

PROYEK AKHIR - VM231838

ANALISIS KETAHANAN *BOGIE FRAME* KERETA *FLAT WAGON* TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL DI PT INDUSTRI KERETA API (PERSERO)

UCI NUR HIDAYATI

NRP. 2038201055

Dosen Pembimbing

Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., M.T

NIP 1993201911071

Ir. Winarto, DEA

NIP 196012131988111001

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur

Departemen Teknik Mesin Industri

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



PROYEK AKHIR - VM231838

**ANALISIS KETAHANAN *BOGIE FRAME* KERETA *FLAT WAGON*
TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL DI PT INDUSTRI KERETA
API (PERSERO)**

UCI NUR HIDAYATI
NRP 2038201055

Dosen Pembimbing
Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., M.T
NIP 1993201911071
Ir. Winarto, DEA
NIP 196012131988111001

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur
Departemen Teknik Mesin Industri
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - VM231838

**ANALYSIS OF THE RESISTANCE OF FLAT WAGON TRAIN
BOGIE FRAME STRUCTURES TO EXCEPTIONAL LOADS AT
PT INDUSTRI KERETA API (PERSERO)**

UCI NUR HIDAYATI
NRP 2038201055

Advisor

Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., M.T

NIP 1993201911071

Ir. Winarto, DEA

NIP 196012131988111001

Study Program in Manufacturing Engineering Technology
Department of Industrial Mechanical Engineering
Vocational Faculty
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KETAHANAN BOGIE FRAME KERETA FLAT WAGON TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL DI PT. INDUSTRI KERETA API (PERSERO)

PROYEK AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Terapan pada
Program Studi Diploma 4 Teknologi Rekayasa Manufaktur
Departemen Teknik Mesin Industri
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Uci Nur Hidayati**

NRP. 2038201055

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., MT

Pembimbing I

2. Ir. Winarto, DEA

Ko-pembimbing

3. Dr. Atria Pradityana, ST., MT

Penguji

4. Ahmat Safaat, ST., MT

Penguji

SURABAYA

JULI, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE RESISTANCE OF FLAT WAGON TRAIN BOGIE FRAME STRUCTURES TO EXCEPTIONAL LOADS AT PT. INDUSTRI KERETA API (PERSERO)

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining an Applied Bachelor's degree at
Undergraduate Study Program of Manufacturing Engineering Technology
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Vocation
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **Uci Nur Hidayati**
NRP. 2038201055

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, S.T., M.T.
2. Ir. Winarto, DEA
3. Dr. Atria Pradityana, S.T., M.T
4. Ahmat Safa'at, S.T., M.T.

Advisor

Co Advisor

Examinor

Examinor

SURABAYA

JULI, 2024

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama Mahasiswa / NRP : Uci Nur Hidayati / 2038201055

Departemen / Prodi : Teknik Mesin Industri / D4 Teknologi Rekayasa Manufaktur

Dosen Pembimbing / NIP : Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., MT / 1993201911071

Ir. Winarto, DEA / 196012131988111001

Dengan ini menyatakan bahwa Proyek Akhir dengan judul “Analisis Ketahanan *Bogie Frame* Kereta *Flat Wagon* Terhadap Beban Eksepsional di PT. Industri Kereta Api (Persero)” adalah hasil karya saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., MT)

NIP. 1993201911071

Surabaya, 22 Juli 2024

Mahasiswa,



(Uci Nur Hidayati)

NRP. 2038201055

Halaman ini sengaja dikosongkan

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of Student / NRP : Uci Nur Hidayati / 2038201055
Departement : Teknik Mesin Industri / D4 Teknologi Rekayasa Manufaktur
Advisor / NIP : Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., MT / 1993201911071
Ir. Winarto, DEA / 196012131988111001

Hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis Of The Resistance Of Flat Wagon Train Bogie Frame Structures To Exceptional Loads At Pt. Industri Kereta Api (Persero)" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Acknowledged
Advisor,

Surabaya, 22 Juli 2024
Student,



(Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., MT)
NIP. 1993201911071



(Uci Nur Hidayati)
NRP. 2038201055

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

ANALISIS KETAHANAN BOGIE FRAME KERETA FLAT WAGON TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL DI PT INDUSTRI KERETA API (PERSERO)

Nama Mahasiswa / NRP : Uci Nur Hidayati / 2038201055
Departemen : Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi ITS
Dosen Pembimbing : Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., M.T
Ir. Winarto, DEA

