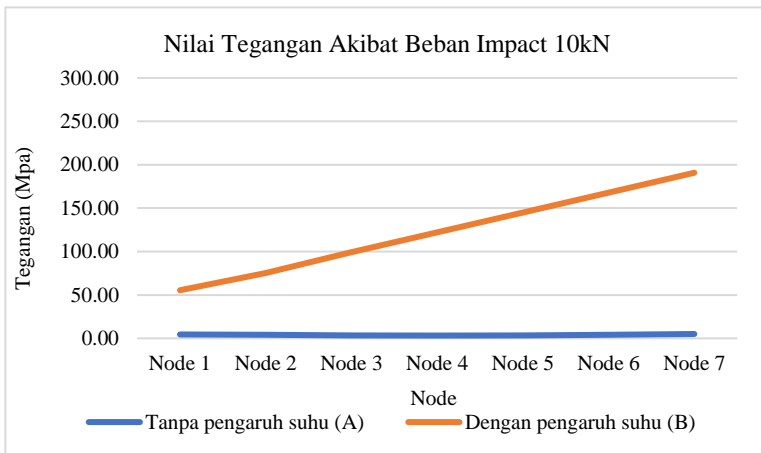




**Gambar 4. 5 Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban *Impact* 20kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.5 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan hingga waktu proses habis (lebih detail grafik pada Lampiran F). Memungkinkan nilai tegangan dapat semakin besar pada saat waktu proses running bertambah karena belum tercapainya tegangan maksimum. Pada gambar 4.5 di dapatkan besarnya tegangan dengan nilai terbesar pada *node* 7 190.47Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node* 1 55.44Mpa. Hal ini memungkinkan besarnya tegangan maksimum dapat meningkat pada *node-node* yang lainnya pada saat waktu proses di perpanjang. Hal ini dapat disebabkan karena diperlukan waktu untuk memproses tegangan yang ditimbulkan akibat adanya kenaikan suhu. Memungkinkan proses perambatan gaya reaksi

lebih cepat dibandingkan dengan *node* yang lainnya. Ketika ada *temperature* yang mengenai rel kereta api akan ada gaya eksternal yang menimbulkan tegangan di internal rel tersebut sebelum di kenai beban *impact*. Sehingga dengan waktu proses yang sama dan adanya kenaikan suhu memungkinkan tegangan maksimum belum dapat dicapai. Dengan waktu proses (*end time*) 0.025 sekon waktu simulasi yang dibutuhkan 20-25 jam. Ini menjadi salah satu pertimbangan peneliti untuk menentukan lamanya waktu proses *running* (*end time*). Hasil yang didapatkan dengan dan tanpa pengaruh kenaikan suhu pada beban *impact* 10kN sebagai berikut:



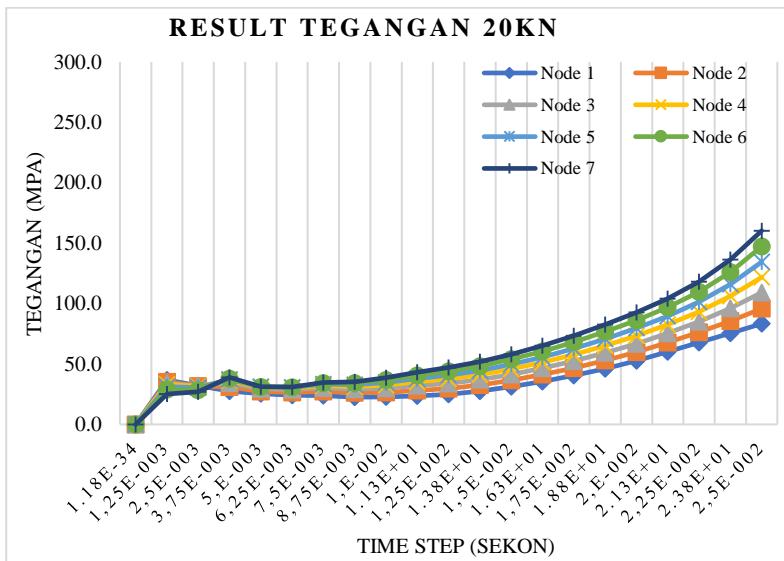
**Gambar 4. 6 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.6 dapat dilihat bahwa adanya kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat adanya beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 3005.6% (tiga puluh kali lipat) pada beban

*impact* 10kN. Pola dari grafik tegangan maksimum tanpa dan dengan pengaruh kenaikan suhu memiliki perbedaan. Dengan adanya pengaruh kenaikan suhu grafik mengalami kenaikan. Hal ini memiliki pola yang sama dengan beban *impact* 20kN, 30kN, dan 40kN.

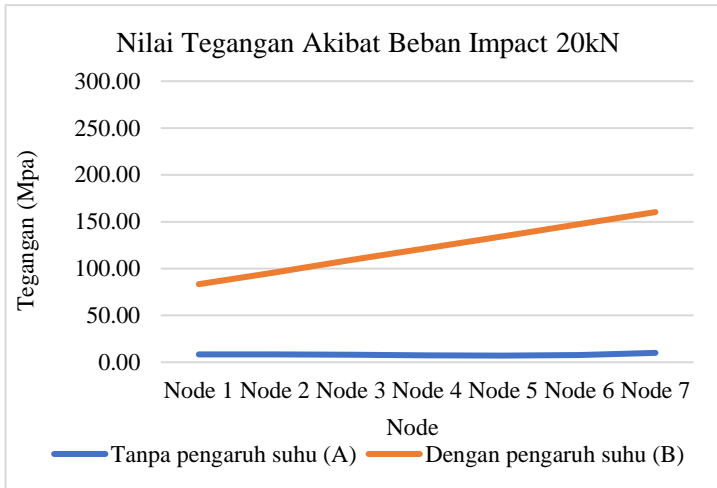
### b. Tegangan Von Mises Akibat Beban *Impact* 20kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu

Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:



**Gambar 4. 7 Time history Tegangan Von Mises Vs Waktu Untuk Beban *Impact* 20kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.7 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan hingga waktu proses habis (lebih detail grafik pada Lampiran F). Memungkinkan nilai tegangan dapat semakin besar pada saat waktu proses running bertambah karena belum tercapainya tegangan maksimum. Pada gambar 4.7 di dapatkan besarnya tegangan dengan nilai terbesar pada *node 7* 160.29Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node 1* 83.34Mpa. Hal ini memungkinkan besarnya tegangan maksimum dapat meningkat pada *node-node* yang lainnya pada saat waktu proses di perpanjang. Hal ini dapat disebabkan karena diperlukan waktu untuk memproses tegangan yang ditimbulkan akibat adanya kenaikan suhu. Memungkinkan proses perambatan gaya reaksi lebih cepat dibandingkan dengan *node* yang lainnya. Ketika ada *temperature* yang mengenai rel kereta api akan ada gaya eksternal yang menimbulkan tegangan di internal rel tersebut sebelum di kenai beban *impact*. Sehingga dengan waktu proses yang sama dan adanya kenaikan suhu memungkinkan tegangan maksimum belum dapat dicapai. Dengan waktu proses (*end time*) 0.025 sekon waktu simulasi yang dibutuhkan 20-25 jam. Ini menjadi salah satu pertimbangan peneliti untuk menentukan lamanya waktu proses *running (end time)*. Hasil yang didapatkan dengan dan tanpa pengaruh kenaikan suhu pada beban *impact* 20kN sebagai berikut:

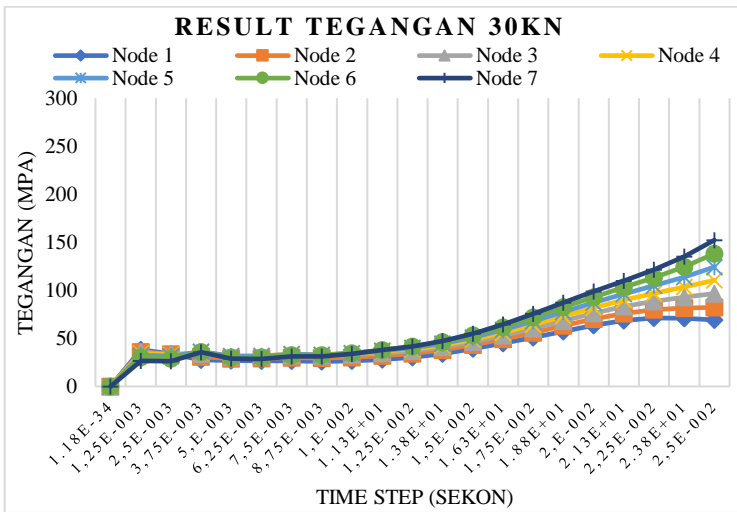


**Gambar 4. 8 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.8 dapat dilihat bahwa adanya kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat adanya beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 1407.7% (empat belas kali lipat) pada beban *impact* 20kN. Pola dari grafik tegangan maksimum tanpa dan dengan pengaruh kenaikan suhu memiliki perbedaan. Dengan adanya pengaruh kenaikan suhu grafik mengalami kenaikan. Hal ini memiliki pola yang sama dengan beban *impact* 10kN, 30kN, dan 40kN.

### c. Tegangan Von Mises Akibat Beban *Impact* 30kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu

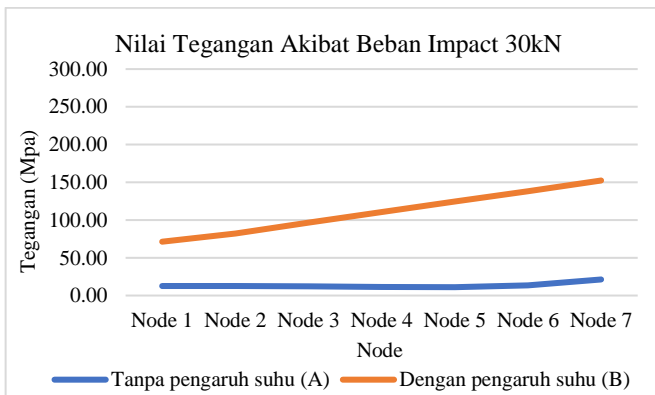
Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:



**Gambar 4. 9** *Time history* Tegangan Von Mises Vs Waktu Untuk Beban *Impact* 30kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu

Dari gambar 4.9 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan hingga waktu proses habis (lebih detail grafik pada Lampiran F). Namun pada *node* 1 menunjukkan trend grafik berbeda dengan *node* yang lain. Pada *node* satu *trend* grafik mengalami kenaikan hingga didapatkan nilai maksimum sebesar 71.3 Mpa kemudian mengalami penurunan. Pada beban *impact* 30kN tegangan paling besar terjadi pada *node* 7 sebesar 152.44Mpa dan tegangan terendah pada *node* 1 sebesar

71.3Mpa. Hal ini memungkinkan besarnya tegangan maksimum dapat meningkat pada *node-node* yang lainnya pada saat waktu proses di perpanjang. Hal ini dapat disebabkan karena diperlukan waktu untuk memproses tegangan yang ditimbulkan akibat adanya kenaikan suhu. Pada *node 1* besarnya tegangan memiliki nilai paling kecil dan berada paling dekat dengan letak beban *impact* diberikan seperti pada gambar 4.1. Memungkinkan proses perambatan gaya reaksi lebih cepat dibandingkan dengan *node* yang lainnya. Ketika ada *temperature* yang mengenai rel kereta api akan ada gaya eksternal yang menimbulkan tegangan di internal rel tersebut sebelum di kenai beban *impact*. Sehingga dengan waktu proses yang sama dan adanya kenaikan suhu memungkinkan tegangan maksimum belum dapat dicapai. Dengan waktu proses (*end time*) 0.025 sekon waktu simulasi yang dibutuhkan 20-25 jam. Ini menjadi salah satu pertimbangan peneliti untuk menentukan lamanya waktu proses *running (end time)*. Hasil yang didapatkan dengan dan tanpa pengaruh kenaikan suhu pada beban *impact* 30kN sebagai berikut:



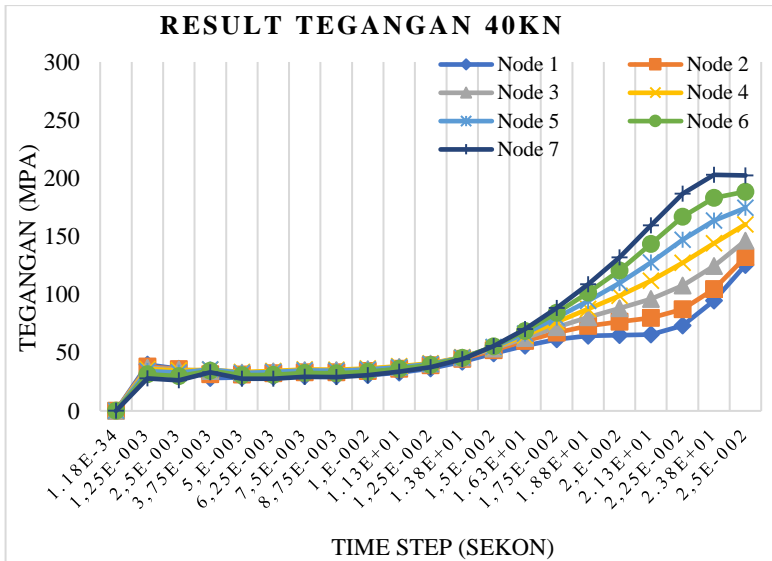
**Gambar 4. 10 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa adanya kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat adanya beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 732.2% (tujuh kali lipat) pada beban *impact* 30kN. Pola dari grafik tegangan maksimum tanpa dan dengan pengaruh kenaikan suhu memiliki perbedaan. Terlihat pola dari tegangan maksimum dengan adanya pengaruh suhu mengalami kenakikan dari *node* 1 ke *node* 7. Dengan adanya pengaruh kenaikan suhu grafik mengalami kenaikan. Hal ini memiliki pola yang sama dengan beban *impact* 10kN, 20kN, dan 40kN.

#### **d. Tegangan Von Misses Akibat Beban *Impact* 40kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:

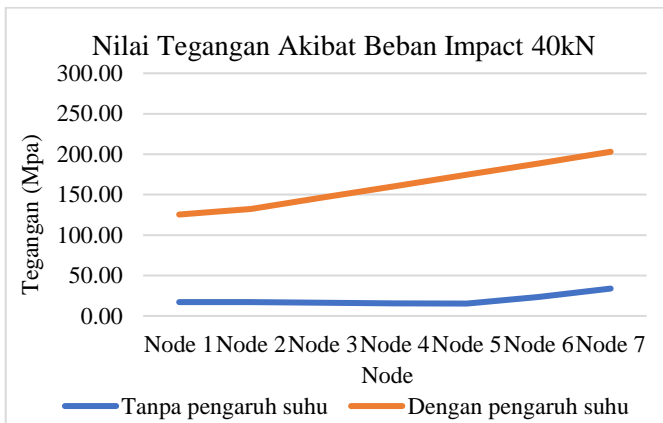




**Gambar 4. 11 Time history Tegangan Von Mises Vs Waktu Untuk Beban Impact 40kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.11 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan hingga waktu proses habis (lebih detail grafik pada Lampiran F). Hal ini memiliki kesamaan dengan grafik tegangan pada *impact* 30kN. Pada *node 7* menunjukkan trend grafik berbeda dengan *node* yang lain. Pada *node* tujuh *trend* grafik mengalami kenaikan hingga didapatkan nilai maksimum sebesar 202.97 Mpa kemudian mengalami penurunan. Pada beban *impact* 40kN tegangan paling besar terjadi pada *node 7* sebesar 202.97 Mpa dan tegangan terendah pada *node 1* sebesar 125.38Mpa. Hal ini memungkinkan besarnya tegangan maksimum dapat meningkat pada *node-node* yang lainnya pada saat waktu proses di perpanjang. Hal ini dapat disebabkan karena diperlukan waktu untuk memproses tegangan yang ditimbulkan akibat adanya kenaikan suhu. Memungkinkan proses perambatan

gaya reaksi lebih cepat dibandingkan dengan *node* yang lainnya. Ketika ada *temperature* yang mengenai rel kereta api akan ada gaya eksternal yang menimbulkan tegangan di internal rel tersebut sebelum di kenai beban *impact*. Sehingga dengan waktu proses yang sama dan adanya kenaikan suhu memungkinkan tegangan maksimum belum dapat dicapai. Dengan waktu proses (*end time*) 0.025 sekon waktu simulasi yang dibutuhkan 20-25 jam. Ini menjadi salah satu pertimbangan peneliti untuk menentukan lamanya waktu proses *running (end time)*. Hasil yang didapatkan dengan dan tanpa pengaruh kenaikan suhu pada beban *impact* 40kN sebagai berikut:



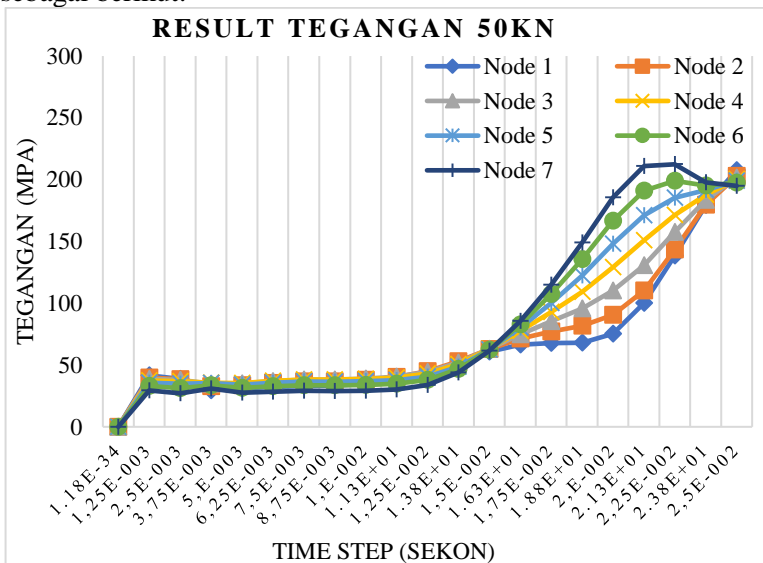
**Gambar 4.12 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.12 dapat dilihat bahwa adanya kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat adanya beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu

mengalami kenaikan 755.8% (tujuh kali lipat) pada beban *impact* 40kN.

#### e. Tegangan Von Misses Akibat Beban *Impact* 50kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu

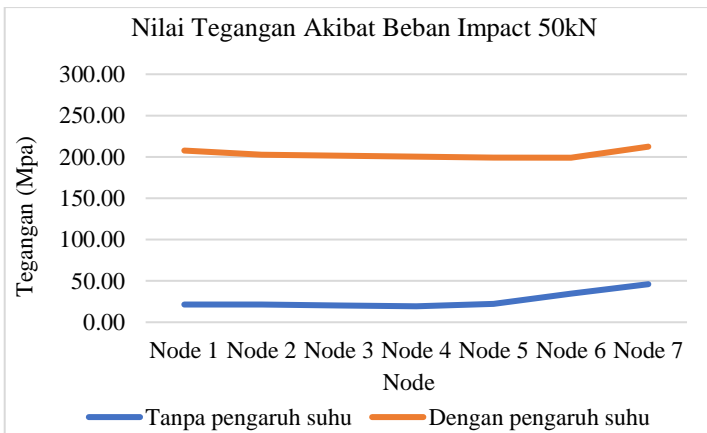
Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Namun dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:



**Gambar 4. 13 Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban *Impact* 60kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.13 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan hingga mencapai nilai maksimum. Kemudian nilai tegangan mengalami penurunan. Nilai tegangan maksimum yang terjadi dengan beban *impact* 50kN sebesar 212.4Mpa pada *node* 7 dan terendah sebesar 199.05Mpa

pada *node* 6. Dari gambar 4.13 terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada *node* 7 memiliki nilai maksimum. Memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan *node* 1. Sedangkan *node* 4 memiliki nilai tengah di antara keduanya. Hal ini berhubungan linier dengan letak *node* seperti pada gambar 4.1 di mana *node* 1 terletak paling atas dan *node* 7 terletak di bagian paling bawah. Hal tersebut terjadi pada tiga waktu yaitu  $2.13e+01$  sekon. Diluar waktu tersebut besarnya tegangan yang terjadi pada ketujuh *node* dengan beban *impact* 50kN memiliki besar tegangan dengan selisih yang kecil. Hal tersebut dapat dilihat dari garis yang saling berimpit pada gambar 4.13. Untuk nilai tegangan akibat beban *impact* yang didapatkan ketika tanpa pengaruh kenaikan suhu dan dengan adanya pengaruh kenaikan suhu sebagai berikut:



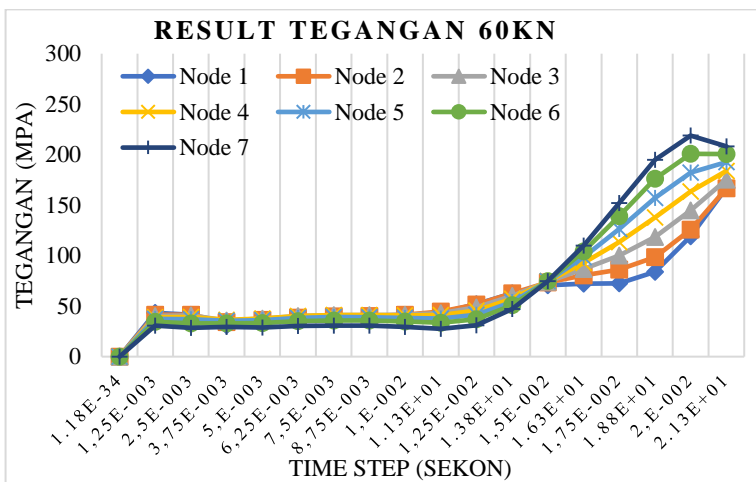
**Gambar 4. 14 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.14 dapat dilihat bahwa adanya pengaruh kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat

tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 737.5% (tujuh kali lipat) pada beban *impact* 50kN. Profil grafik selisih kenaikan nilai tegangan memiliki trend yang sama. Menunjukkan trend yang sama dengan beban *impact* 60kN, 70kN, 80kN, dan 90kN namun berbeda dengan grafik perbandingan nilai tegangan maksimum akibat beban *impact* dengan pengaruh kenaikan suhu dengan beban *impact* 30kN pada gambar 4.10 yang memiliki grafik dengan trend yang berbeda.

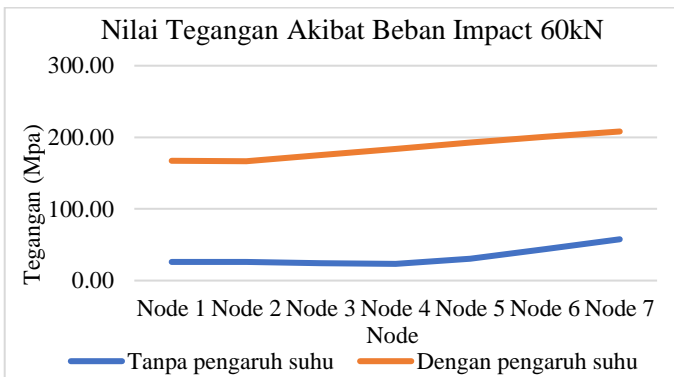
#### f. Tegangan Von Mises Akibat Beban *Impact* 60kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu

Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Namun dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:



**Gambar 4. 15 Time history Tegangan Von Mises Vs Waktu Untuk Beban *Impact* 60kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.15 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan hingga mencapai nilai maksimum. Kemudian nilai tegangan mengalami penurunan. Nilai tegangan maksimum yang terjadi dengan beban *impact* 60kN sebesar 218.87Mpa pada *node* 7 dan terendah sebesar 166.6Mpa pada *node* 2. Dari gambar 4.15 terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada *node* 7 memiliki nilai maksimum dan minimum ketika grafik mengalami kenaikan atau penurunan nilai yang signifikan. Memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan *node* 1. Sedangkan *node* 4 memiliki nilai tengah di antara keduanya. Hal ini berhubungan linier dengan letak *node* seperti pada gambar 4.1 di mana *node* 1 terletak paling atas dan *node* 7 terletak di bagian paling bawah. Hal tersebut terjadi pada tiga waktu yaitu 2.0e-002 sekon. Diluar waktu tersebut besarnya tegangan yang terjadi pada ketujuh *node* dengan beban *impact* 60kN memiliki besar tegangan dengan selisih yang kecil. Hal tersebut dapat dilihat dari garis yang saling berimpit pada gambar 4.15. Untuk nilai tegangan akibat beban *impact* yang didapatkan ketika tanpa pengaruh kenaikan suhu dan dengan adanya pengaruh kenaikan suhu sebagai berikut:

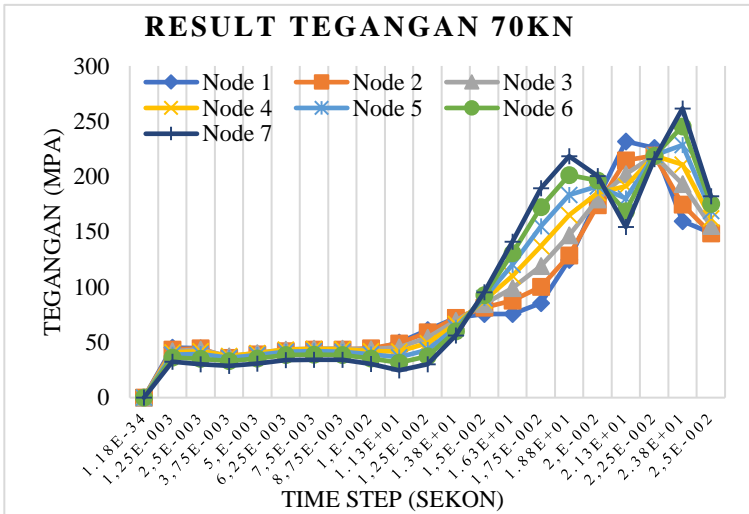


**Gambar 4. 16 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.16 dapat dilihat bahwa adanya pengaruh kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 505.9% (lima kali lipat) pada beban *impact* 60kN. Profil grafik selisih kenaikan nilai tegangan memiliki trend yang sama. Menunjukkan trend yang sama dengan beban *impact* 70kN, 80kN, dan 90kN namun berbeda dengan grafik perbandingan nilai tegangan maksimum akibat beban *impact* dengan pengaruh kenaikan suhu dengan beban *impact* 30kN pada gambar 4.10 yang memiliki grafik dengan trend yang berbeda.

#### **g. Tegangan Von Misses Akibat Beban *Impact* 70kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Namun dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:

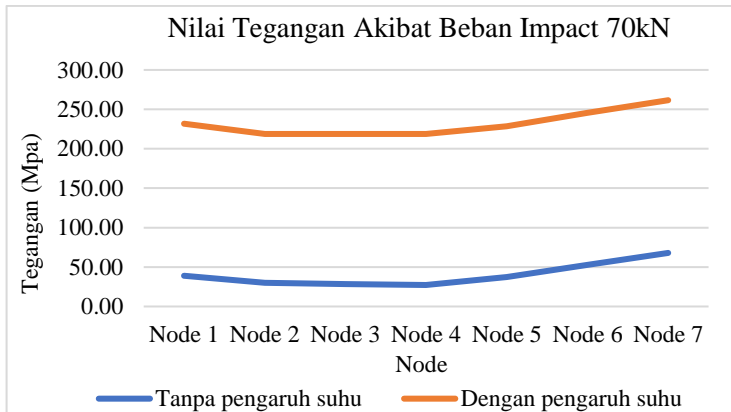


**Gambar 4. 17 Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban Impact 70kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.17 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan namun tidak beraturan hingga mencapai nilai maksimum. Kemudian nilai tegangan mengalami penurunan. Nilai tegangan maksimum yang terjadi dengan beban *impact* 70kN sebesar 261.6Mpa pada *node* 7 dan terendah sebesar 218.8Mpa pada *node* 4. Dari gambar 4.17 terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada *node* 7 memiliki nilai maksimum dan minimum ketika grafik mengalami kenaikan atau penurunan nilai yang signifikan. Memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan *node* 1. Sedangkan *node* 4 memiliki nilai tengah di antara keduanya. Hal ini berhubungan linier dengan letak *node* seperti pada gambar 4.1 di mana *node* 1 terletak paling atas dan *node* 7 terletak di bagian paling bawah. Hal tersebut terjadi pada tiga waktu yaitu 1.25e+01, 1.75e+01, 2.13e+01 dan di akhir waktu proses 2.38e+01 sekon. Diluar waktu tersebut besarnya tegangan



yang terjadi pada ketujuh *node* dengan beban *impact* 70kN memiliki besar tegangan dengan selisih yang kecil. Hal tersebut dapat dilihat dari garis yang saling berimpit pada gambar 4.17. Untuk nilai tegangan akibat beban *impact* yang didapatkan ketika tanpa pengaruh kenaikan suhu dan dengan adanya pengaruh kenaikan suhu sebagai berikut:



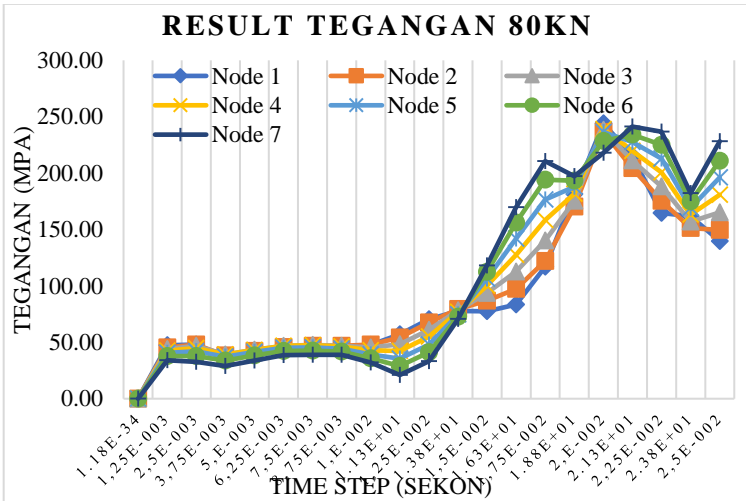
**Gambar 4. 18 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.18 dapat dilihat bahwa adanya pengaruh kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 521.4% (lima kali lipat) pada beban *impact* 70kN. Profil grafik selisih kenaikan nilai tegangan memiliki trend yang sama. Menunjukkan trend yang sama dengan beban *impact* 80kN dan 90kN namun berbeda dengan grafik perbandingan nilai tegangan maksimum akibat beban *impact* dengan pengaruh

kenaikan suhu dengan beban *impact* 30kN pada gambar 4.10 yang memiliki grafik dengan trend yang berbeda.

**h. Tegangan Von Misses Akibat Beban *Impact* 80kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu**

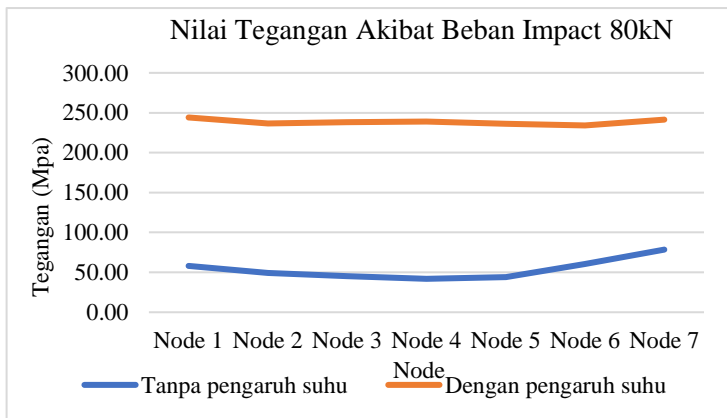
Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Namun dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:



**Gambar 4. 19 Time history Tegangan Von Misses Vs Waktu Untuk Beban *Impact* 80kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.19 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan namun tidak beraturan hingga mencapai nilai maksimum. Kemudian nilai tegangan mengalami penurunan. Nilai tegangan maksimum yang terjadi dengan beban *impact* 80kN sebesar 244.09Mpa pada *node* 1

disusul tegangan pada *node* 7 sebesar 241.25Mpa dan terendah sebesar 234.11Mpa pada *node* 6. Dari gambar 4.19 terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada *node* 7 memiliki nilai maksimum dan minimum ketika grafik mengalami kenaikan atau penurunan nilai yang signifikan. Memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan *node* 1. Sedangkan *node* 4 memiliki nilai tengah di antara keduanya. Hal ini berhubungan linier dengan letak *node* seperti pada gambar 4.1 di mana *node* 1 terletak paling atas dan *node* 7 terletak di bagian paling bawah. Hal tersebut terjadi pada tiga waktu yaitu  $1.13e+01$ ,  $1.63e+01$ , dan di akhir waktu proses 0.025 sekon. Diluar waktu tersebut besarnya tegangan yang terjadi pada ketujuh *node* dengan beban *impact* 80kN memiliki besar tegangan dengan selisih yang kecil. Hal tersebut dapat dilihat dari garis yang saling berimpit pada gambar 4.19. Untuk nilai tegangan akibat beban *impact* yang didapatkan ketika tanpa pengaruh kenaikan suhu dan dengan adanya pengaruh kenaikan suhu sebagai berikut:

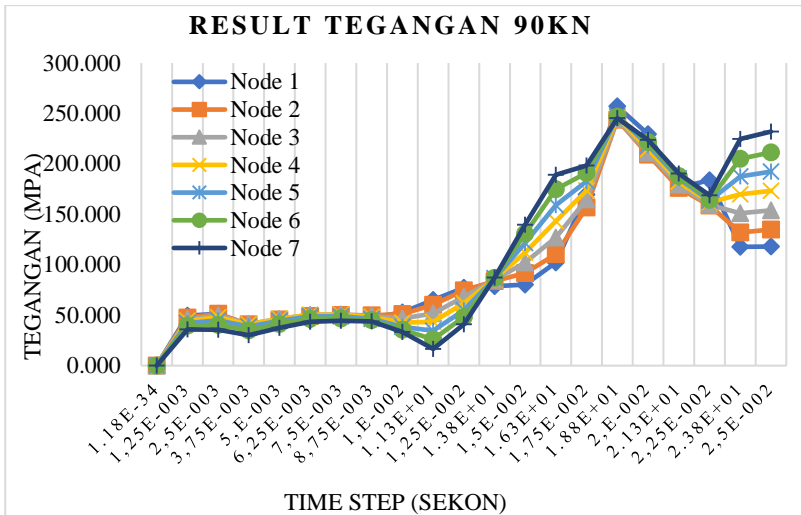


**Gambar 4. 20 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada *node* akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.20 dapat dilihat bahwa adanya pengaruh kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 361.7% (tiga kali lipat) pada beban *impact* 80kN. Profil grafik selisih kenaikan nilai tegangan memiliki trend yang sama. Menunjukkan trend yang sama dengan beban *impact* 60kN, 70kN, dan 90kN namun berbeda dengan grafik perbandingan nilai tegangan maksimum akibat beban *impact* dengan pengaruh kenaikan suhu dengan beban *impact* 30kN pada gambar 4.10 yang memiliki grafik dengan trend yang berbeda.