Abstrak

Kereta api merupakan transportasi massal, seperti yang banyak dijumpai yaitu kereta penumpang tidak hanya mengangkut penumpang saja kini transportasi kereta juga bisa mengangkut barang. Kereta pengangkut barang atau yang biasa disebut dengan *flat wagon* memiliki jenis khusus dalam pengangkutan barang. Pada proyek akhir ini akan dibahas tentang bogie, bogie sub-sistem penting dalam desain kereta api yang berperan dalam menopang dan mengatur roda kereta. Proyek akhir ini hanya meneliti *bogie frame* yang terdiri dari rangkaian *2 side frame* dan transom yang dihubungkan dalam 1 kesatuan menjadi *bogie frame* pada kereta *flat wagon*. Standar yang digunakan dalam desain dan konstruksi bogie kereta api bervariasi tergantung pada negara, produsen, dan jenis kereta api. Analisis struktur statis ini dilakukan dengan merujuk pada standar EN-13749 untuk mengetahui tingkat keamanan dari *bogie frame* kereta *flat wagon*. Perangkat lunak yang digunakan kali ini yaitu Inventor Student Version 2020 yang digunakan dalam pembuatan desain dari model solid, dan menggunakan Ansys Workbench sebagai analisis simulasi. Setelah dilakukan simulasi didapatkan beberapa poin yaitu *principal stress* dan *directional deformation* dari 6 kasus pembebanan yang dilakukan. Didapatkan nilai tegangan maksimal dan deformasi maksimal yang berbeda-beda tiap *load case*. Tegangan maksimal dan nilai deformasi tertinggi terjadi pada *load case* 1 dimana kereta menerima *full load* saja dalam kondisi kereta diam atau bergerak dengan kecepatan tetap atau gaya normal. Tetapi tegangan maksimal yang keluar tidak melebihi batas *yield stress* sehingga kereta masih dinyatakan aman apabila terkena beban eksepsional, bagian yang terkena *critical area* bisa dilakukan dengan penggantian ketebalan dari plat tersebut.

Kata Kunci: *Bogie Frame Flat Wagon, Standard EN 13749, Finite Element Method*

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE RESISTANCE OF FLAT WAGON TRAIN BOGIE FRAME STRUCTURES TO EXCEPTIONAL LOADS AT PT INDUSTRI KERETA API (PERSERO)

Student Name /NRP : Uci Nur Hidayati / 2038201055
Department : Industrial Mechanical Engineering Vocational Faculty ITS
Advisor : Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., M.T
Ir. Winarto, DEA

Abstract

Trains are mass transportation, as is often found, passenger trains not only carry passengers, now train transportation can also transport goods. Goods transport trains or what are usually called flat wagons are a special type of goods transporter. In this final project we will discuss bogies, bogies, an important sub-system in train design which plays a role in supporting and adjusting the train wheels. This final project only examines the bogie frame which consists of a series of 2 side frames and a transom which are connected in one unit to form a bogie frame on a flat wagon train. The standards used in the design and construction of railroad bogies vary depending on the country, manufacturer, and type of train. This static structural analysis was carried out by referring to the EN-13749 standard to determine the safety level of the flat wagon bogie frame. The software used this time is Inventor Student Version 2020 which is used to create designs from solid models, and uses Ansys Workbench as simulation analysis. After carrying out the simulation, several points were obtained, namely principal stress and directional deformation from the 6 loading cases carried out. The maximum stress and maximum deformation values obtained are different for each load case. The maximum stress and highest deformation value occur in load case 1 where the train receives full load only when the train is stationary or moving at a constant speed or normal force. However, the maximum stress that comes out does not exceed the yield stress limit so that the train is still declared safe if it is exposed to exceptional loads. The parts affected by critical areas can be replaced by changing the thickness of the plate.

Keywords: *Bogie Frame Flat Wagon, Standard EN 13749, Finite Element Method*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunianya sehingga peneliti dapat menyelesaikan Proyek Akhir yang berjudul Analisis Ketahanan Bogie Frame Kereta Flat Wagon Terhadap Beban Eksepsional Di PT Industri Kereta Api (Persero). Proyek Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik pada program Sarjana Terapan Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Terlaksananya Penelitian ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang sudah memberi arahan, bimbingan serta bantuan baik secara moril maupun materil. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., M.T selaku dosen pembimbing yang tidak pernah lelah membimbing dengan sebaik mungkin.
2. Bapak Ir. Winarto, DEA selaku Dosen Pembimbing kedua yang tidak pernah lelah membimbing dengan sebaik mungkin.
3. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Industri.
4. Bapak Dr. Ir. Mahirul Mursid, M.Sc selaku dosen wali selama perkuliahan.
5. Teristimewa Orang Tua Penulis yaitu Bapak Musonifin, Ibu Zunaidah Aminah, Kakak dan Adik yang mendoakan dan memberi dukungan selalu kepada penulis.
6. Gigih Satria Rifanando yang selalu mendengarkan keluh kesah penulis dalam mengerjakan, selalu memberikan semangat dan dukungan untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Teman-teman Koswe Nadira, Tata, Jesica yang terus memberikan dukungan dengan tulus untuk berjuang menyelesaikan Tugas Akhir ini hingga tuntas.
8. Mahasiswa Departemen Teknik Mesin Industri Angkatan 2020 dan seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Proyek Akhir ini. Seluruh pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu-satu yang telah membantu penulisan laporan ini.

Terima Kasih untuk segala bimbingan, arahan serta canda tawa kepada penulis selama melaksanakan Penelitian Proyek Akhir. Dan juga pengalaman yang diberikan kepada penulis. Dalam menyusun laporan Proyek Akhir ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan pada saat pelaksanaan maupun penyusunan Laporan Penelitian Proyek Akhir. Untuk itu kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak.

Surabaya, 17 Juli 2024

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
PERNYATAAN ORISINALITAS	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xv
KATA PENGANTAR.....	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR.....	xxiii
DAFTAR TABEL	xxvii
DAFTAR SIMBOL	xxix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
1.6 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Bogie Kereta	7
2.3 Metode Elemen Hingga	11
2.4 Standarisasi EN-13749:2011 (Tentang Aplikasi Perkeretaapian)	12
2.5 Analisis Tegangan.....	12
2.6 Deformasi.....	14
2.7 Analisis Beban yang Digunakan.....	14

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Alur Penelitian.....	17
3.2 Studi Literatur.....	18
3.3 Observasi Lapangan	19
3.4 Perumusan Masalah.....	19
3.5 Data Material	19
3.6 Pemodelan <i>Bogie Frame</i>	20
3.7 Analisis Kasus Pembebanan <i>Bogie Frame</i>	22
3.8 Metode Elemen Hingga.....	23
3.8.1 Pemodelan Geometri.....	23
3.8.2 Pemilihan Sistem Analisis	24
3.8.3 Pendefinisian Material dan Properti.....	25
3.8.4 <i>Meshing</i>	25
3.8.5 Penerapan Kondisi Batas dan Pembebanan	26
3.8.6 <i>Solution and Result</i>	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Perhitungan Kasus Pembebanan	27
4.2 Metode Simulasi Pembebanan Menggunakan <i>Software</i>	31
4.2.1 <i>Setting Engineering Data</i>	31
4.2.2 <i>Input Geometri</i>	32
4.2.3 <i>Input Boundary Conditions</i>	33
4.2.4 <i>Input Gaya</i>	34
4.2.5 Validasi <i>Meshing</i>	38
4.2.6 Uji Konvergensi	39
4.2.7 Hasil Pembebanan <i>Principal Stress</i>	41
4.2.8 Hasil Deformasi	53

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	83
5.1 Kesimpulan	83
5.2 Saran	83
DAFTAR PUSTAKA.....	85
LAMPIRAN	87
BIODATA PENULIS.....	94

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kereta Gerbong Datar	1
Gambar 2. 1 Hasil Analisa Kekuatan 4 <i>Load Case</i> (Dizo et al., 2018)	6
Gambar 2. 2 Nilai Tegangan Dari Hasil Pengukuran Regangan (Slavchev et al., 2017)	7
Gambar 2. 3 Bogie K-2.....	8
Gambar 2. 4 Bogie K-4.....	9
Gambar 2. 5 Bogie TB-398 tipe K-5	9
Gambar 2. 6 Bogie K-7.....	10
Gambar 2. 7 Bogie Barber	10
Gambar 3. 2 Desain 3D Bogie	20
Gambar 3. 3 Desain 3D Transom.....	20
Gambar 3. 4 Desain 3D <i>Side Frame</i>	21
Gambar 3. 5 Desain <i>Assembly Bogie Frame</i>	21
Gambar 3. 6 <i>Free Body Diagram</i>	22
Gambar 3. 7 <i>Work Plane Inventor</i>	24
Gambar 3. 8 Tampilan <i>Static Structural</i>	24
Gambar 3. 9 Tampilan Material dan Properti	25
Gambar 3. 10 Tampilan <i>Meshing</i>	26
Gambar 4. 1 <i>Free Body Diagram</i> Beban Bogie (Kondo & Yamazaki, 2013).....	27
Gambar 4. 2 <i>Material Properties</i>	32
Gambar 4. 3 Impor File Desain ke Ansys.....	32
Gambar 4. 4 Input Model Geometri.....	33
Gambar 4. 5 Pemilihan <i>Remote Displacement</i>	33
Gambar 4. 6 Input Gaya Pada <i>Load Case 1</i>	34
Gambar 4. 7 Input Gaya Pada <i>Load Case 2</i>	35
Gambar 4. 8 Input Gaya Pada <i>Load Case 3</i>	35
Gambar 4. 9 Input Gaya Pada <i>Load Case 4</i>	36
Gambar 4. 10 Input Gaya Pada <i>Load Case 5</i>	37
Gambar 4. 11 Input Gaya Pada <i>Load Case 6</i>	37
Gambar 4. 12 <i>Element Quality mesh spectrum</i> (www.ansys.com).....	38
Gambar 4. 13 <i>Skewness mesh spectrum</i> (www.ansys.com).....	38
Gambar 4. 14 <i>Orthogonal Quality mesh spectrum</i> (www.ansys.com)	38

Gambar 4. 15 Menggunakan <i>Element size</i> 21 mm	38
Gambar 4. 16 Kualitas <i>Meshing</i> : (a) <i>Element Quality</i> , (b) <i>Skewness Quality</i> , (c) <i>Orthogonal Quality</i>	39
Gambar 4. 17 Grafik Uji Konvergensi	40
Gambar 4. 18 Metode <i>Principal Stress</i>	41
Gambar 4. 19 Hasil Simulasi <i>Principal Stress</i> Pada <i>Load Case 1</i>	42
Gambar 4. 20 Titik Tegangan Maksimal <i>Load Case 1</i>	43
Gambar 4. 21 Hasil Simulasi <i>Principal Stress</i> Pada <i>Load Case 2</i>	44
Gambar 4. 22 Titik Tegangan Maksimal <i>Load Case 2</i>	44
Gambar 4. 23 Hasil Simulasi <i>Principal Stress</i> Pada <i>Load Case 3</i>	45
Gambar 4. 24 Titik Tegangan Maksimal <i>Load Case 3</i>	46
Gambar 4. 25 Hasil Simulasi <i>Principal Stress</i> Pada <i>Load Case 4</i>	47
Gambar 4. 26 Titik Tegangan Maksimal <i>Load Case 4</i>	47
Gambar 4. 27 Hasil Simulasi <i>Principal Stress</i> Pada <i>Load Case 5</i>	48
Gambar 4. 28 Titik Tegangan Maksimal <i>Load Case 5</i>	49
Gambar 4. 29 Hasil Simulasi <i>Principal Stress</i> Pada <i>Load Case 6</i>	50
Gambar 4. 30 Titik Tegangan Maksimal <i>Load Case 6</i>	50
Gambar 4. 31 Metode Deformasi	53
Gambar 4. 32 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	54
Gambar 4. 33 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	54
Gambar 4. 34 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	55
Gambar 4. 35 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	55
Gambar 4. 36 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	56
Gambar 4. 37 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	56
Gambar 4. 38 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	57
Gambar 4. 39 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	57
Gambar 4. 40 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	58
Gambar 4. 41 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	58
Gambar 4. 42 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	59
Gambar 4. 43 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	59
Gambar 4. 44 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	60
Gambar 4. 45 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	60
Gambar 4. 46 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	61