#### **i. Tegangan Von Misses Akibat Beban *Impact* 90kN Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu**

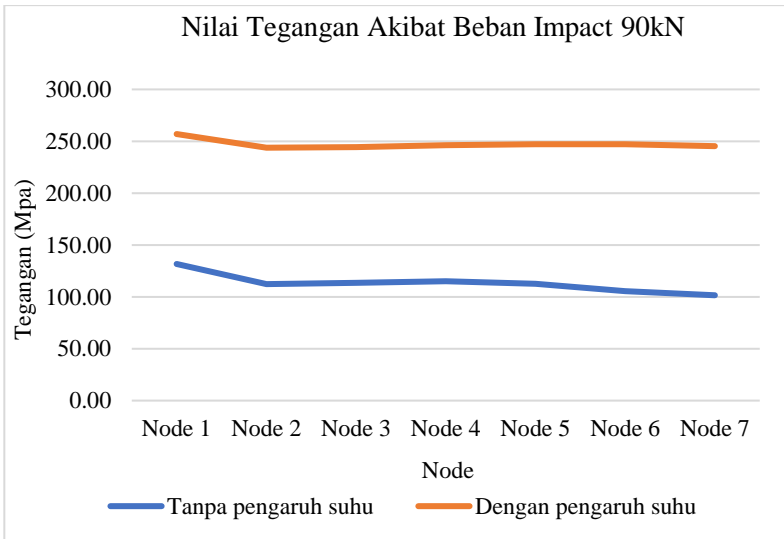
Tegangan yang terjadi akibat beban *impact* memiliki hubungan yang linier. Dengan adanya penambahan pengaruh kenaikan suhu besarnya tegangan memiliki nilai yang berbeda. Besarnya tegangan akibat beban *impact* dengan kenaikan suhu sebagai berikut:



**Gambar 4. 21 Time history Tegangan Von Mises Vs Waktu Untuk Beban Impact 90kN Dengan Adanya Penerapan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Dari gambar 4.21 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi cenderung terus mengalami kenaikan namun tidak beraturan hingga mencapai nilai maksimum. Kemudian nilai tegangan mengalami penurunan (lebih detail grafik pada Lampiran F). besarnya tegangan maksimum dengan beban *impact* 90kN sebesar 256.980Mpa pada *node* 1 dan nilai terendah sebesar 243.81Mpa pada *node* 2. Dari gambar 4.21 terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada *node* 7 memiliki nilai maksimum dan minimum ketika grafik mengalami kenaikan atau penurunan nilai yang signifikan. Memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan *node* 1. Sedangkan *node* 4 memiliki nilai tengah di antara keduanya. Hal ini berhubungan linier dengan letak *node* seperti pada gambar 4.1 di mana *node* 1 terletak paling atas dan *node* 7 terletak di bagian paling bawah. Hal tersebut terjadi pada tiga waktu yaitu 1.13e+01, 1.63e+01, dan di akhir waktu proses 0.025 sekon. Diluar waktu tersebut besarnya tegangan yang terjadi pada ketujuh *node* dengan

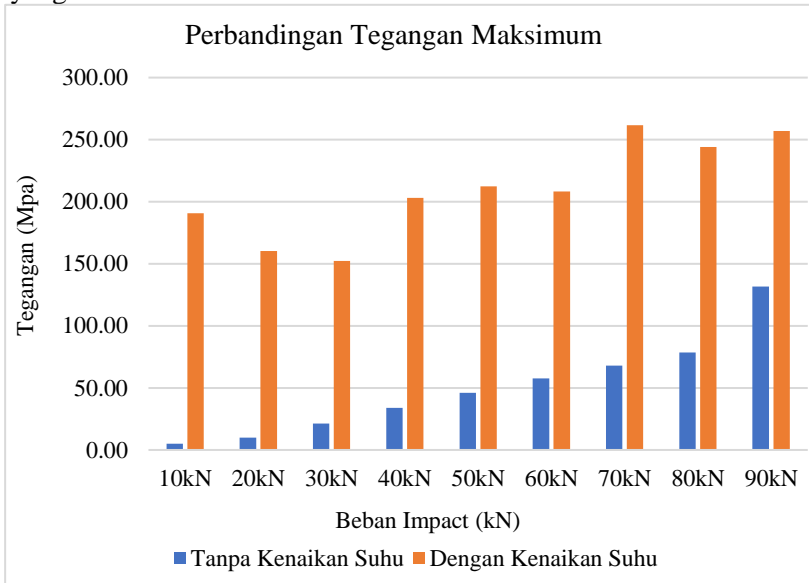
beban *impact* 90kN memiliki besar tegangan dengan selisih yang kecil. Hal tersebut dapat dilihat dari garis yang saling berimpit pada gambar 4.21. Untuk nilai tegangan akibat beban *impact* yang didapatkan ketika tanpa pengaruh kenaikan suhu dan dengan adanya pengaruh kenaikan suhu sebagai berikut:



**Gambar 4. 22 Perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada node akibat beban *impact* tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu dan dengan pengaruh kenaikan suhu**

Dari gambar 4.22 dapat dilihat bahwa adanya pengaruh kenaikan suhu memberikan pengaruh terhadap tegangan yang terjadi akibat beban *impact*. Pada saat rel mendapatkan pengaruh kenaikan suhu tanpa adanya beban *impact* yang diberikan terdapat tegangan yang terjadi. Dengan adanya beban *impact* yang diberikan maka besarnya tegangan yang terjadi akan lebih besar. Rata-rata besarnya tegangan akibat adanya kenaikan suhu mengalami kenaikan 119.5% (dua kali lipat) pada beban *impact* 90kN. Profil grafik selisih kenaikan nilai tegangan memiliki trend

yang sama seperti pada beban *impact* 60kN, 70kN, dan 80kN. Ini berbeda dengan grafik perbandingan nilai tegangan maksimum akibat beban *impact* dengan pengaruh kenaikan suhu dengan beban *impact* 30kN pada gambar 4.10 yang memiliki grafik dengan trend yang berbeda.



**Gambar 4. 23 perbandingan nilai tegangan maksimum akibat beban *impact***

Dari beberapa hasil yang telah dijelaskan pada sub bab 4.1.1 dan 4.1.2 dapat digambarkan rangkuman dari hasilnya seperti pada gambar 4.23 dimana selisih nilai tegangan maksimum mengalami penurunan seiring naiknya beban *impact* yang diberikan. Dimana semakin besar beban *impact* yang diberikan maka kenaikan tegangan *impact* yang terjadi semakin kecil. Hal ini dapat terjadi karena tegangan awal yang terjadi terlalu kecil saat beban *impact* 10kN. Sedangkan pada beban *impact* 90kN tegangan awal yang terjadi sudah memiliki nilai yang besar sehingga saat mendapat pengaruh kenaikan suhu tidak terjadi kenaikan nilai tegangan yang signifikan.

## **4.2 Analisa Tegangan Akibat Beban *Impact* Model Satu Layer**

Analisa yang pertama dilakukan dengan menggunakan model rel kereta api yang memiliki susunan *support* tiga *layer* yang menggambarkan *pad and clip, ballast, dan sleeper*. Dimana dimensi untuk menggambarkan *support* tersebut memiliki dimensi yang lebih kecil. Untuk mendapatkan beban yang sesungguhnya maka dilakukan perubahan nilai densitas. Sehingga di dapatkan hasil simulasi berupa nilai tegangan yang akan di bahas pada sub bab 4.1.1 dan 4.1.2 dengan memberikan beban *impact* sebesar 10-90kN dengan kenaikan suhu 38-90<sup>0</sup>C. kemudian di lanjutkan dengan analisa menggunakan model susunan *support* satu *layer*. Analisa dengan model satu *layer* dilakukan karena dalam pelaksanaan simulasi menggunakan model susunan *support* tiga *layer* dengan beban *impact* di atas 90kN memiliki nilai *energy error* yang melebihi batas nilai *error* sehingga *computer* tidak dapat memproses simulasi. Untuk mengatasi masalah tersebut dilakukan penyederhanaan susunan *support* sehingga simulasi dengan beban *impact* 50-450kN pada kenaikan suhu 38-50<sup>0</sup>C dapat dilakukan.

### **4.2.1 Analisa Tegangan Akibat Kenaikan Beban *Impact* Pada *Node* Dengan Model Rel Kereta Api Satu *Layer* Tanpa Pengaruh Kenaikan Suhu**

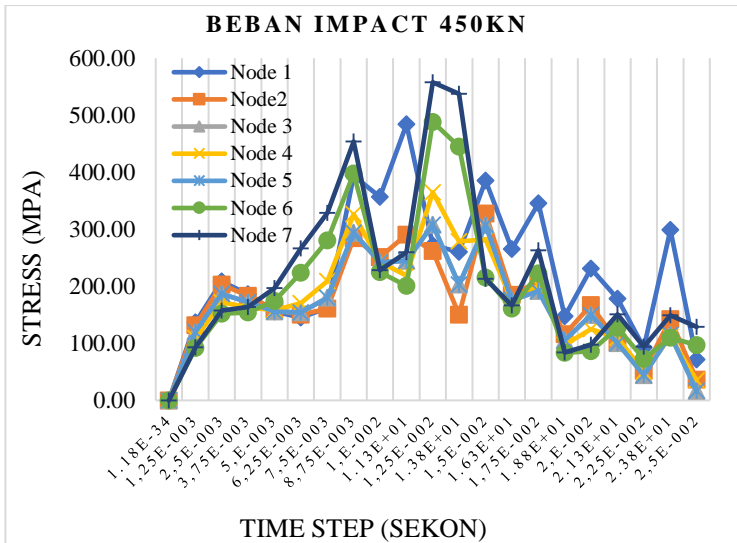
Pada simulasi tiga *layer* dilakukan analisa tegangan yang terjadi pada *node-node* rel kereta api terhadap beban *impact* 10-90kN tanpa dan dengan adanya pengaruh kenaikan suhu. Beban yang dapat diberikan hanya sebesar 10-90kN karena *computer* tidak dapat memproses simulasi. Pada rencana awal beban *impact* yang diberikan yaitu sebesar 50-450kN mengacu pada penelitian sebelumnya oleh **Ade Irma Yunita (2008)**. Dikarenakan 50-450kN merupakan rentang nilai beban *impact* aman hingga roda perlu diganti dilihat dari besarnya beban *impact* yang terjadi akibat ketidaksindrisan roda. Namun pada pelaksanaanya peneliti mengalami masalah dengan proses running dimana beban *impact* 100-450kN tidak dapat diselesaikan karena beban yang diberikan terlalu besar sehingga menyebabkan *computer* memiliki nilai *error*



yang besar dan tidak dapat memprosesnya. Maka diambil beban *impact* sebesar 10-90kN untuk melihat besarnya tegangan yang terjadi. Karena tujuan dari penelitian ini untuk melihat pengaruh kenaikan suhu terhadap perubahan tegangan yang terbaca akibat beban *impact*, maka di anggap perubahan besarnya beban *impact* yang diberikan tidak mengubah dari tujuan utama penelitian ini dilakukan. Namun setelah dilakukan analisa mengenai selisih nilai tegangan yang didapatkan diketahui semakin besar beban *impact* yang diberikan maka kenaikan nilai tegangan tanpa dan dengan pengaruh kenaikan suhu memiliki nilai yang semakin kecil. Maka dilakukan simulasi lebih lanjut dengan beban *impact* 50-450kN dengan kenaikan suhu 38-50°C yang merupakan rentang suhu ekstrim yang mungkin terjadi pada rel di Indonesia. Agar dapat diproses pada *computer* maka dilakukan perubahan susunan *support* untuk meringankan beban proses *running* pada *computer*.

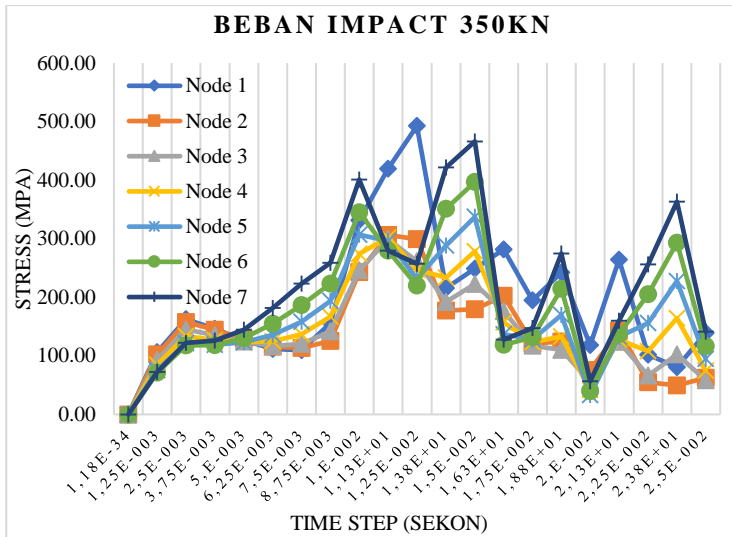
**a. Analisa Tegangan Maksimum Dengan Variasi Letak Node Akibat Beban Impact**

Dari gambar 4.24 menunjukkan *time history* tegangan *von misses* untuk beban *impact* 450kN dengan skala nilai maksimum sumbu y 600Mpa untuk melihat lebih jelas nilai tegangan yang terjadi. Dari gambar tersebut dapat terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada tiap *node* memiliki nilai yang berbeda. Pada beban *impact* 450kN nilai tegangan maksimum terbesar terjadi pada *node* 7 sebesar 557.8 Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node* 3 sebesar 308.2Mpa. Dari gambar 4.24 terlihat bahwa grafik mengalami fluktuasi yang lebih banyak di dibandingkan dengan tegangan yang terjadi pada model dengan tiga *layer*. Ini dapat terjadi dikarenakan nilai redaman yang lebih kecil yaitu hanya mendapatkan redaman dari adanya *pad and clip* sedangkan pada tiga *layer* mendapatkan redaman dari *pad and clip, ballast* dan *sleeper*.



**Gambar 4. 24 Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh *node* akibat beban *impact* 450kN pada model satu *layer support***

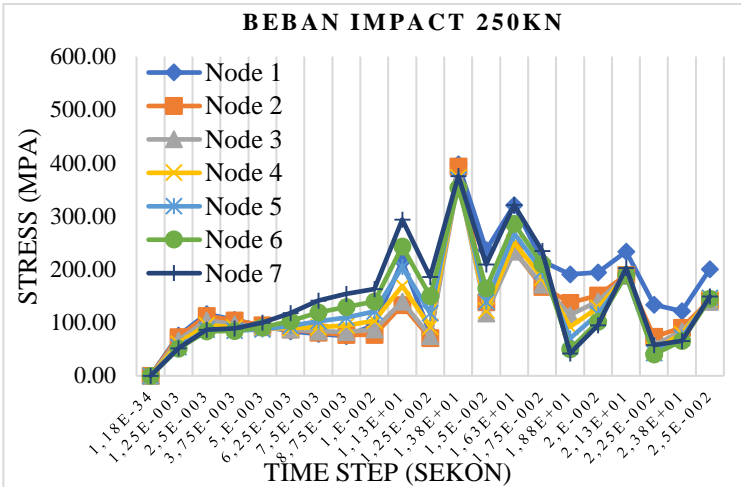
Dari gambar 4.25 dapat dilihat besarnya tegangan yang terjadi akibat beban *impact* 350kN dengan model satu *layer* susunan *support*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pola nilai tegangan yang terjadi memiliki kesamaan dengan pola nilai tegangan 450kN. Namun nilai tegangan maksimum terbesar yang terjadi pada *node* memiliki nilai lebih rendah dari beban *impact* 450kN yaitu sebesar 492.4 Mpa yang terjadi pada *node* 1 dan nilai tegangan maksimum terendah sebesar 299.1Mpa yang terjadi pada *node* 3. Letak tegangan maksimum yang berbeda antara beban *impact* 450kN dan 350kN memiliki sifat yang sama pada hasil tegangan akibat beban *impact* dengan model 3 *layer*. Dimana tegangan maksimum dapat terjadi pada *node* 1 dan 7. Dan nilai tegangan minimum terjadi pada *node* di antara *node* 1-7.



**Gambar 4. 25 Grafik Time history Tegangan Von Misses pada tujuh *node* akibat beban *impact* 350kN pada model satu *layer support***

Dari gambar 4.26 dapat dilihat besarnya tegangan yang terjadi akibat beban *impact* 250kN dengan model satu *layer* susunan *support*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pola nilai tegangan yang terjadi memiliki perbedaan dengan pola nilai tegangan 350kN dan 450kN. Dan fluktuasi yang terjadi mengalami pengurangan. Ini dapat terjadi dikarenakan besarnya beban *impact* yang diberikan semakin kecil. Namun nilai tegangan maksimum terbesar yang terjadi pada *node* memiliki nilai lebih rendah dari beban *impact* 350kN dan 450kN yaitu sebesar 397.8Mpa yang terjadi pada *node* 1 dan nilai tegangan maksimum terendah sebesar 352.96Mpa yang terjadi pada *node* 6. Letak tegangan maksimum yang berbeda antara beban *impact* 450kN, 350kN dan 250kN memiliki sifat yang sama pada hasil tegangan akibat beban *impact* dengan model 3 *layer*. Dimana tegangan maksimum dapat terjadi pada

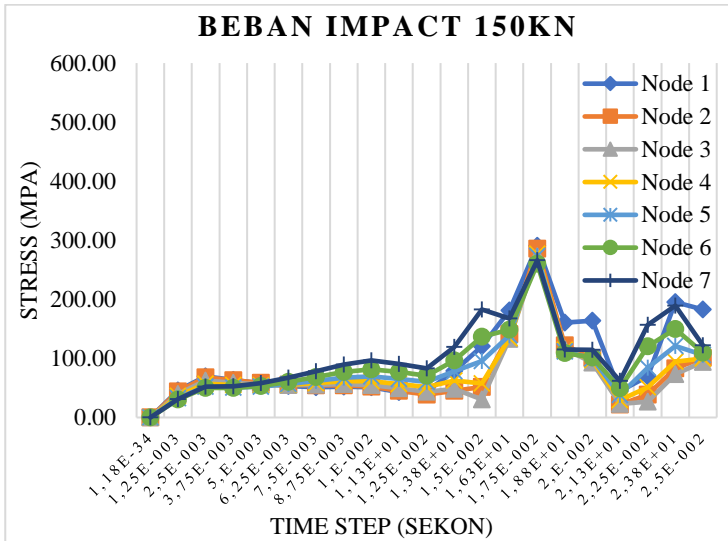
*node* 1 dan 7. Dan nilai tegangan minimum terjadi pada *node* di antara *node* 1-7.



**Gambar 4. 26 Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh *node* akibat beban *impact* 250kN pada model satu layer support**

Dari gambar 4.27 dapat dilihat besarnya tegangan yang terjadi akibat beban *impact* 150kN dengan model satu *layer* susunan *support*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pola nilai tegangan yang terjadi memiliki perbedaan dengan pola nilai tegangan 250kN, 350kN dan 450kN. Dan fluktuasi yang terjadi mengalami pengurangan atau lebih stabil. Ini dapat terjadi dikarenakan besarnya beban *impact* yang diberikan semakin kecil. Namun nilai tegangan maksimum terbesar yang terjadi pada *node* memiliki nilai lebih rendah dari beban *impact* 250kN, 350kN dan 450kN yaitu sebesar 290.79Mpa yang terjadi pada *node* 1 dan nilai tegangan maksimum terendah sebesar 260.09Mpa yang terjadi pada *node* 5. Letak tegangan maksimum yang berbeda antara beban *impact* 450kN, 350kN, 250kN dan 150kN memiliki sifat yang sama pada hasil

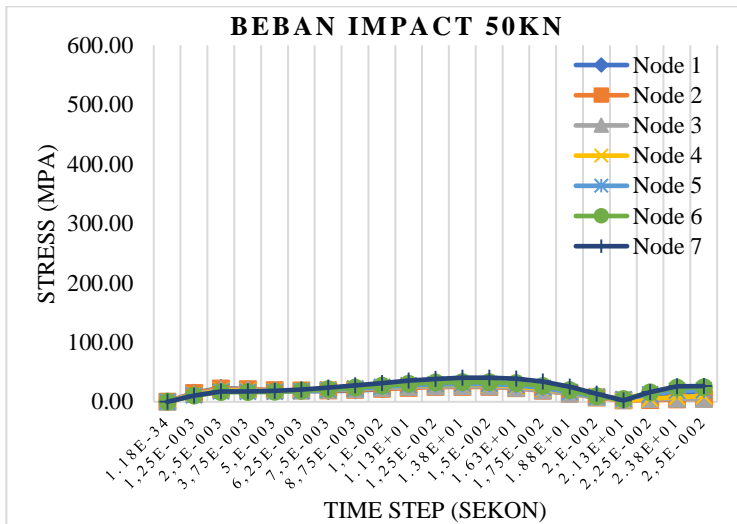
tegangan akibat beban *impact* dengan model 3 *layer*. Dimana tegangan maksimum dapat terjadi pada *node* 1 dan 7. Dan nilai tegangan minimum terjadi pada *node* di antara *node* 1-7.



**Gambar 4. 27 Grafik Time history Tegangan Von Misses pada tujuh *node* akibat beban *impact* 250kN pada model satu *layer support***

Dari gambar 4.28 dapat dilihat besarnya tegangan yang terjadi akibat beban *impact* 50kN dengan model satu *layer* susunan *support*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pola nilai tegangan yang terjadi memiliki perbedaan dengan pola nilai tegangan 150kN, 250kN, 350kN dan 450kN. Dan tidak terjadi fluktuasi yang besar atau lebih stabil. Ini dapat terjadi dikarenakan besarnya beban *impact* yang diberikan semakin kecil. Nilai tegangan maksimum terbesar yang terjadi pada *node* memiliki nilai lebih rendah dari beban *impact* 150kN, 250kN, 350kN dan 450kN yaitu sebesar 40.56Mpa yang terjadi

pada *node* 7 dan nilai tegangan maksimum terendah sebesar 25.10Mpa yang terjadi pada *node* 2. Letak tegangan maksimum yang berbeda antara beban *impact* 450kN, 350kN, 250kN dan 150kN memiliki sifat yang sama pada hasil tegangan akibat beban *impact* dengan model 3 *layer*. Dimana tegangan maksimum dapat terjadi pada *node* 1 dan 7. Dan nilai tegangan minimum terjadi pada *node* di antara *node* 1-7.



**Gambar 4. 28 Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh *node* akibat beban *impact* 250kN pada model satu layer support**

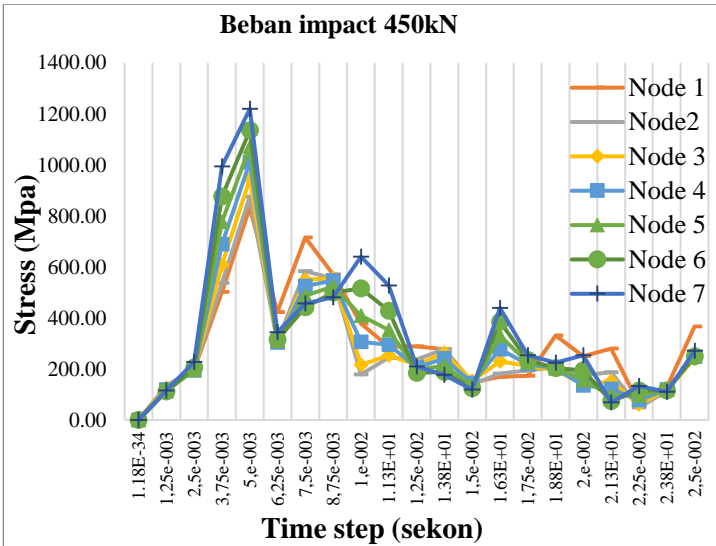
Dari gambar 4.24 hingga gambar 4.28 diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi menurun seiring berkurangnya beban *impact*. Hal ini menunjukkan bahwa beban *impact* dan tegangan *impact* yang ditimbulkan memiliki hubungan yang linier. Semakin besar beban *impact* yang diberikan maka semakin besar tegangan *impact* yang terjadi.

#### **4.2.2 Analisa Tegangan Akibat Kenaikan Beban *Impact* Pada *Node* Dengan Model Rel Kereta Api Satu *Layer* Dengan Pengaruh Kenaikan Suhu**

Setelah dilakukan proses simulasi dengan tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu pada sub bab 4.2.1. dilanjutkan dengan proses simulasi dengan pengaruh kenaikan suhu untuk melihat pengaruh suhu terhadap kenaikan nilai tegangan yang terjadi akibat beban *impact* 50-450kN.

##### **a. Analisa Tegangan Maksimum Dengan Variasi Letak *Node* Akibat Beban *Impact***

Dari gambar 4.29 menunjukkan *time history* tegangan *von mises* untuk beban *impact* 450kN dengan skala nilai maksimum sumbu y 1400Mpa. Dari gambar tersebut dapat terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada tiap *node* memiliki nilai yang berbeda. Pada beban *impact* 450kN nilai tegangan maksimum terbesar terjadi pada *node* 7 sebesar 1219.8Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node* 1 sebesar 832.91Mpa. Dari gambar 4.29 terlihat bahwa grafik mengalami fluktuasi yang lebih banyak di dibandingkan dengan tegangan yang terjadi pada model dengan tiga *layer*. Ini dapat terjadi dikarenakan nilai redaman yang lebih kecil yaitu hanya mendapatkan redaman dari adanya *pad and clip* sedangkan pada tiga *layer* mendapatkan redaman dari *pad and clip, ballast* dan *sleeper*. Dimana pada grafik tersebut nilai tegangan maksimum tercapai pada detik 5,1e+003 sekon yang kemudian mengalami penurunan nilai tegangan.

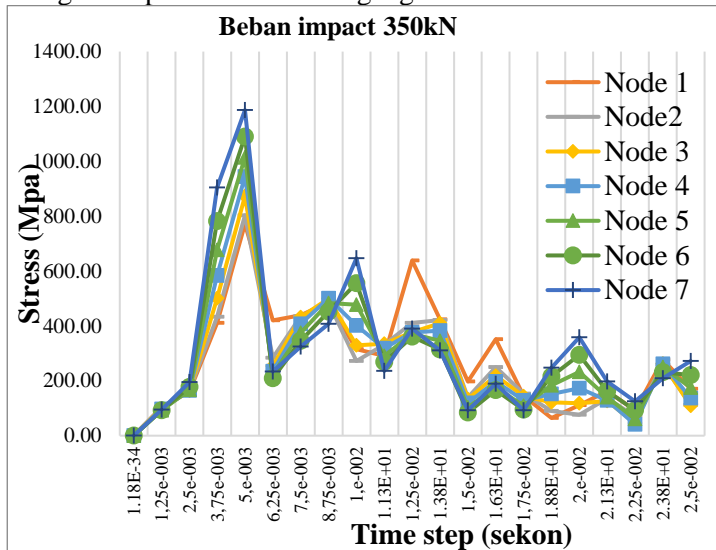


**Gambar 4. 29 Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh node akibat beban *impact* 450kN pada model satu layer support**

Dari gambar 4.30 menunjukkan *time history* tegangan *von misses* untuk beban *impact* 350kN dengan skala nilai maksimum sumbu y 1400Mpa. Dari gambar tersebut dapat terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada tiap *node* memiliki nilai yang berbeda. Pada beban *impact* 350kN nilai tegangan maksimum terbesar terjadi pada *node* 7 sebesar 1186.9Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node* 1 sebesar 771.42Mpa. Dari gambar 4.30 terlihat bahwa grafik mengalami fluktuasi yang lebih banyak di bandingkan dengan tegangan yang terjadi pada model dengan tiga *layer*. Ini dapat terjadi dikarenakan nilai redaman yang lebih kecil yaitu hanya mendapatkan redaman dari adanya *pad and clip* sedangkan pada tiga *layer* mendapatkan redaman dari *pad and clip, ballast* dan *sleeper*. Dimana pada grafik tersebut nilai tegangan



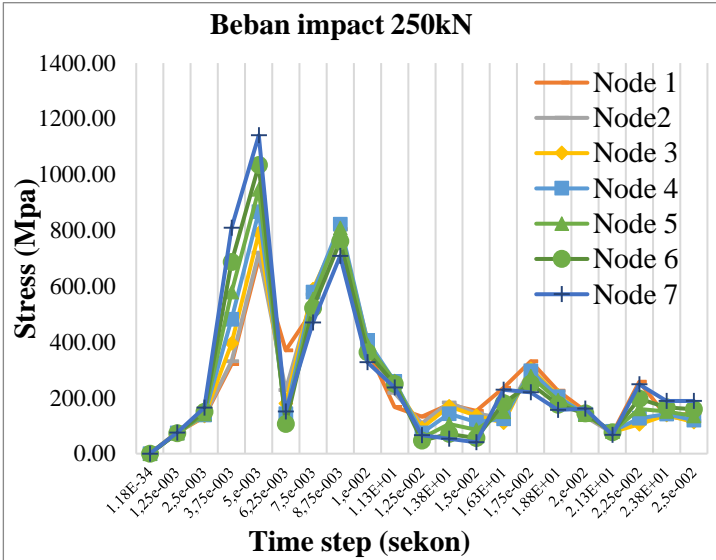
maksimum tercapai pada detik  $5,1e+003$  sekon yang kemudian mengalami penurunan nilai tegangan.



**Gambar 4.30** Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh *node* akibat beban *impact* 350kN pada model satu *layer support*

Dari gambar 4.31 menunjukkan *time history* tegangan *von misses* untuk beban *impact* 250kN dengan skala nilai maksimum sumbu y 1400Mpa. Dari gambar tersebut dapat terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada tiap *node* memiliki nilai yang berbeda. Pada beban *impact* 250kN nilai tegangan maksimum terbesar terjadi pada *node* 7 sebesar 1141.1Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node* 2 sebesar 768.57Mpa. Dari gambar 4.31 terlihat bahwa grafik mengalami fluktuasi yang lebih banyak di bandingkan dengan tegangan yang terjadi pada model dengan tiga *layer*. Ini dapat terjadi dikarenakan nilai redaman yang lebih kecil yaitu hanya mendapatkan redaman dari adanya *pad and clip* sedangkan pada tiga *layer* mendapatkan redaman dari *pad and clip*,

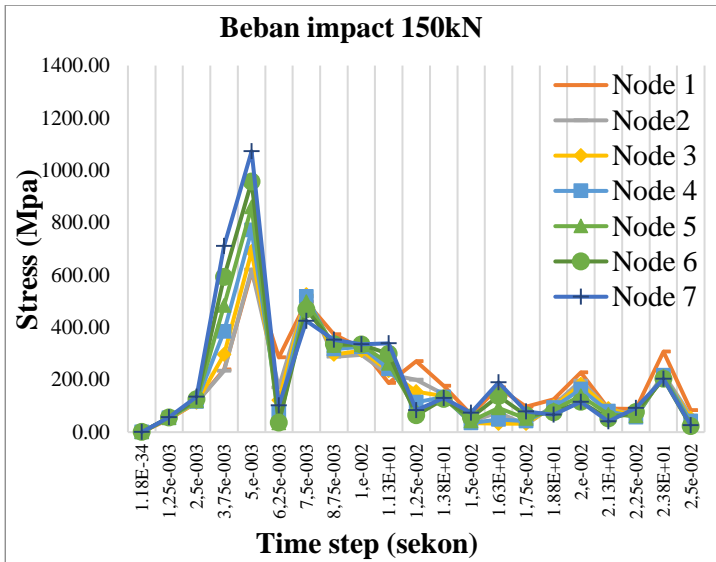
*ballast* dan *sleeper*. Dimana pada grafik tersebut nilai tegangan maksimum tercapai pada detik  $5,1e+003$  sekon yang kemudian mengalami penurunan nilai tegangan.



**Gambar 4. 31 Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh *node* akibat beban *impact* 250kN pada model satu layer support**

Dari gambar 4.32 menunjukkan *time history* tegangan *von mises* untuk beban *impact* 150kN dengan skala nilai maksimum sumbu y 1400Mpa. Dari gambar tersebut dapat terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada tiap *node* memiliki nilai yang berbeda. Pada beban *impact* 150kN nilai tegangan maksimum terbesar terjadi pada *node* 7 sebesar 1072.6Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node* 1 sebesar 610.91Mpa. Dari gambar 4.32 terlihat bahwa grafik mengalami fluktuasi yang lebih banyak di dibandingkan dengan tegangan yang terjadi pada model dengan tiga *layer*. Ini dapat terjadi dikarenakan nilai redaman yang lebih kecil yaitu hanya

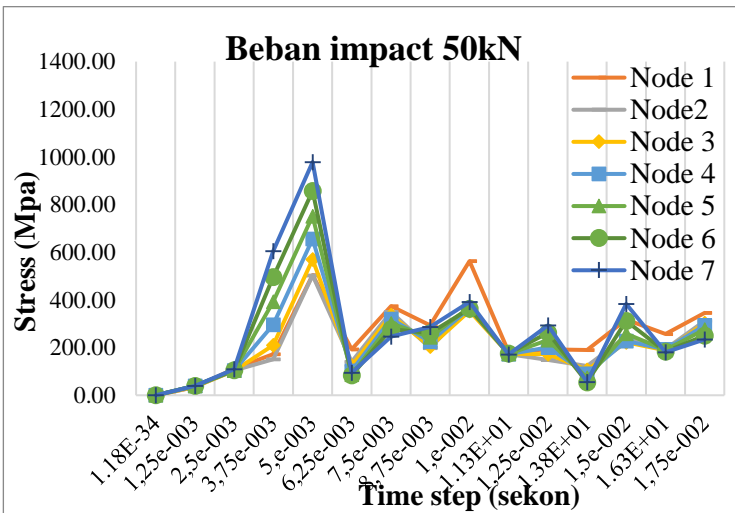
mendapatkan redaman dari adanya *pad and clip* sedangkan pada tiga *layer* mendapatkan redaman dari *pad and clip*, *ballast* dan *sleeper*. Dimana pada grafik tersebut nilai tegangan maksimum tercapai pada detik  $5,1e+003$  detik yang kemudian mengalami penurunan nilai tegangan.



**Gambar 4.32** Grafik Time history Tegangan Von Mises pada tujuh *node* akibat beban *impact* 150kN pada model satu layer support

Dari gambar 4.33 menunjukkan *time history* tegangan *von misses* untuk beban *impact* 150kN dengan skala nilai maksimum sumbu y 1400Mpa. Dari gambar tersebut dapat terlihat besarnya tegangan yang terjadi pada tiap *node* memiliki nilai yang berbeda. Pada beban *impact* 150kN nilai tegangan maksimum terbesar terjadi pada *node* 7 sebesar 978.49Mpa dan nilai tegangan terendah pada *node* 1 sebesar 503.21Mpa. Dari gambar 4.33 terlihat bahwa grafik mengalami fluktuasi yang lebih banyak di dibandingkan dengan

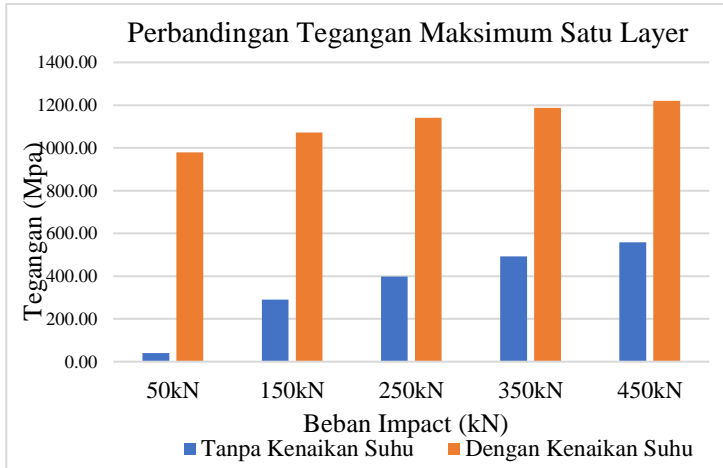
tegangan yang terjadi pada model dengan tiga *layer*. Ini dapat terjadi dikarenakan nilai redaman yang lebih kecil yaitu hanya mendapatkan redaman dari adanya *pad and clip* sedangkan pada tiga *layer* mendapatkan redaman dari *pad and clip, ballast and sleeper*. Dimana pada grafik tersebut nilai tegangan maksimum tercapai pada detik  $5,1e+003$  sekon yang kemudian mengalami penurunan nilai tegangan.



**Gambar 4. 33 Grafik Time history Tegangan Von Misses pada tujuh *node* akibat beban *impact* 150kN pada model satu layer support**

Dari grafik tegangan pada gambar 4.29 hingga gambar 4.33 didapatkan hasil bahwa besarnya nilai tegangan yang terjadi mengalami kenaikan ketika mendapat pengaruh suhu dan besarnya tegangan juga meningkat seiring bertambahnya besarnya beban *impact*. Maka diketahui bahwa besarnya tegangan yang terjadi akibat beban *impact* dengan pengaruh kenaikan suhu memiliki hubungan yang linier, sama dengan tanpa adanya pengaruh kenaikan suhu. Untuk melihat besarnya

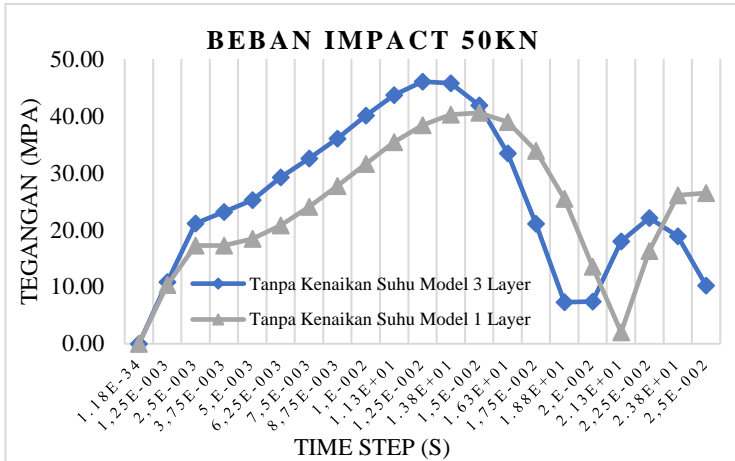
kenaikan nilai tegangan tanpa dan dengan adanya pengaruh kenaikan suhu dapat dilihat pada gambar 4.34 berikut :



**Gambar 4. 34 Melihat kenaikan nilai tegangan akibat beban *impact* dengan model susunan support satu layer**

Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besarnya beban *impact* yang diberikan maka besarnya kenaikan tegangan akibat beban *impact* tanpa dan dengan kenaikan suhu terus mengalami penurunan. Pada beban *impact* 150kN-450kN besarnya kenaikan tegangan *impact* yang terjadi 2 hingga 3 kali lipat tegangan awal sedangkan pada beban *impact* 50kN mengalami kenaikan 21 kali lipat tegangan awal. Karena tegangan awal yang besar menyebabkan kenaikan yang tidak signifikan. Dimana pada beban *impact* 10-90kN mengalami kenaikan 2-30 kali lipat tegangan awal karena tegangan awal yang kecil pada beban *impact* 10kN. Jika diperhatikan besarnya tegangan yang terjadi lebih besar pada model satu layer dibandingkan pada tiga layer karena besarnya beban *impact* yang diberikan lebih besar. Untuk melihat hal tersebut

dapat dilakukan perbandingan nilai tegangan pada beban *impact* 50kN sebagai berikut:



**Gambar 4.35** Melihat kenaikan nilai tegangan akibat beban *impact* dengan model susunan support satu layer

Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa pada beban *impact* 50kN dengan variasi susunan support satu dan tiga layer memiliki nilai yang mendekati. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya dimana dengan perbedaan model layer menghasilkan nilai tegangan yang sama. Namun dalam penelitian ini tidak menghasilkan nilai yang mendekati. Terlihat pada gambar 4.35 nilai tegangan akibat beban *impact* pada garis abu-abu dan biru saling berimpitan. Nilai tegangan maksimum tanpa ada pengaruh kenaikan suhu model 3 layer 46.05Mpa dan dengan model 1 layer 40.56Mpa.