Gambar 4. 47 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	61
Gambar 4. 48 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	62
Gambar 4. 49 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	62
Gambar 4. 50 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	63
Gambar 4. 51 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	64
Gambar 4. 52 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	65
Gambar 4. 53 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	65
Gambar 4. 54 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	66
Gambar 4. 55 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	66
Gambar 4. 56 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	67
Gambar 4. 57 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	67
Gambar 4. 58 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	68
Gambar 4. 59 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	68
Gambar 4. 60 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	69
Gambar 4. 61 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	69
Gambar 4. 62 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	70
Gambar 4. 63 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>X-Axis</i>	70
Gambar 4. 64 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	71
Gambar 4. 65 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Y-Axis</i>	72
Gambar 4. 66 <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	72
Gambar 4. 67 Titik <i>Directional Deformation</i> Pada <i>Z-Axis</i>	73

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Calculated Loads For Bogie Frame (Dižo et al., 2017).....	5
Tabel 2. 2 Kombinasi Gaya Pembebanan.....	5
Tabel 2. 3 Nilai Beban Yang Dihitung (Dizo et al., 2018).....	6
Tabel 3. 1 Spesifikasi Material	19
Tabel 3. 2 Kombinasi Pembebanan Gaya	22
Tabel 4. 1 Data <i>Load</i>	27
Tabel 4. 2 Perhitungan Beban <i>Bogie Frame</i>	31
Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Beban Pada <i>Load case 1</i>	34
Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Beban Pada <i>Load Case 2</i>	34
Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Beban Pada <i>Load Case 3</i>	35
Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Beban Pada <i>Load Case 4</i>	36
Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Beban Pada <i>Load Case 5</i>	36
Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Beban Pada <i>Load Case 6</i>	37
Tabel 4. 9 Kualitas <i>Meshing</i>	39
Tabel 4. 10 Hasil Uji Konvergensi	40
Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Tegangan Amplitudo dan Tegangan Rata-rata	51
Tabel 4. 12 Validasi Tegangan Maximum <i>Principal Stress</i>	51
Tabel 4. 13 Hasil Rangkuman Nilai Deformasi.....	73
Tabel 4. 14 Ringkasan Keterangan Hasil.....	77

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

σ_m	= Tegangan Rata-rata
σ_a	= Tegangan Amplitudo
σ	= Tegangan
F	= Gaya yang bekerja pada benda
A	= Luas Penampang
ε	= Regangan
ΔL	= Perubahan panjang
L_0	= Panjang awal material
σ_{max}	= Tegangan Maksimal
σ_{min}	= Tegangan Minimal
F_Z	= Total beban vertikal yang ditopang oleh bogie
M_w	= Berat yang ditopang per bogie
M_v	= Berat Total
m	= Massa bogie
g	= Gravitasi
α	= Koefisien ayunan benda
F_{ZP}	= Gaya vertikal yang diterapkan pada poros tengah
F_{Y1max}	= Gaya longitudinal
F_{Z1max}/F_{Z2max}	= Gaya vertikal yang diterapkan pada setiap <i>side bearer</i>
F_{X1max}/F_{X2max}	= Gaya transversal

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini, masyarakat dituntut untuk bergerak cepat. Hal ini dapat difasilitasi dengan penggunaan berbagai transportasi yang memudahkan perpindahan atau pergerakan barang dan manusia. Salah satu hal yang diperlukan dari suatu transportasi adalah bagaimana seseorang atau barang dapat dengan aman dan cepat mencapai tujuan yang diinginkan dengan alat transportasi tersebut. Kereta api merupakan transportasi darat yang memiliki manfaat dan peluang besar untuk masyarakat dalam memenuhi kebutuhan di bidang pengangkutan barang. Manfaat dari kereta pengangkut barang dibandingkan transportasi darat yang lain yaitu, selama pengangkutan barang tidak dipengaruhi oleh kendaraan yang lainnya, tidak menimbulkan kemacetan yang panjang, kereta api sendiri dapat mengangkut barang dengan jumlah besar dibandingkan transportasi darat lainnya.