#### 4.3 Diskusi Hasil dengan Penelitian Terdahulu

Dengan dilakukan penelitian untuk melihat pengaruh adanya kenaikan suhu terhadap besarnya perubahan nilai tegangan yang terjadi. Pada tabel berikut merupakan nilai tegangan terbesar yang

terjadi pada setiap beban *impact* yang diberikan beserta letak tegangan maksimum terjadi.

**Tabel 4. 2 Rangkuman tegangan maksimum akibat beban *impact* 10-90kN**

<i>Impact</i>	Tegangan Maksimum (Mpa)			
	Tanpa Kenaikan Suhu	Letak <i>Node</i>	Dengan Kenaikan Suhu	Letak <i>Node</i>
10kN	5.02	7	190.74	7
20kN	10.01	7	160.29	7
30kN	21.28	7	152.4	7
40kN	33.83	7	202.97	7
50kN	46.05	7	212.4	7
60kN	57.66	7	208.15	7
70kN	67.92	7	261.6	7
80kN	78.49	7	244.09	1
90kN	131.72	1	256.9	1

Dari hasil tersebut kemudian dilakukan komparasi hasil dengan penelitian sebelumnya. Salah satunya dengan penelitian Bian (2013) yang didapatkan grafik seperti gambar 4.29 berikut:

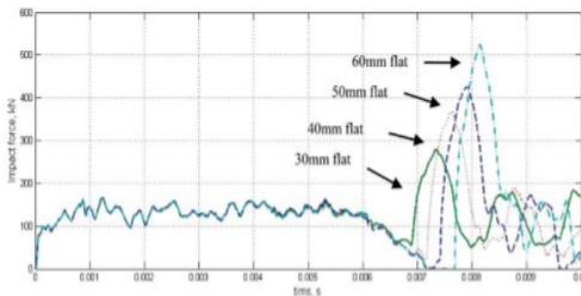


Figure 8. Wheel-rail impact forces induced by 30, 40, 50 and 60 mm wheel flats.

**Gambar 4. 36 Hasil penelitian Bian (2013)**

Dengan melakukan komparasi dari kedua hasil tersebut dengan asumsi bahwa kedua penelitian tersebut memiliki parameter yang sama. Didapatkan dari penelitian bian bahwa dengan flat roda 30mm mengakibatkan beban *impact* 260-280kN. Pada penelitian yang dilakukan peneliti menggunakan beban *impact* 90kN didapatkan nilai tegangan 131.72Mpa dan dengan pengaruh kenaikan suhu didapatkan nilai tegangan 256.9kN. Jika dari nilai 90kN tersebut dilakukan analisa untuk mengetahui besar *flat* yang mungkin terjadi dengan meninjau hasil dari Bian di dapatkan besarnya flat yang mungkin terjadi 1-2mm. Sehingga diketahui pada cacat roda *flat* 1-2mm dapat menyebabkan beban *impact* 90kN. Dari beban *impact* 90kN tersebut mengakibatkan tegangan *impact* 131.72Mpa dan jika dengan pengaruh kenaikan suhu mengakibatkan nilai tegangan 256.9Mpa.

**Tabel 4. 3 Rangkuman tegangan maksimum akibat beban *impact* 10-90kN**

<i>Impact</i>	Tegangan Maksimum (Mpa)			
	Tanpa Kenaikan Suhu	Letak <i>Node</i>	Dengan Kenaikan Suhu	Letak <i>Node</i>
50kN	40.56	7	978.49	7
150kN	290.79	1	1072.6	7
250kN	397.8	1	1141	7
350kN	492.49	1	1186.9	7
450kN	557.81	7	1219.8	7

Pada 450kN tersebut dilakukan analisa untuk mengetahui besar *flat* yang mungkin terjadi dengan meninjau hasil dari Bian di dapatkan besarnya flat yang mungkin terjadi 54mm. Sehingga diketahui pada cacat roda *flat* 54mm dapat menyebabkan beban *impact* 450kN. Dari beban *impact* 450kN tersebut mengakibatkan tegangan *impact* 5578.81Mpa dan jika dengan pengaruh kenaikan suhu mengakibatkan nilai tegangan 1219.8Mpa.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### V.I KESIMPULAN

Dari hasil analisa yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan sisi rel kereta api tempat pemasangan alat ukur (*strain gauge*) memiliki hubungan yang linier dengan beban *impact* yang diberikan, semakin besar beban *impact* yang diberikan maka tegangan *impact* yang terjadi semakin besar. Dengan variasi beban *impact* 10-90kN didapatkan tegangan maksimum terjadi pada *node* 7 dan tegangan minimum terdapat pada *node* 3 (pada beban 10kN, 50kN, 60kN, 70kN, 80kN, dan 90kN) dan pada *node* 2 (pada beban 20kN, 30kN, dan 40kN). Besarnya selisih nilai tegangan maksimum tersebut mengalami kenaikan seiring dengan letak *node* yang semakin ke bawah. Dari hasil tersebut maka pembacaan tegangan pada alat ukur lebih mudah jika peletakan dilakukan pada sisi bagian bawah permukaan rel kereta api. Pada beban *impact* 50-450kN didapatkan tegangan maksimum terjadi pada *node* 7 (450kN dan 50kN) dan *Node* 1 (350kN, 250kN, 150kN) sedangkan tegangan minimum terjadi pada *node* 3 (450kN, 350kN), *node* 2 (50kN), dan *node* 6 (250kN, 150kN)
2. Besarnya tegangan yang terjadi pada *node* -*node* yang dianalisa mengalami kenaikan besarnya tegangan setelah mendapat pengaruh kenaikan suhu. Besarnya kenaikan tegangan pada beban *impact* 10kN sebesar 3005.6%, 20kN sebesar 1407.7%, 30kN sebesar 732.3%, 40kN sebesar 755.8%, 50kN sebesar 737.5%, 60kN sebesar 505.9%, 70kN sebesar 521.4, 80kN sebesar 361.7%, dan pada beban *impact* 90kN sebesar 119.5%. Sedangkan dengan model satu layer pada beban *impact* 50kN sebesar 2194.5%, 150kN sebesar 192.06%, 250kN sebesar 143%,

350kN sebesar 164%, 450kN sebesar 160% sehingga dapat disimpulkan kenaikan nilai tegangan diantara 2-3 kali lipat tegangan awal. Besarnya kenaikan berkurang seiring bertambah besarnya beban *impact* yang diberikan. Dimana besarnya tegangan maksimum dapat terjadi pada *node 1* dan *node 7*. Kenaikan nilai tegangan maksimum ketika tegangan maksimum terjadi pada *node 7* lebih besar dibandingkan dengan kenaikan nilai tegangan ketika tegangan maksimum yang terjadi pada *node 1*.

## V.II SARAN

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya demi kesempurnaan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Sebelum dilakukan *running* sebaiknya melakukan pengecekan kembali data-data yang di masukkan dalam *engineering data* dan *boundary condition* karena proses *running* yang memakan waktu lama membuat kesalahan tidak dapat langsung terlihat
2. Simulasi dilakukan dengan durasi *impact* yang berbeda-beda dengan adanya kenaikan suhu
3. Pemodelan kontak roda dan rel kereta api dibuat mendekati kondisi sesungguhnya dengan memberikan variasi cacat pada roda
4. Melakukan penelitian tegangan yang terjadi pada sisi lain rel kereta api sehingga diketahui perbandingan peletakan *strain gauge* pada sisi lain dari rel kereta api
5. Penelitian selanjutnya dilakukan dengan menambahkan variasi kecepatan kereta sehingga didapatkan hasil yang mendekati keadaan sesungguhnya
6. Dilakukan validasi dinamis model rel kereta api untuk melihat kemampuan defleksi, ekspansi dan tegangan yang terjadi akibat beban *impact*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R.A. Smith, “Railways: how they may contribute to a sustainable future”, *proc.instn Mech. Engrs, Part F:J. Rail and Rapid Transit*, 2003, Vol. 217, 234-248
- [2] Clayton, P., Predicting the wear of rails on curves from laboratory data. *Wear* 181, 1995, 11– 19
- [3] Sumbowo, Hastoro P. 2012. *Evaluasi Sistem Perawatan Jalan Rel Lintas Stasiun Kutoarjo*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- [4] Russian Railways, “History of Railways”, [http://eng.rzd.ru/static/public/en?STRUCTURE\\_ID=4336&layer\\_id=4516&refererLayerId=4516&id=2592](http://eng.rzd.ru/static/public/en?STRUCTURE_ID=4336&layer_id=4516&refererLayerId=4516&id=2592) , diakses pada tanggal 01 Januari 2019.
- [5] Johansson ,A,C,O.Neilson,(2000) “Out of Round railway wheel – a, literature survey, in Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, vol.214, part F,79-91
- [6] Johansson, A .Nielsen,J,C,O.(2003). “Out-of-Round railway Wheel-Wheel-Rail Contact Force and Track Response Derived from Field Test and Numerical Simulations”. *proc.Instn.Mech. Engrs Vol.217part F*.
- [7] Sulistyoadi, Agustian. (2008). “Pengaruh Kekakuan PAD Terhadap Tegangan Dinamk Rel Kereta Api Akibat Beban *Impact*”. Department Mechanical Engineering, Institute Teknologi Sepuluh Nopember.
- [8] Smith, R.A. (2009). “Fatigue in Railway Infrastructure”. Woodhead Publishing. Page 1-19.
- [9] R. Dukupati and R. Dong, *Impact* loads due to wheel flats and shells, *Veh. Syst. Dyn.* 31 (1999), pp. 1–22.
- [10] Komite nasional keselamatan transportasi (KNKT), “laporan kecelakaan kereta api”, [https://knkt.dephub.go.id/knkt/ntsc\\_railway/Report/baru/2009\\_01.pdf](https://knkt.dephub.go.id/knkt/ntsc_railway/Report/baru/2009_01.pdf), diakses pada tanggal 08 Januari 2019.
- [11] Yunita, Ade Irma. (2008). “Analisa Tegangan Dinamik Akibat Beban *Impact* Pada Railweb” Department

Mechanical Engineering, Institute Teknologi Sepuluh Nopember.

- [12] I Made P et al. (2008). “Distribusi Tegangan Kontak Pada Roda akibat Beban *Impact* Ketika Roda Melewati Sambungan Rel dengan Adanya Pergeseran Ujung Rel ke Arah Lateral”. Laboratorium Perancangan Mesin, Jurusan Teknik Mesin ITB.
- [13] Nielsen, J.C.O., Igeland, A. (1995). “Vertical Dynamic Interaction Between Train And Track- Influence Of Wheel And Track Imperfection.” *Journal of Sound and Vibration*, 187(5), 825-829
- [14] Ole, Zayne Kristian. (2008). “Track Stability and Buckling - Rail Stress Management”. Bachelor of Engineering (Civil). University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying
- [15] Minh N Nguyen, Xiaoming Wang, and Chi-Hsiang Wang.(2012).“A reliability assessment of railway track buckling during an extreme heatwave”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.226,Number 5
- [16] M.A. Van. (1996). “Buckling analysis of continuous welded rail track”. Technical University Delft, Department of Civil Engineering, Mechanics and Structures Group, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherland
- [17] Andrew Kish,Ryan S. McWilliams, Harold Harrison. (2011). “ Track Buckling Hazard Detection and Rail Stress Management”. Kandrewh Inc. Consulting Services Peabody, MA, USA
- [18] Anwar Sadat, Mohammad Nurul Misbah. (2012). “Analisa Umur Kelelahan (Fatigue Life) Scantling *Support* Structure Module FSO Cinta Natomas”. *Jurnal Teknik ITS*.
- [19] “Buckling of Track” .[www.eng.dieseloc.ru](http://www.eng.dieseloc.ru) di akses pada tanggal 5 Januari 2019

- [20] “Buckled Rail and Summer Heat”. [www.networkrail.co.uk/running-the-railway-/looking-after-the-railway-/delays-explained/buckled-rail/](http://www.networkrail.co.uk/running-the-railway-/looking-after-the-railway-/delays-explained/buckled-rail/). Diakses pada 5 Januari 2019
- [21] Y Luo, H Yin, C Hua. (1996).” The dynamic response of railway to the action of trains moving at difference speed”. Proc.Instn.Mech. Engrs Vol 210
- [22] Hibbeler,R.C. (2011). “Mechanics of Material”. Pearson Prentice Hall. Page 569-703.
- [23] Bian Jian, Yuantong Gu, dan Martin H.W. (2013). “A dynamic wheel rail *impact* analysis of railway track under wheel flat by finite element”. School of Chemistry, Phisisc and Mechanical Engineering, Queensland University of Technology, Brisbane.
- [24] PT. Bina Sarana Dirgantara.(2007).”Spesifikasi Produk Bantalan Beton Prategang Blok Tunggal Merek SBD”.
- [25] Youshuo Song, Zhonghua Yu.(2013). “Load-Deflection Relations Of T-Section Rails Under Lateral Loads”. Zhejiang University, Institute of Modern Manufacturing Engineering, Hangzhou, China

Halaman ini sengaja dikosongkan

## LAMPIRAN

### Lampiran A

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	V maks (km/jam)	P maks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
					Jarak antar sumbu bantalan (cm)			
I	$> 20 \cdot 10^6$	120	18	R.60/R.54	Beton 60	Elastis Ganda	30	60
II	$10 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6$	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu 60	Elastis Ganda	30	50
III	$5 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6$	100	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 60	Elastis Ganda	30	40
IV	$2,5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$	90	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 60	Elastis Ganda/ Tunggal	25	40
V	$< 2,5 \cdot 10^6$	80	18	R.42	Kayu/Baja 60	Elastis Tunggal	25	35

## Lampiran B

**TABEL MATERIAL PROPERTIES AISI 4000 SERIES  
STELL**

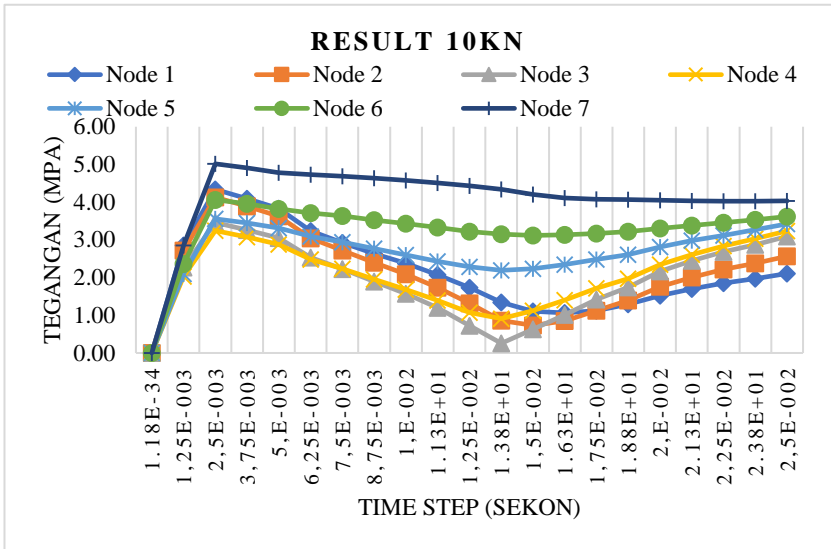
<b>Physical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>	<b>Comments</b>
Density	<u>7.83</u> - <u>7.85</u> g/cc	<u>0.283</u> - <u>0.284</u> lb/in <sup>3</sup>	Average value: 7.85 g/cc Grade Count:602
Particle Size	<u>6.70</u> - <u>12.0</u> Åµm	<u>6.70</u> - <u>12.0</u> Åµm	Average value: 9.27 Åµm Grade Count:12
<b>Mechanical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>	<b>Comments</b>
Hardness, Brinell	121 - 578	121 - 578	Average value: 279 Grade Count:549
Hardness, Knoop	140 - 851	140 - 851	Average value: 315 Grade Count:587
Hardness, Rockwell B	68.0 - 112	68.0 - 112	Average value: 96.3 Grade Count:533
Hardness, Rockwell C	10.0 - 62.5	10.0 - 62.5	Average value: 30.2 Grade Count:525
Hardness, Vickers	36.0 - 818	36.0 - 818	Average value: 304 Grade Count:587
Tensile Strength, Ultimate	<u>450</u> - <u>2290</u> MPa	<u>65300</u> - <u>332000</u> psi	Average value: 1000 MPa Grade Count:545
Tensile Strength, Yield	<u>296</u> - <u>1940</u> MPa	<u>42900</u> - <u>281000</u> psi	Average value: 767 MPa Grade Count:540
Elongation at Break	0.600 - 34.0 %	0.600 - 34.0 %	Average value: 19.0 % Grade Count:543
Reduction	0.200 - 74.4 %	0.200 - 74.4 %	Average value:



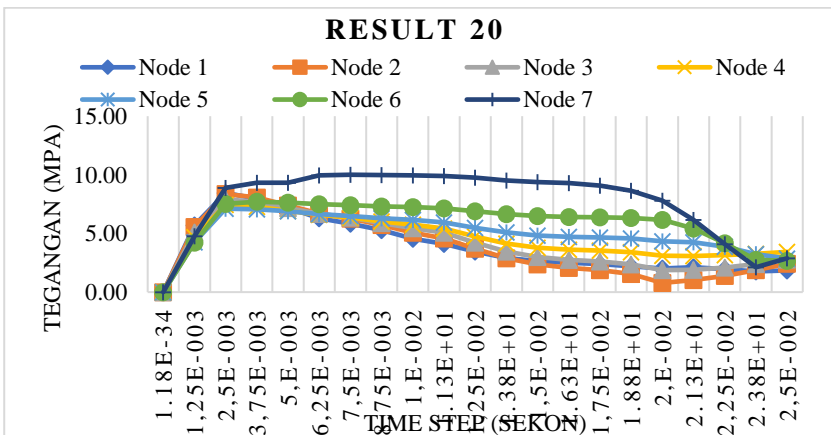
of Area			53.9 % Grade Count:460
Modulus of Elasticity	<u>196 - 219</u> GPa	<u>28400 - 31800</u> - ksi	Average value: 205 GPa Grade Count:600
Compressive Yield Strength	<u>1650 - 1800</u> MPa	<u>239000 - 260000</u> psi	Average value: 1700 MPa Grade Count:12
Bulk Modulus	<u>140</u> GPa	<u>20300</u> ksi	Average value: 140 GPa Grade Count:600
Poissons Ratio	<u>0.290 - 0.300</u>	<u>0.290 - 0.300</u>	Average value: 0.290 Grade Count:600
Charpy Impact	<u>7.00 - 26.0</u> J	<u>5.16 - 19.2</u> ft-lb	Average value: 17.2 J Grade Count:21
Izod Impact	<u>9.00 - 138</u> J	<u>6.64 - 102</u> ft-lb	Average value: 63.6 J Grade Count:68
Fatigue Strength	<u>138 - 841</u> MPa	<u>20000 - 122000</u> psi	Average value: 523 MPa Grade Count:15
Machinability	<u>50.0 - 75.0</u> %	<u>50.0 - 75.0</u> %	Average value: 59.4 % Grade Count:575
Shear Modulus	<u>75.0 - 84.0</u> GPa	<u>10900 - 12200</u> ksi	Average value: 80.0 GPa Grade Count:600
<b>Electrical Properties</b>	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	<u>0.0000200 - 0.0000263</u> ohm-cm	<u>0.0000200 - 0.0000263</u> ohm-cm	Average value: 0.0000242 ohm-cm Grade Count:600
<b>Thermal Properties</b>	Metric	English	Comments
CTE, linear	<u>10.4 - 14.6</u> $\mu\text{m/m-}\hat{\text{A}}^\circ\text{C}$	<u>5.78 - 8.11</u> $\mu\text{in/in-}\hat{\text{A}}^\circ\text{F}$	Average value: 12.6 $\mu\text{m/m-}\hat{\text{A}}^\circ\text{C}$

			Grade Count:234
Specific Heat Capacity	<u>0.473 - 0.477</u> J/g-Å°C	<u>0.113 - 0.114</u> BTU/lb-Å°F	Average value: 0.475 J/g-Å°C
Thermal Conductivity	<u>42.6 - 48.1</u> W/m-K	<u>296 - 334</u> BTU- in/hr-ftÅ²-Å°F	Grade Count:533 Average value: 44.2 W/m-K
<b>Material Components</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>	<b>Comments</b>
<b>Properties</b>			
Carbon, C	0.0900 - 1.29 %	0.0900 - 1.29 %	Average value: 0.301 % Grade Count:619
Chromium, Cr	0.300 - 3.30 %	0.300 - 3.30 %	Average value: 0.795 % Grade Count:387
Iron, Fe	91.9 - 99.1 %	91.9 - 99.1 %	Average value: 96.7 % Grade Count:618
Manganese, Mn	0.300 - 3.00 %	0.300 - 3.00 %	Average value: 0.703 % Grade Count:619
Molybdenum, Mo	0.0800 - 0.750 %	0.0800 - 0.750 %	Average value: 0.257 % Grade Count:619
Nickel, Ni	0.850 - 3.50 %	0.850 - 3.50 %	Average value: 2.15 % Grade Count:327
Phosphorus, P	0.0200 - 0.900 %	0.0200 - 0.900 %	Average value: 0.0351 % Grade Count:608
Silicon, Si	0.0400 - 1.05 %	0.0400 - 1.05 %	Average value: 0.240 % Grade Count:619
Sulfur, S	0.0200 - 0.150 %	0.0200 - 0.150 %	Average value: 0.0377 % Grade Count:607

**Lampiran C**  
**Lampiran C.1 Besarnya tegangan pada node-node dengan beban 10kN**

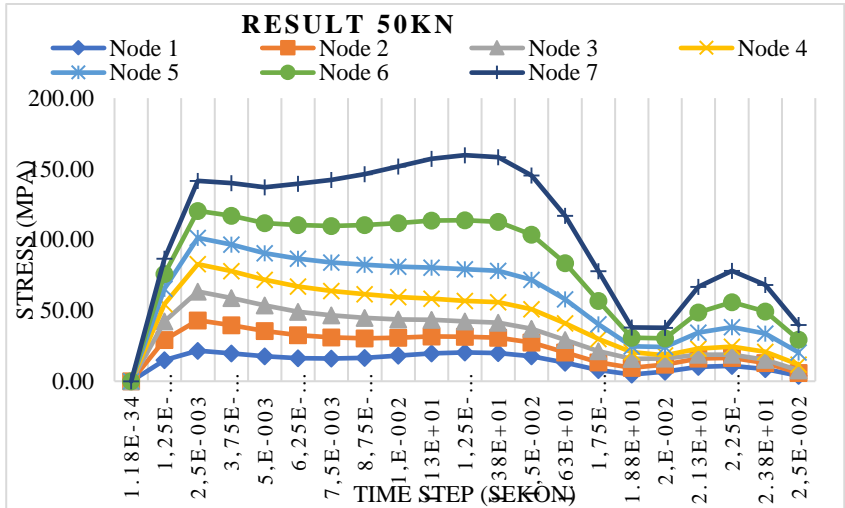


**Lampiran C.2 Besarnya tegangan pada node-node dengan beban 20kN**

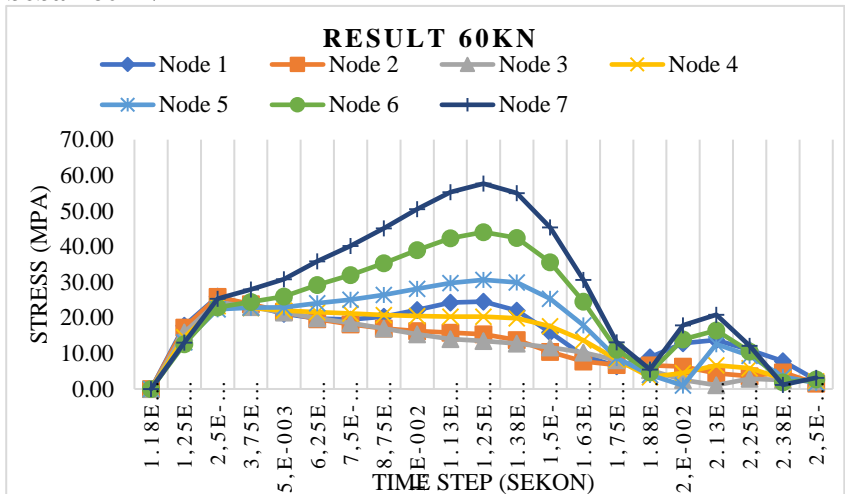




### Lampiran C.5 Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 50kN

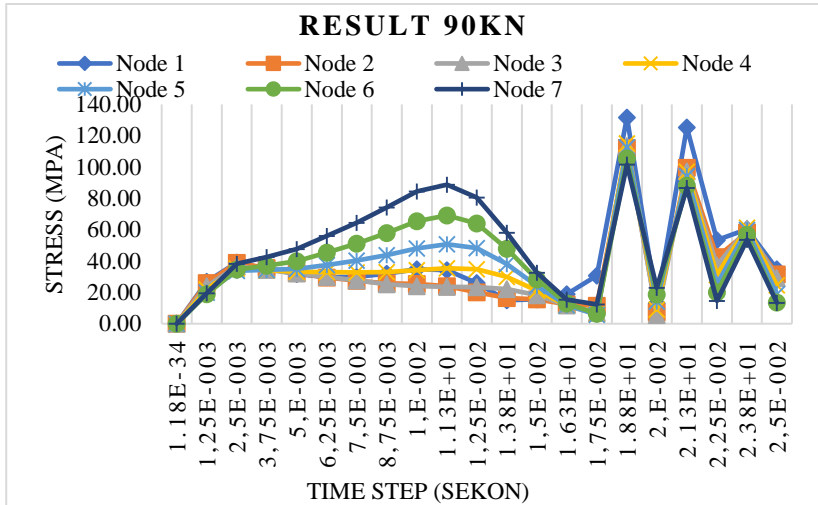


### Lampiran C.6 Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 60kN





### Lampiran C.9 Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 90kN



### Lampiran D

10kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
1.18E-34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,25e-003	2.85	2.72	2.27	2.03	2.10	2.37	2.85
2,5e-003	4.34	4.13	3.46	3.24	3.56	4.06	5.02
3,75e-003	4.09	3.89	3.26	3.07	3.45	3.96	4.90
5,e-003	3.83	3.63	3.05	2.88	3.31	3.82	4.78
6,25e-003	3.24	3.04	2.53	2.48	3.09	3.71	4.73
7,5e-003	2.92	2.72	2.22	2.24	2.94	3.64	4.69
8,75e-003	2.64	2.40	1.89	1.96	2.77	3.53	4.63

1,e-002	2.38	2.09	1.57	1.69	2.60	3.43	4.58
1.13E+01	2.08	1.73	1.20	1.40	2.43	3.33	4.51
1,25e-002	1.74	1.31	0.73	1.07	2.28	3.22	4.43
1.38E+01	1.34	0.86	0.26	0.91	2.19	3.15	4.34
1,5e-002	1.11	0.73	0.63	1.12	2.24	3.12	4.20
1.63E+01	1.07	0.85	1.02	1.40	2.35	3.13	4.11
1,75e-002	1.13	1.13	1.42	1.71	2.48	3.17	4.08
1.88E+01	1.29	1.40	1.74	1.98	2.61	3.22	4.06
2,e-002	1.53	1.76	2.17	2.35	2.81	3.30	4.05
2.13E+01	1.70	2.01	2.45	2.61	2.98	3.38	4.03
2,25e-002	1.85	2.22	2.69	2.83	3.12	3.45	4.02
2.38E+01	1.97	2.38	2.87	3.03	3.27	3.53	4.03
2,5e-002	2.11	2.56	3.09	3.24	3.42	3.62	4.03

20kN

TIME STEP (sekon)	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
1.18E-34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,25e-003	5.69	5.55	5.10	4.68	4.26	4.23	4.75
2,5e-003	8.45	8.36	7.91	7.44	7.11	7.53	8.88
3,75e-003	7.95	8.06	7.70	7.28	7.07	7.70	9.31
5,e-003	7.20	7.37	7.16	6.94	6.89	7.64	9.33
6,25e-003	6.29	6.71	6.68	6.60	6.66	7.50	9.96
7,5e-003	5.82	6.28	6.36	6.35	6.49	7.41	10.01
8,75e-003	5.28	5.72	5.90	6.01	6.29	7.32	9.97
1,e-002	4.54	5.08	5.46	5.74	6.15	7.26	9.95



1.13E+01	4.10	4.59	5.08	5.42	5.95	7.15	9.89
1,25e-002	3.47	3.71	4.23	4.74	5.49	6.90	9.75
1.38E+01	2.92	2.88	3.47	4.15	5.08	6.65	9.53
1,5e-002	2.65	2.36	3.00	3.78	4.83	6.50	9.38
1.63E+01	2.51	2.07	2.75	3.63	4.72	6.41	9.30
1,75e-002	2.40	1.88	2.60	3.54	4.66	6.37	9.08
1.88E+01	2.20	1.54	2.38	3.41	4.58	6.33	8.66
2,e-002	2.00	0.79	1.88	3.10	4.34	6.16	7.81
2.13E+01	2.12	1.02	1.91	3.08	4.25	5.41	6.16
2,25e-002	1.96	1.39	2.09	3.15	3.87	4.18	4.10
2.38E+01	1.76	1.88	2.39	3.28	3.24	2.74	2.13
2,5e-002	1.86	2.41	2.78	3.44	2.85	2.66	2.88
30kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	8.753	8.501	7.801	7.156	6.503	6.278	6.716
2,5e-003	12.780	12.772	12.103	11.437	10.995	11.417	12.934
3,75e-003	11.823	12.106	11.762	11.213	11.077	11.956	13.903
5,e-003	10.491	10.967	10.932	10.614	10.717	12.050	14.603
6,25e-003	9.330	9.752	10.241	10.109	10.566	12.817	16.562
7,5e-003	8.792	9.000	9.774	9.765	10.369	13.039	17.781
8,75e-003	8.488	8.148	9.167	9.342	10.162	13.123	18.759
1,e-002	8.608	6.939	8.368	8.848	9.900	13.604	20.361
1.13E+01	8.768	6.130	7.851	8.471	9.655	13.596	21.187

1,25e-002	8.570	5.137	7.020	7.876	9.298	13.427	21.279
1.38E+01	8.513	3.927	5.957	7.073	8.779	13.133	21.095
1,5e-002	8.439	3.399	5.507	6.732	8.513	12.938	20.858
1.63E+01	8.411	3.276	5.468	6.721	8.482	12.395	19.548
1,75e-002	8.168	2.318	4.814	6.327	7.642	10.702	17.253
1.88E+01	7.228	1.369	4.269	5.766	6.241	8.175	13.925
2,e-002	5.509	1.391	3.983	4.692	4.007	4.990	9.501
2.13E+01	3.596	2.504	4.126	3.805	1.997	2.024	4.510
2,25e-002	2.638	3.590	4.323	3.096	2.843	4.091	2.370
2.38E+01	3.852	4.731	4.663	3.127	5.761	8.380	7.684
2,5e-002	5.527	5.573	4.898	3.404	8.241	12.161	12.685
40kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan <i>Node</i> (Mpa)						
	<i>Node 1</i>	<i>Node 2</i>	<i>Node 3</i>	<i>Node 4</i>	<i>Node 5</i>	<i>Node 6</i>	<i>Node 7</i>
1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	11.818	11.453	10.503	9.616	8.722	8.348	8.764
2,5e-003	17.202	17.116	16.167	15.371	14.776	15.209	17.021
3,75e-003	15.760	16.016	15.523	15.069	14.976	16.040	18.498
5,e-003	14.020	14.449	14.514	14.387	14.733	16.557	19.882
6,25e-003	12.874	12.943	13.490	13.814	14.969	18.205	22.811
7,5e-003	12.579	11.834	12.760	13.336	14.999	19.315	25.137
8,75e-003	12.895	10.738	11.907	12.755	14.981	20.391	27.388
1,e-002	13.913	9.623	10.733	12.009	15.277	22.094	30.144
1.13E+01	15.136	8.733	9.667	11.278	15.178	23.262	32.548
1,25e-002	15.444	7.630	8.576	10.563	14.799	23.592	33.830

1.38E+01	15.355	6.933	7.836	10.167	14.633	23.520	33.792
1,5e-002	15.242	6.746	7.755	10.175	14.584	23.055	32.644
1.63E+01	13.912	5.765	6.952	9.305	12.937	20.441	29.204
1,75e-002	11.078	4.385	6.258	7.863	9.937	16.083	23.376
1.88E+01	7.308	2.755	5.529	6.015	5.997	10.227	15.423
2,e-002	3.648	2.236	5.145	4.163	2.458	3.678	6.165
2.13E+01	3.259	2.878	4.836	2.592	5.147	5.217	4.620
2,25e-002	6.221	4.048	4.594	2.156	9.577	11.884	13.349
2.38E+01	8.365	4.875	4.567	3.216	12.712	16.321	19.203
2,5e-002	8.586	5.449	5.282	4.656	13.587	17.502	20.809
50 kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan Node (Mpa)						
	<i>Node 1</i>	<i>Node 2</i>	<i>Node 3</i>	<i>Node 4</i>	<i>Node 5</i>	<i>Node 6</i>	<i>Node 7</i>
1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	14.812	14.374	13.191	12.081	10.946	10.446	10.866
2,5e-003	21.590	21.484	20.289	19.339	18.584	19.072	21.161
3,75e-003	19.628	19.893	19.218	18.955	18.939	20.222	23.146
5,e-003	17.584	17.984	17.916	18.221	18.849	21.203	25.256
6,25e-003	16.296	16.227	16.616	17.777	19.693	23.759	29.227
7,5e-003	16.003	14.912	15.593	17.297	20.190	25.763	32.534
8,75e-003	16.561	13.748	14.497	16.652	20.759	28.027	36.056
1,e-002	18.002	12.702	12.977	15.807	21.456	30.703	40.081
1.13E+01	19.709	11.975	11.621	14.984	22.050	33.139	43.699
1,25e-002	20.238	11.249	10.735	14.534	22.345	34.558	46.046
1.38E+01	19.977	10.885	10.441	14.445	22.343	34.489	45.736
1,5e-002	17.660	9.652	9.768	13.808	20.900	31.791	41.871
1.63E+01	13.077	7.232	8.888	11.821	16.781	25.630	33.443

1,75e-002	7.841	5.437	7.918	8.576	10.581	16.370	21.060
1.88E+01	4.715	4.771	6.290	4.813	4.152	6.046	7.290
2,e-002	6.728	5.097	4.337	2.154	5.790	6.249	7.442
2.13E+01	10.210	5.876	2.767	4.247	11.270	14.284	17.973
2,25e-002	10.833	5.704	2.335	5.645	13.744	17.657	22.081
2.38E+01	8.520	4.408	2.285	5.622	12.780	15.591	18.880
2,5e-002	3.826	2.006	1.867	4.154	8.545	9.071	10.239
60 kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan <i>Node</i> (Mpa)						
	<i>Node</i> 1	<i>Node</i> 2	<i>Node</i> 3	<i>Node</i> 4	<i>Node</i> 5	<i>Node</i> 6	<i>Node</i> 7
1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	17.801	17.283	15.867	14.539	13.165	12.560	13.014
2,5e-003	25.960	25.846	24.393	23.292	22.389	22.952	25.388
3,75e-003	23.495	23.845	23.046	22.772	22.797	24.456	27.964
5,e-003	21.158	21.626	21.474	21.998	22.904	25.943	30.845
6,25e-003	19.755	19.615	19.878	21.565	24.103	29.199	35.854
7,5e-003	19.510	18.157	18.537	21.169	25.118	32.037	40.204
8,75e-003	20.318	16.987	17.002	20.748	26.427	35.307	45.089
1,e-002	22.239	16.237	15.346	20.495	28.138	39.006	50.546
1.13E+01	24.282	15.811	14.027	20.309	29.769	42.349	55.304
1,25e-002	24.532	15.337	13.514	20.346	30.637	44.046	57.661
1.38E+01	22.045	13.772	12.776	19.882	29.903	42.449	55.024
1,5e-002	15.923	10.458	11.657	17.635	25.389	35.563	45.433
1.63E+01	9.337	7.758	10.279	13.684	17.914	24.518	30.609
1,75e-002	6.354	6.763	8.086	8.286	8.676	11.069	13.077
1.88E+01	8.931	6.669	5.331	3.347	3.952	4.646	5.441
2,e-002	12.833	6.331	2.559	4.473	1.022	13.896	17.913
2.13E+01	13.755	4.442	1.032	6.631	12.560	16.483	20.820
2,25e-002	10.924	3.581	2.841	5.882	9.348	10.486	12.170

2.38E+01	7.782	4.683	2.557	2.855	3.428	1.855	1.178
2,5e-002	2.470	1.514	2.195	2.188	1.732	2.705	3.164
70 kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	2	Node 1	NT	Node 1	5	Node 1
1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	20.790	20.190	18.539	16.990	15.384	14.682	15.178
2,5e-003	30.325	30.217	28.513	27.250	26.201	26.853	29.657
3,75e-003	27.355	27.801	26.845	26.574	26.649	28.630	32.816
5,e-003	24.671	25.245	25.006	25.738	26.952	30.608	36.411
6,25e-003	23.128	22.988	23.244	25.377	28.552	34.631	42.511
7,5e-003	22.877	21.226	21.530	24.953	30.021	38.327	48.087
8,75e-003	24.007	19.858	19.646	24.625	31.937	42.642	54.465
1,e-002	26.473	19.265	18.055	24.793	34.537	47.579	61.562
1.13E+01	28.316	18.854	17.027	25.126	36.936	51.738	67.232
1,25e-002	26.989	17.744	16.477	25.079	37.527	52.626	67.924
1.38E+01	20.680	14.161	15.189	23.389	34.359	47.275	60.126
1,5e-002	12.120	10.442	13.792	19.597	26.725	35.680	44.189
1.63E+01	8.262	9.109	11.331	13.407	16.071	20.299	24.022
1,75e-002	10.425	8.720	7.932	6.487	5.470	5.379	4.701
1.88E+01	14.709	6.753	3.735	4.243	7.374	9.738	12.550
2,e-002	19.114	5.970	4.303	7.485	10.810	12.885	15.880
2.13E+01	21.186	11.191	8.165	7.392	6.438	4.310	5.627
2,25e-002	17.946	11.064	6.108	3.203	3.072	7.697	12.829
2.38E+01	18.994	15.983	17.582	23.146	29.308	34.012	39.011
2,5e-002	38.978	29.252	24.781	23.624	27.475	34.152	43.779
80 kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7

1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	23.780	23.100	21.208	19.400	17.605	16.808	17.350
2,5e-003	34.694	34.584	32.621	31.189	29.989	30.741	33.948
3,75e-003	31.205	31.731	30.638	30.379	30.485	32.808	37.687
5,e-003	28.157	28.833	28.515	29.423	30.965	35.274	42.018
6,25e-003	26.439	26.283	26.537	29.174	33.017	40.048	49.259
7,5e-003	26.266	24.238	24.476	28.851	35.088	44.684	56.221
8,75e-003	27.857	22.782	22.310	28.702	37.738	50.118	64.171
1,e-002	30.732	22.255	20.736	29.203	41.221	56.311	72.866
1.13E+01	31.789	21.595	19.890	29.914	43.948	60.599	78.485
1,25e-002	27.518	18.924	19.288	29.714	43.349	59.048	75.671
1.38E+01	17.536	14.475	18.179	26.780	37.216	48.978	61.210
1,5e-002	10.801	12.160	15.970	20.618	25.893	32.314	38.796
1.63E+01	12.413	11.258	11.693	12.195	12.985	14.716	16.688
1,75e-002	16.871	8.610	6.269	4.886	3.858	3.572	4.726
1.88E+01	25.978	9.134	6.144	6.695	7.472	7.592	10.364
2,e-002	35.401	19.991	12.682	7.259	3.530	7.413	16.462
2.13E+01	46.288	42.124	37.539	34.684	33.998	33.625	33.115
2,25e-002	32.525	21.526	19.069	18.583	21.214	25.932	34.227
2.38E+01	56.950	40.979	32.513	23.968	16.086	8.761	6.478
2,5e-002	57.978	49.202	45.703	41.896	37.720	33.103	27.401

90 kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan <i>Node</i> (Mpa)						
	<i>Node</i> 1	<i>Node</i> 2	<i>Node</i> 3	<i>Node</i> 4	<i>Node</i> 5	<i>Node</i> 6	<i>Node</i> 7
1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	26.767	26.005	23.871	21.886	19.823	18.936	19.529
2,5e-003	3.906	38.958	36.733	35.124	33.776	34.649	38.259

3,75e-003	35.048	35.667	34.436	34.183	34.357	37.061	42.568
5.e-003	31.650	32.420	32.066	33.171	35.021	39.971	47.589
6,25e-003	29.756	29.549	29.844	33.028	37.540	45.524	56.021
7,5e-003	29.801	27.349	27.561	32.851	40.237	51.224	64.512
8,75e-003	31.879	25.881	25.281	32.991	43.720	57.951	74.230
1.e-002	34.896	25.400	24.054	34.146	48.174	65.371	84.384
1.13E+01	34.262	24.059	23.587	35.362	50.832	69.039	88.782
1,25e-002	25.928	20.049	23.409	34.742	48.279	63.980	80.594
1.38E+01	15.014	16.420	22.183	29.873	38.171	47.939	58.003
1,5e-002	15.628	15.604	18.308	21.186	24.125	28.281	32.588
1.63E+01	18.907	12.388	11.728	11.774	11.654	12.912	15.325
1,75e-002	30.756	11.481	6.996	6.105	5.700	6.408	12.317
1.88E+01	131.720	112.210	113.410	115.190	112.610	105.590	101.550
2.e-002	13.237	7.174	5.568	9.011	14.253	18.592	22.892
2.13E+01	125.210	99.518	97.377	97.032	94.150	88.164	86.626
2,25e-002	53.391	42.573	37.158	31.165	25.289	20.131	14.635
2.38E+01	60.361	58.390	60.716	61.448	59.998	56.901	53.634
2,5e-002	34.885	31.443	29.119	24.539	18.814	13.482	13.339

**Lampiran E**

<i>Nod e</i>	Tegangan maksimum (Mpa)								
	10 kN	20 kN	30 kN	40 kN	50 kN	60 kN	70 kN	80 kN	90 kN
1	4.34	8.45	12.78	17.20	21.59	25.96	38.98	57.98	131.72
2	4.13	8.36	12.77	17.12	21.48	25.85	30.22	49.20	112.21
3	3.46	7.91	12.10	16.17	20.29	24.39	28.51	45.07	113.41
4	3.24	7.44	11.44	15.37	19.34	23.29	27.25	41.90	115.19
5	3.56	7.11	11.08	15.28	22.35	30.64	37.53	43.95	112.61
6	4.06	7.70	13.60	23.59	34.56	44.05	52.63	60.60	105.59

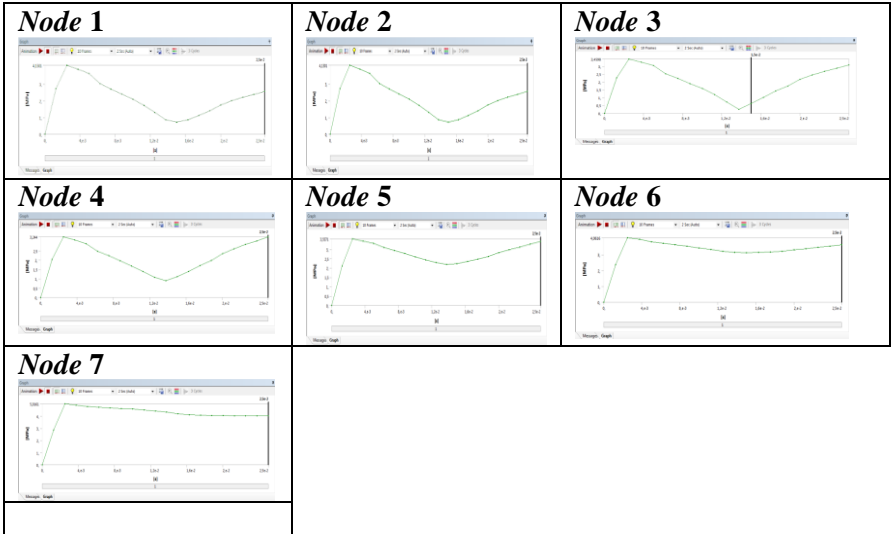
7	5.02	10.01	21.28	33.83	46.05	57.66	67.92	78.49	101.5 5
---	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------------

**Lampiran F**

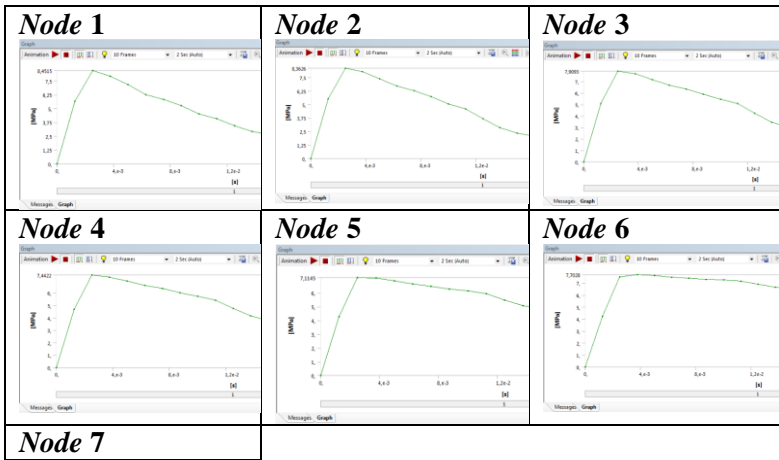
30kN							
TIME STEP (sekon)	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
1.18E-34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,25e-003	38.160	34.422	36.505	35.545	32.706	30.150	26.508
2,5e-003	33.830	32.879	33.580	33.496	31.458	28.870	26.242
3,75e-003	27.524	35.613	31.084	33.953	36.235	36.032	35.697
5,e-003	26.866	31.754	29.039	30.875	31.544	30.431	28.941
6,25e-003	26.619	31.990	29.291	31.173	31.665	30.404	28.571
7,5e-003	26.656	33.588	30.113	32.448	33.572	32.735	31.211
8,75e-003	26.106	33.062	29.555	31.877	33.137	32.538	31.242
1,e-002	26.712	34.309	30.379	32.877	34.704	34.629	33.915
1.13E+01	28.101	36.550	32.057	34.785	37.384	37.930	37.894
1,25e-002	30.312	39.034	34.277	37.058	40.205	41.278	41.806
1.38E+01	34.131	43.006	37.980	40.807	44.552	46.155	47.307
1,5e-002	39.228	48.879	43.237	46.314	50.940	53.175	55.059
1.63E+01	44.850	56.013	49.310	52.877	58.754	61.740	64.512
1,75e-002	50.875	64.333	56.076	60.410	67.933	71.820	75.621
1.88E+01	57.220	73.180	63.188	68.395	77.694	82.513	87.358
2,e-002	63.507	81.924	70.173	76.272	87.346	93.061	98.868
2.13E+01	68.551	89.899	76.004	83.184	96.413	103.190	110.090
2,25e-002	71.316	96.912	79.988	88.700	104.960	113.220	121.630
2.38E+01	71.028	103.470	81.735	92.899	113.940	124.600	135.420
2,5e-002	69.170	110.580	82.308	96.778	124.350	138.310	152.440

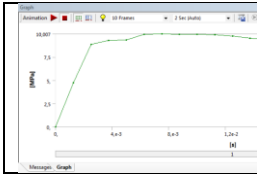


**Lampiran G**  
**Lampiran G.1 Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 10kN**

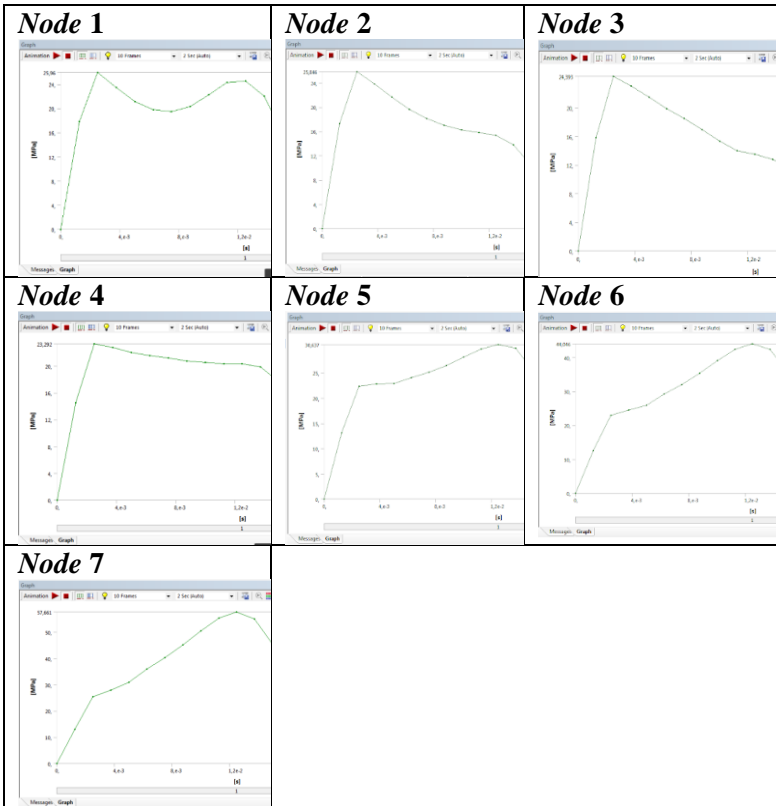


**Lampiran G.2 Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 20kN**

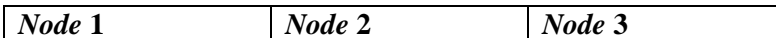


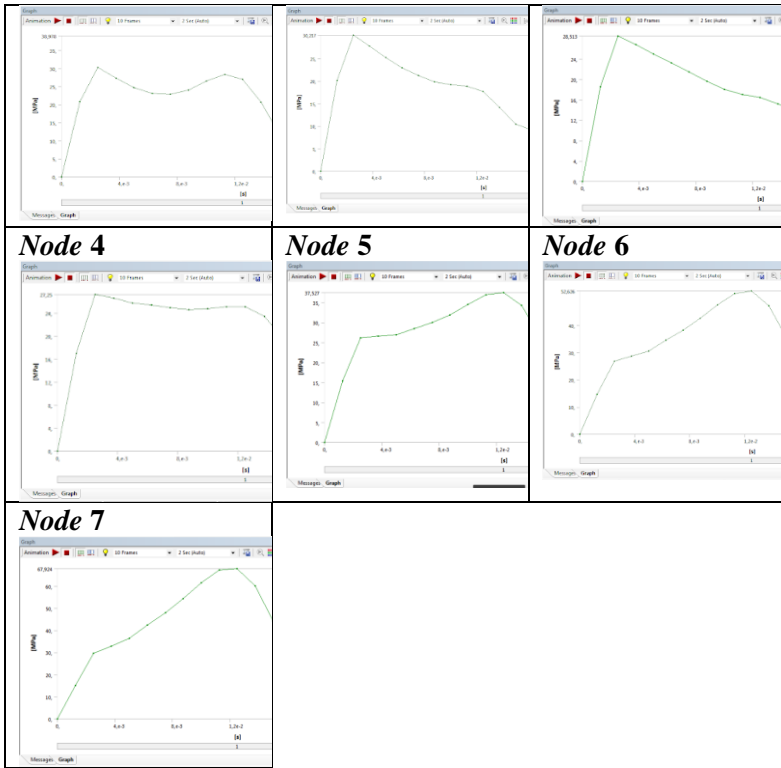


**Lampiran G.6** Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 60kN

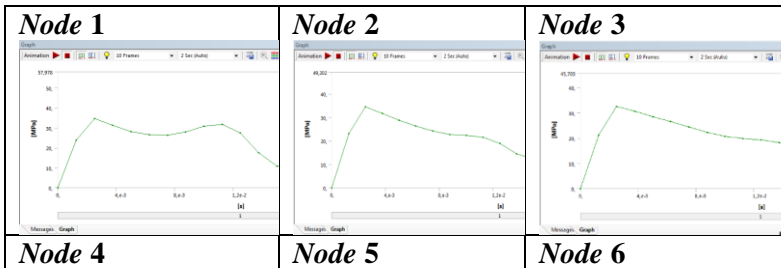


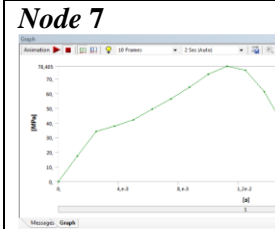
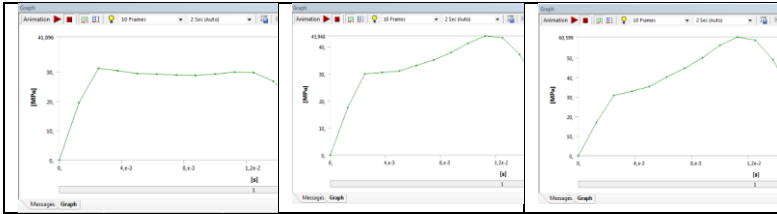
**Lampiran G.7** Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 70kN



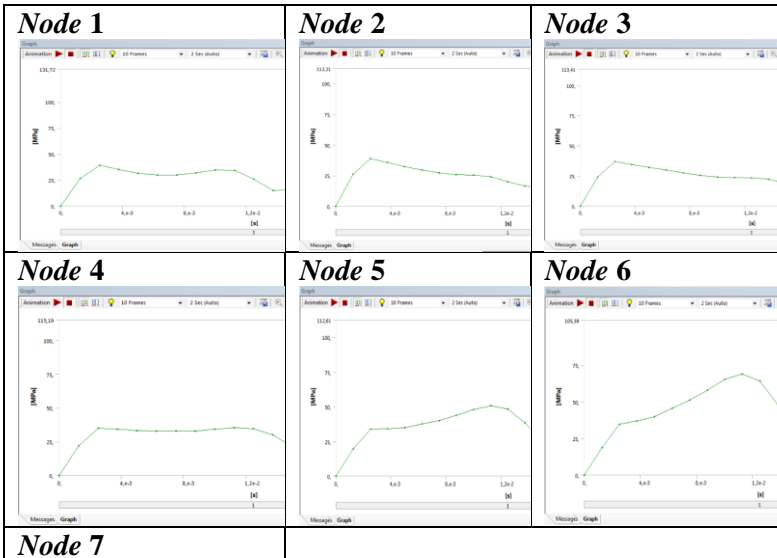


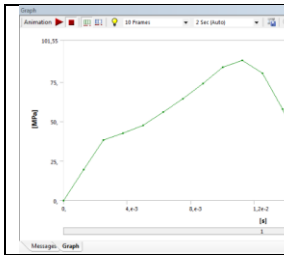
Lampiran G.8 Besarnya tegangan pada *node-node* dengan beban 80kN