Bogie kereta api merupakan salah satu bagian terpenting dalam sistem perkeretaapian. Bogie adalah suatu konstruksi yang terdiri dari dua (atau lebih) set roda nantinya digabungkan oleh rangka yang ditempatkan di bawah kereta seperti pada gambar 1.1. Fungsi utama bogie adalah untuk menopang kereta, mendistribusikan beban dengan baik antar roda dan memungkinkan kereta bergerak dengan lancar di atas rel. Bogie memiliki beberapa komponen dasar antara lain roda, as, pegas, suspensi, dan rem. Semua bagian tersebut berperan dalam menjaga stabilitas, keseimbangan, dan efisiensi kereta api saat bergerak di sepanjang rel. Berbagai jenis bogie yang digunakan pada kereta api bergantung pada jenis kereta, beban yang diangkut, dan karakteristik lintasan. Beberapa jenis bogie memiliki peredam kejut untuk meningkatkan kenyamanan atau guncangan, sementara yang lainnya meningkatkan daya tahan dan stabilitas pada kecepatan tinggi. Bogie merupakan aspek penting dalam desain dan pengoperasian kereta api karena berdampak besar terhadap efisiensi, keselamatan dan kenyamanan selama perjalanan kereta api.



Gambar 1. 1 Kereta Gerbong Datar

Dengan berkembangnya zaman perubahan bogie kereta semakin meningkat modern dan disesuaikan atau digolongkan sesuai dengan kebutuhan beban atau barang yang diangkut. Di PT Industri Kereta Api akan membuat atau memproduksi bogie kereta berjenis kereta *flat wagon* jalur LRT (*Light Rail Transit*) Jabodebek yang nantinya akan mengangkut barang seperti rel dengan jenis baru yang berbeda dari bogie kereta pengangkut barang sebelumnya. Yang membedakan bogie kereta *flat wagon* yang terbaru dengan bogie kereta yang terdahulu ditentukan oleh spesifikasi teknis, apabila treknya berbeda maka bentuk dari desain bogienya juga berbeda. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap struktur statis pada *bogie frame* kereta *flat wagon* yang terbaru terhadap beban eksepsional untuk memastikan bahwa desain bogie yang terbaru aman digunakan dan dapat dijadikan tinjauan untuk produksi bogie selanjutnya.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang tersebut, maka dirumuskan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

- a) Bagaimana ketahanan bogie *frame* dari beban penuh yang bekerja?
- b) Bagaimana dan dimana area kritis dari *bogie frame* kereta?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin diperoleh dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a) Mengetahui ketahanan *bogie frame* terhadap beban penuh yang bekerja.
- b) Mengetahui area kritis yang terjadi pada *bogie frame* kereta.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a) Sambungan las pada *bogie frame* dianggap sempurna.
- b) Pada penelitian kali ini hanya dilakukan pengujian statis dengan menggunakan *software*.
- c) Menggunakan material sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan.
- d) Bagian selain dari kerangka utama *bogie frame* diabaikan.
- e) Jenis bogie yang digunakan ditentukan oleh Perusahaan.
- f) *Load Case* yang diujikan hanya pada case tertentu.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) Memastikan desain bogie frame yang dirancang aman digunakan.
- b) Memberikan pengetahuan baru tentang simulasi ansys khususnya terkait analisis struktur statis bogie.
- c) Bogie yang diteliti bisa dijadikan acuan dalam desain produksi kereta flat wagon selanjutnya.
- d) Menambah skill baru kepada mahasiswa dalam menggunakan software Autodesk Inventor Student Version 2020.
- e) Memberikan pengetahuan baru kepada mahasiswa dalam memahami dari konsep Finite Element Analysis.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan proposal proyek akhir ini dibagi menjadi beberapa bab, agar hasil pemikiran dari penulis dapat dipahami oleh pembaca. Maka sistematika penulisan proposal proyek akhir, antara lain:

1. BAB I Pendahuluan

Pada bagian ini menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan juga sistematika penulisan.

2. BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini menjelaskan dan menganalisis kajian literatur atau penelitian terdahulu yang berkaitan dengan *bogie frame* kereta flat wagon.

3. BAB III Metodologi Penelitian

Pada bagian ini membahas tentang dasar-dasar teori yang digunakan dan membahas mengenai metode yang akan digunakan, tahapan dari penelitian, pengambilan data, pemodelan bogie frame, analisis kasus pembebanan bogie frame, dan menjelaskan tahapan dari metode elemen hingga.

4. BAB IV Analisa Hasil dan Pembahasan

Analisa hasil dan pembahasan menunjukkan nilai perhitungan yang akan dimasukkan kedalam simulasi, dan tahapan dari simulasi yang juga menjelaskan metode dari simulasi pembebanan dengan menggunakan software.

5. BAB V Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran adalah bagian yang merangkum hasil penelitian dan memberikan rekomendasi untuk penelitian lanjutan atau tindakan praktis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian kali ini menggunakan referensi dari penelitian terdahulu yang masih berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Penelitian terkait dengan analisis tegangan statis pada *bogie frame* kereta dengan menentukan beberapa kasus pembebanan yang pernah dilakukan oleh (Dižo et al., 2017) dalam penelitiannya yang berjudul “*Structural Analysis of a Modified Freight Wagon Bogie Frame*” pada penelitiannya menyajikan hasil kasus pembebanan terpilih untuk *bogie frame* gerbong barang atau gerbong datar yang dimodifikasi.

Pada penelitiannya menggunakan bogie yang paling sering digunakan yaitu bogie Y25 pada penelitiannya kali ini untuk mengetahui apakah struktur *bogie frame* sudah memenuhi kriteria ketat untuk semua kendaraan. Terdapat empat kasus pembebanan yang dimasukkan sebagai beban luar biasa. Setelah melakukan analisis numerik terhadap struktur rangka bogie dan berdasarkan hasil penelitiannya, dinyatakan memenuhi syarat struktur yang ditentukan dalam standar.

Tabel 2. 1 *Calculated Loads For Bogie Frame* (Dižo et al., 2017)

Load	Calculated value [kN]	Formula
F_Y	392.4	(1)
F_{YPmax}	784.8	(2)
$F_{YI_{max}}$	176.58	(3)
F_{YP}	412.02	(4)
$F_{ZI_{max}}$	83.575	(5)
$F_{XI_{max}}$	44.145	(6)

Tabel 2. 2 Kombinasi Gaya Pembebanan

Load case	F_{YPmax} [kN]	F_{YP} [kN]	$F_{YI_{max}}$ [kN]	$F_{ZI_{max}}$ [kN]	$F_{XI_{max}}$ [kN]
1 st	784.8	0	0	0	0
2 nd	0	412.02	176.58	0	0
3 rd	0	412.02	176.58	83.575	0
4 th	0	412.02	176.58	0	44.145

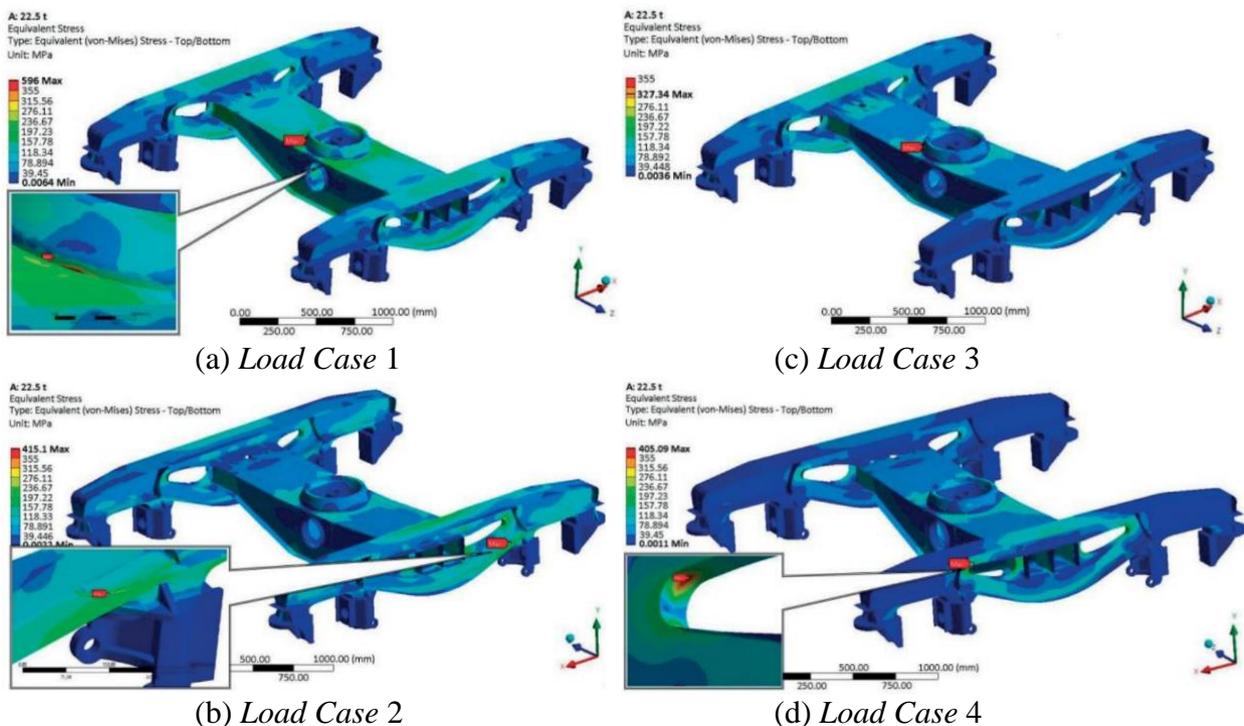
Rangka bogie pada umumnya terbuat dari baja S235 dan S355 dengan tegangan luluh minimal masing-masing 340-MPa dan 520-630 MPa. Baja S355 digunakan untuk *centre pivot* dan *axle guides*. Bahan dianggap homogen, isotropic, linier dan elastis. Sifat mekanik yang diketahui *Young modulus of elasticity* $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ Pa, *Poisson ratio* = 0.3. Dari 4 simulasi pembebanan didapatkan pada kasus pertama $F_{YPmax} = 784,8$ kN dengan nilai maksimumnya

460,71 MPa. Kasus kedua $FYP = 412.02$ kN, $FYI_{max} = 176.58$ kN), didapatkan nilai maksimumnya 309,26 MPa. Kasus ketiga $FYP = 412.02$ kN, $FYI_{max} = 176.58$ kN juga oleh gaya lateral $FZI_{max} = 83.575$ kN didapatkan nilai maksimum sebesar 311,61 MPa. Kasus keempat beban vertikal $FYP = 412.02$ kN, $FYI_{max} = 176.58$ kN gaya horizontal memanjang $FXI_{max} = 44,145$ kN, didapatkan nilai maksimum sebesar 313,55 MPa.