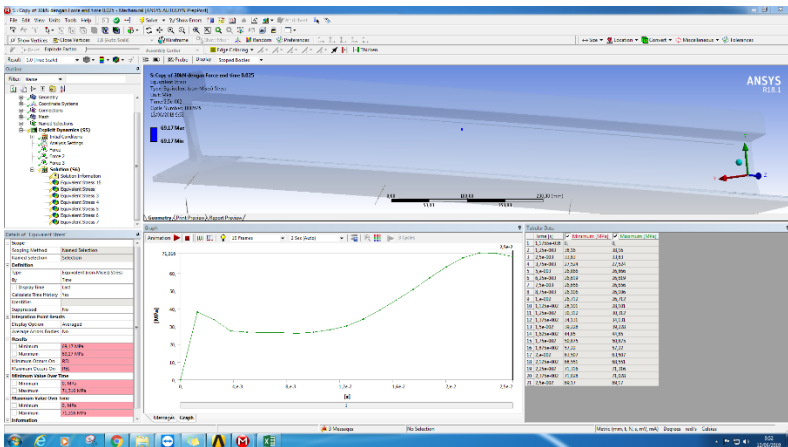
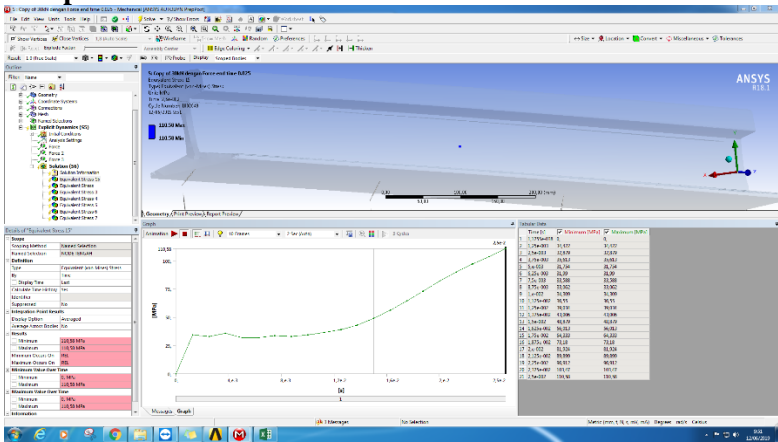


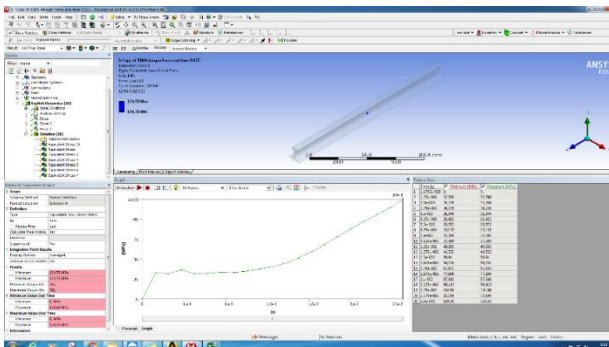
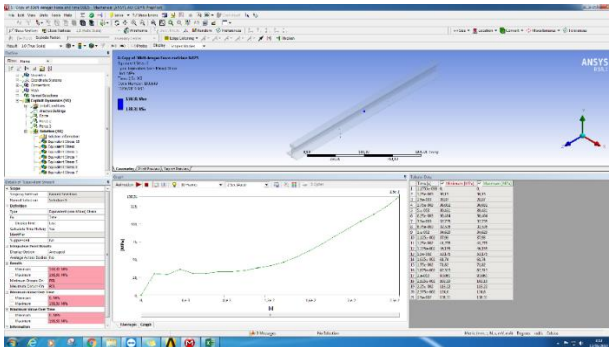
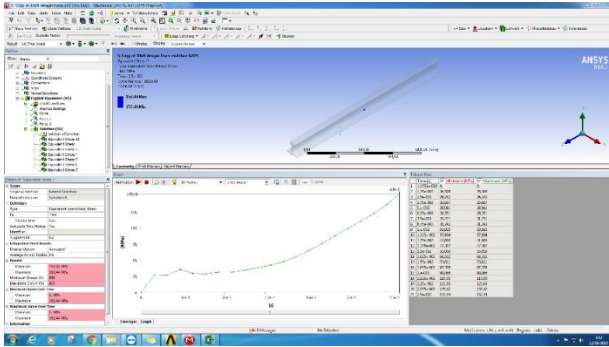
**Lampiran G.9 Besarnya tegangan pada node-node dengan beban 90kN**

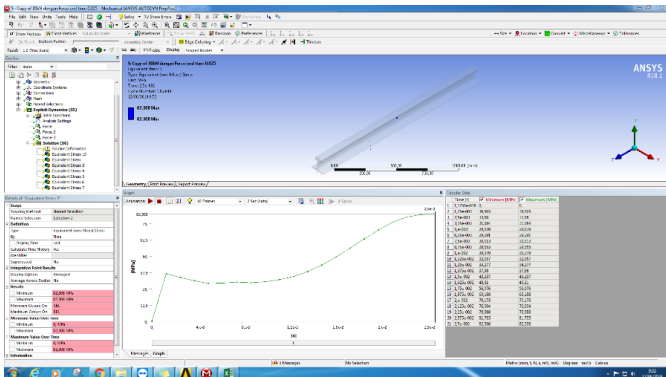
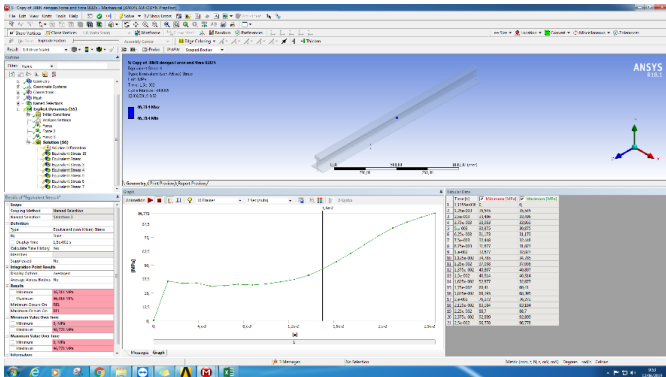




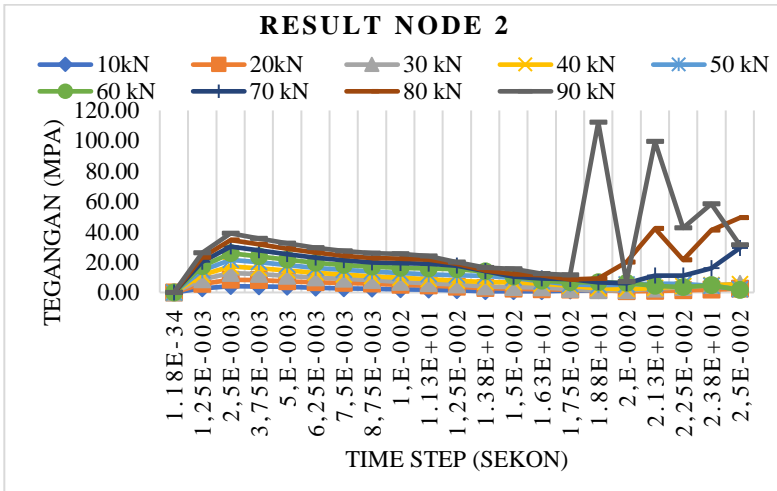
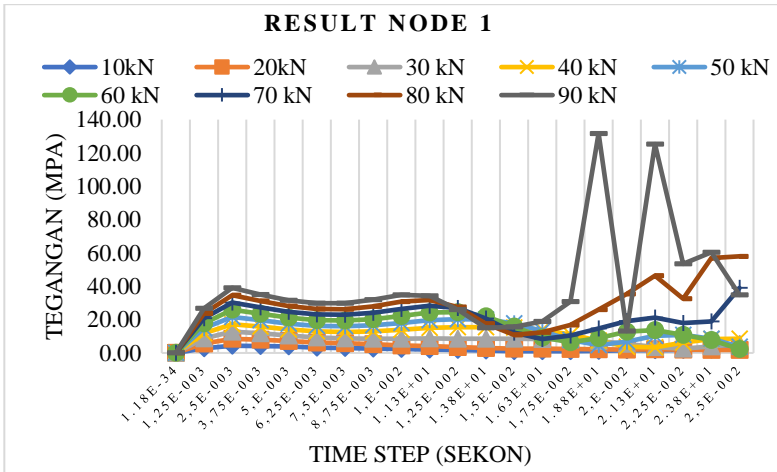
## Lampiran H



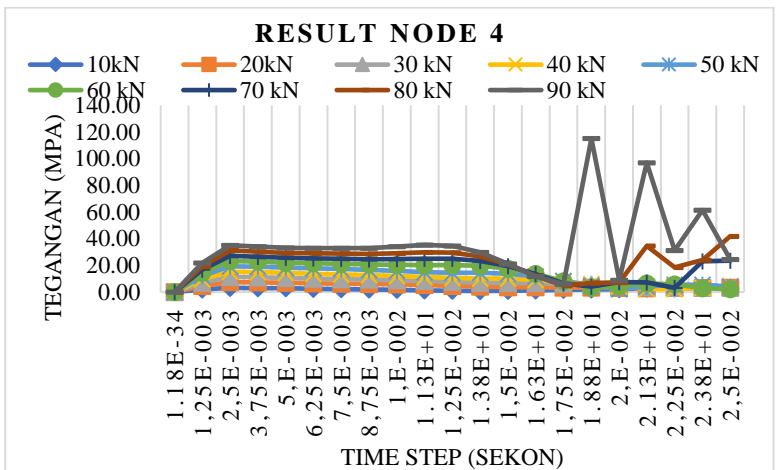
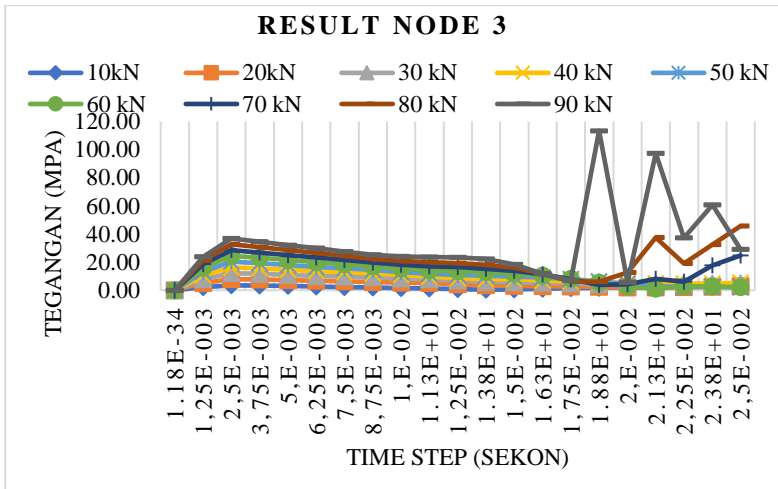




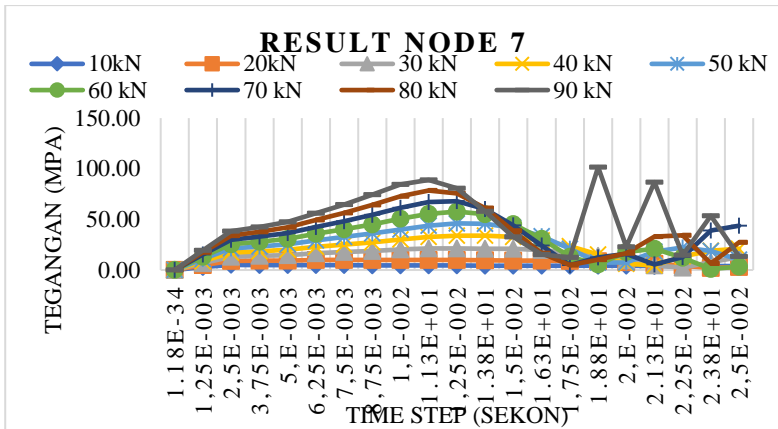
**Lampiran I**











### Lampiran J

10kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
Tanpa pengaruh suhu (A)	4.34	4.13	3.46	3.24	3.56	4.06	5.02
Dengan pengaruh suhu (B)	55.45	75.44	99.29	122.02	144.83	167.72	190.74
selisih (C = B - A)	51.11	71.31	95.83	118.78	141.27	163.66	185.72
kenaikan (D=C/A)	11.78	17.27	27.70	36.61	39.72	40.29	37.03
rata-rata kenaikan ( $\Sigma D/7$ )	30.05649911						
20kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
Tanpa pengaruh suhu (A)	8.45	8.36	7.91	7.44	7.11	7.70	10.01

<b>Dengan pengaruh suhu (B)</b>	83.35	95.80	109.11	121.79	134.51	147.34	160.29
selisih (C = B - A)	74.90	87.44	101.20	114.35	127.40	139.64	150.28
kenaikan (D=C/A)	8.86	10.46	12.80	15.36	17.92	18.13	15.02
rata-rata kenaikan ( $\Sigma D/7$ )	14.08						
30kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
<b>Tanpa pengaruh suhu (A)</b>	<b>12.78</b>	<b>12.77</b>	<b>12.10</b>	<b>11.44</b>	<b>11.08</b>	<b>13.60</b>	<b>21.28</b>
<b>Dengan pengaruh suhu (B)</b>	<b>71.316</b>	<b>110.580</b>	<b>82.308</b>	<b>96.778</b>	<b>124.350</b>	<b>138.310</b>	<b>152.440</b>
selisih (C = B - A)	58.536	97.808	70.205	85.341	113.273	124.714	131.161
kenaikan (D=C/A)	4.58028	7.658	5.80063	7.46183	10.226	9.17284	6.16387
rata-rata kenaikan ( $\Sigma D/7$ )	7.294775008						
40kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
Tanpa pengaruh suhu (A)	17.20	17.12	16.17	15.37	15.28	23.59	33.83
Dengan pengaruh suhu (B)	125.38	132.17	146.39	160.38	174.49	188.49	202.97
selisih (C = B - A)	108.18	115.05	130.22	145.01	159.21	164.90	169.14
kenaikan (D=C/A)	6.29	6.72	8.05	9.43	10.42	6.99	5.00

Keterangan	7.55864614						
50kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
Tanpa pengaruh suhu (A)	21.59	21.48	20.29	19.34	22.35	34.56	46.05
Dengan pengaruh suhu (B)	207.57	202.83	201.54	200.35	199.11	199.05	212.40
selisih (C = B - A)	185.98	181.35	181.25	181.01	176.77	164.49	166.35
kenaikan (D=C/A)	8.61	8.44	8.93	9.36	7.91	4.76	3.61
Keterangan	7.38						
60kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
Tanpa pengaruh suhu (A)	25.96	25.85	24.39	23.29	30.64	44.05	57.66
Dengan pengaruh suhu (B)	167.07	166.6	175.19	183.91	192.6	200.76	208.15
selisih (C = B - A)	141.110	140.754	150.797	160.618	161.963	156.714	150.489
kenaikan (D=C/A)	5.43567	5.445872	6.181978	6.895844	5.286516	3.557962	2.609892
rata-rata kenaikan ( $\Sigma D/7$ )	5.059105029						
70kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
Tanpa pengaruh suhu (A)	38.98	30.22	28.51	27.25	37.53	52.63	67.92
Dengan pengaruh suhu (B)	231.79	218.97	218.91	218.8	228.43	245.43	261.6

selisih (C = B - A)	192.812	188.753	190.397	191.550	190.903	192.804	193.676
kenaikan (D=C/A)	4.946688	6.246583	6.677551	7.029358	5.087084	3.663664	2.851363
rata-rata kenaikan ( $\Sigma D/7$ )	5.214612988						
80kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
<b>Tanpa pengaruh suhu (A)</b>	57.98	49.20	45.07	41.90	43.95	60.60	78.49
<b>Dengan pengaruh suhu (B)</b>	244.09	236.39	238.27	239.10	236.28	234.11	241.25
selisih (C = B - A)	186.112	187.188	193.197	197.204	192.332	173.511	162.765
kenaikan (D=C/A)	3.210045	3.804479	4.286313	4.706989	4.376354	2.863265	2.073836
rata-rata kenaikan ( $\Sigma D/7$ )	3.61732592						
90kN							
Keterangan	Tegangan Node (Mpa)						
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
<b>Tanpa pengaruh suhu (A)</b>	131.72	112.21	113.41	115.19	112.61	105.59	101.55
<b>Dengan pengaruh suhu (B)</b>	256.980	243.810	244.440	246.110	247.270	247.000	245.300
selisih (C = B - A)	125.260	131.600	131.030	130.920	134.660	141.410	143.750
kenaikan (D=C/A)	0.950957	1.172801	1.155365	1.136557	1.195809	1.339237	1.415559
rata-rata kenaikan ( $\Sigma D/7$ )	1.195183443						

## BIODATA PENULIS



Eka Hikmah Aprilia, terlahir di Sidoarjo, Jawa Timur, 19 April 1997, dari pasangan Mulyono dan Ning Hartatik. Penulis menghabiskan masa kecilnya hingga usia 3 tahun di Sidoarjo kemudian pindah ke kota Ponorogo. Dan berpindah rumah hingga akhirnya menetap pada saat penulis menginjak kelas 2 sekolah dasar di Dsn.Blebaan RT/RW 002/002, Desa Nglumpang, Kecamatan Mlarak, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur. Penulis menempuh Pendidikan di TK Dharma

Wanita Joresan dan melanjutkan sekolah dasar di SDN 1 Joresan hingga kelas 1. Saat menginjak kelas 2 penulis berpindah ke SDN 2 Nglumpang hingga lulus sekolah dasar. Melanjutkan Pendidikan di SMPN 1 Mlarak dan SMAN 1 Ponorogo. Setelah lulus SMA penulis mengikuti ujian Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) untuk melanjutkan Pendidikan di perguruan tinggi. Ia mengambil program studi Teknik Mesin ITS sebagai pilihan pertama. Dengan restu orang tua ia diterima di Teknik Mesin ITS pada 2015 sebagai bagian dari angkatan M58 dan alhamdulillah lulus pada 2019. Penulis mengambil tugas akhir pada laboratorium Mekanika Benda Padat (MBP). Penulis juga aktif dalam beberapa kegiatan Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) sebagai Kabiro Internal HMM 2016/2017 dan aktif menjadi panitia dalam event Departement maupun Institut. Penulis juga mengikuti kegiatan *Study Abroad goes to Singapore* pada 2018 yang menjadi pembuka jalan untuk penulis kedepannya melakukan *abroad*. Penulis juga termasuk salah satu penerima beasiswa Astra 1st Batch 8 (2018-2019) oleh PT. Astra International Tbk.