Tabel 2. 3 Nilai Beban Yang Dihitung (Dizo et al., 2018)

Load	Value (kN)	Formula
F_Z	399.760	(1)
F_{ZPmax}	799.520	(2)
$F_{ZI_{max}}$	179.892	(3)
F_{ZP}	419.750	(4)
$F_{YI_{max}}$	100.074	(5)
$F_{XI_{max}}$	44.145	(6)

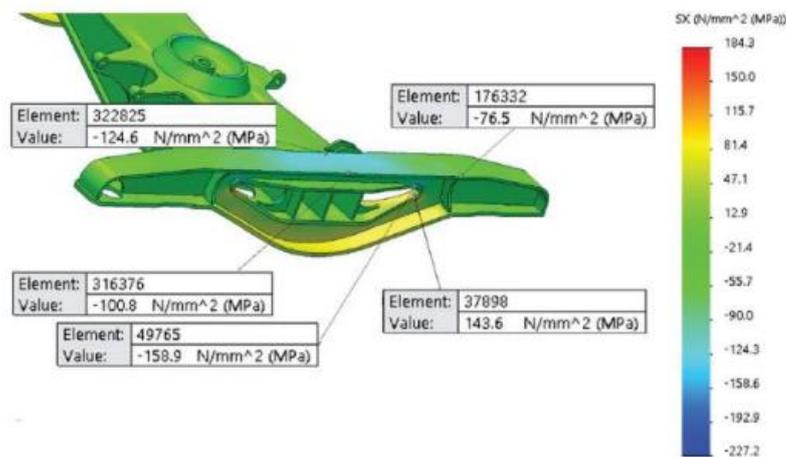
Tabel 2.3 merupakan kasus pembebanan statis dengan 6 formula yang akan digunakan untuk kasus pembebanan. Kali ini (Dizo et al., 2018) melakukan penelitian yang serupa dengan menggunakan pembebanan *exceptional load* dengan menggunakan rumus standar EN 13749 dengan menggunakan 4 kasus pembebanan.



Gambar 2. 1 Hasil Analisa Kekuatan 4 Load Case (Dizo et al., 2018)

Gambar 2.1 terdapat 4 hasil dari kasus pembebanan *bogie frame* yang dibebani oleh gaya-gaya yang bekerja beban luar biasa yang telah didapatkan pada tabel 2.3. Dari hasil 4 simulasi kasus pembebanan didapatkan nilai pada *load case 1* = 596MPa, *load case 2* = 327.34 MPa, *load case 3* = 415.10 MPa, *load case 4* = 405.1 MPa. Pada *load case 2, 3* dan *4* pembebanan dinyatakan aman karena tidak melebihi nilai dari *Yield Strength Material*. Sedangkan pada *load case 1* melebihi dari nilai *yield strength* tetapi letaknya di area *centre pivot* dan sambungan. Nilai yang didapatkan melebihi dari *yield material* namun hanya terjadi secara lokal.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh slavchev pada tahun 2017 dengan *bogie wagon* mengenai analisis perbandingan hasil perhitungan kekuatan statis dan uji kekuatan rangka bogie Y25Ls-K, penelitiannya merujuk pada standar eropa EN 13749-2011 dan EN 12663-2010. Dengan melakukan 13 studi kasus pembebanan untuk mengetahui tegangan dan perpindahan konstruksi dari rangka bogie. (Slavchev et al., 2017)



Gambar 2. 2 Nilai Tegangan Dari Hasil Pengukuran Regangan (Slavchev et al., 2017)

2.2 Bogie Kereta

Bogie adalah kerangka atau sasis yang terdiri dari dua perangkat roda atau lebih yang digabungkan oleh rangka. Bogie dilengkapi dengan sistem pemegasan, pengereman, dengan atau tanpa peralatan penggerak dan anti selip. Pemasangan bogie dapat dilakukan secara permanen maupun non-permanen. Pada kereta api, bogie berfungsi untuk menghasilkan fleksibilitas kereta terhadap rel sehingga roda dapat tetap mengikuti arah rel saat melewati tikungan (*curve*). Sudut antara garis lurus badan kereta dengan rel ketika kereta menikung akan menyebabkan terjadinya kontak antara *flens* dengan rel pada salah satu sisi roda. Pada kereta tanpa bogie, besar sudut tersebut terbatas karena roda selalu pada posisi segaris dengan badan kereta sehingga saat *flens* sudah tidak mampu menahan rel, maka roda akan naik ke atas rel.

Kondisi tersebut memicu terjadinya *derailment* atau anjlok. Dengan adanya bogie, posisi roda tidak segaris dengan badan kereta melainkan memiliki sudut tertentu yang memungkinkan roda dapat berbelok mengikuti rel tanpa terjadi anjlok. Selain menghasilkan fleksibilitas, bogie berfungsi untuk meredam efek yang ditimbulkan pada permukaan rel yang bergelombang naik turun. *Center pivot* sebagai titik tengah bogie akan membagi defleksi yang terjadi di antara dua set rodanya untuk membuat kereta lebih stabil walaupun permukaan rel tidak rata. Adapun macam-macam jenis dari bogie:

a) Bogie Pennsylvania (K-2)

Bogie jenis ini tinggal sedikit, yaitu pada kereta Kelas Ekonomi lokal dan kereta bagasi (B) yang dibuat sekitar tahun 1954. Bogie ini merupakan satu –satunya jenis bogie yang menggunakan batang penghubung antara periuk gandar yang satu dengan yang lainnya. Pegas primer menggunakan pegas ulir sedangkan pegas sekunder menggunakan pegas daun, tanpa peredam kejut (*shock absorber*).



Gambar 2. 3 Bogie K-2

(Sumber: <https://www.inka.co.id/berita/533>)

b) Bogie SIG atau NT-504 (K-4)

Bogie jenis ini digunakan pada kereta penumpang kelas 3 / Ekonomi (K3) dan populasinya tinggal sedikit, yaitu pada kereta buatan tahun 1963 / 1964. Pegas primer pada bogie ini adalah pegas ulir yang dilengkapi peredam kejut yang berfungsi sebagai pengarah gandar (*axle guide*), sedangkan pegas sekunder menggunakan pegas torsi tanpa peredam kejut.



Gambar 2. 4 Bogie K-4
(Sumber: <https://www.inka.co.id/berita/533>)

c) Bogie NT-11 (K-5)

Bogie NT-11 merupakan bogie dengan populasi terbanyak di Indonesia, dan digunakan pada kereta kelas eksekutif, bisnis, dan ekonomi. Bogie ini menggunakan pegas ulir sebagai pegas primer maupun sekunder, yang dilengkapi dengan peredam kejut arah vertikal pada pemegasan sekunder. Kereta – kereta yang menggunakan NT-11 diproduksi oleh berbagai pabrik dari Yugoslavia, Hongaria, Jepang dan PT. INKA (Indonesia). Selama ini dinilai bahwa bogie NT-11 merupakan bogie yang paling sesuai dioperasikan pada kondisi jalan rel di Indonesia. Sekarang ini bogie K-5 yang baru merupakan bogie TB-398 buatan PT. INKA yang digunakan pada kereta-kereta ekonomi maupun eksekutif terbaru produksi PT. INKA.



Gambar 2. 5 Bogie TB-398 tipe K-5
(Sumber: <https://www.inka.co.id/berita/533>)

d) Bogie Gornitz (K-7)

Populasi kereta yang menggunakan bogie ini sekarang sudah sedikit. Kebanyakan di jumpai di kereta penumpang kelas ekonomi. Pegas primer maupun sekunder menggunakan pegas ulir dan dilengkapi peredam kejut arah vertikal dan lateral. Bogie ini merupakan bogie yang tidak menggunakan pelat gesek sebagai pengarah periuk gandar.



Gambar 2. 6 Bogie K-7

(Sumber: <https://www.inka.co.id/berita/533>)

e) Bogie Barber

Bogie barber adalah jenis “*Three piece bogie*” yang mempunyai rangka fleksibel dari baja tuang menggunakan pegas ulir dan peredam gesek yang bersifat variabel sesuai berat muatan gerbong. Bogie barber dibuat oleh pabrik Nippon Sharyo, PT. Barata, Trenton Industry dan digunakan pada gerbong tertutup (GGW), gerbong ketel (KKW), gerbong batu bara (KKBW), gerbong datar untuk peti kemas (PPCW).



Gambar 2. 7 Bogie Barber

(Sumber: <https://www.inka.co.id/berita/533>)

2.3 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik yang bertujuan untuk memprediksi solusi dari matematis untuk mendapatkan solusi yang mendekati kondisi sebenarnya. Metode elemen hingga ini dapat dipakai untuk memecahkan berbagai masalah atau problem engineering. Daerah yang dianalisis dapat mempunyai beban, bentuk, dan kondisi batas yang sembarang. Metode elemen hingga membagi-bagi struktur menjadi elemen-elemen, dan elemen dihubungkan dengan *nodes*. Metode elemen hingga suatu elemen yang digunakan harus memiliki matriks kekakuan tertentu, perhitungan persamaan matriks pada metode elemen hingga menggunakan operasi komputer, dikarenakan perhitungan matriks yang cukup rumit sehingga menggunakan komputer untuk memudahkan. Kemudahan penggunaan berbagai hal bisa saja tergabung pada satu program komputer, dengan menyiapkan data pemilihan jenis, geometri, kondisi batas, elemen dan lain-lain. (Pranata, 2019)

Prosedur Metode Elemen Hingga :

Tahapan langkah-langkah dalam menyelesaikan analisis struktur menggunakan *Software* elemen hingga secara garis besar menjadi sebagai berikut :

1. Pembuatan geometri awal struktur yang akan dianalisis
2. Penentuan jenis material dan properti material yang digunakan. Dengan massa jenis dari material yang digunakan.
3. Pengaplikasian *mesh* pada geometri yang akan dianalisis
4. Pemberian kondisi batas (*Boundary condition*). Kondisi batas diperlukan untuk menentukan bagaimana model tertumpu pada dudukannya dalam kondisi nyata . Hal ini perlu dilakukan untuk menentukan bagaimana hasil dari anallisa model geometri tersebut.
5. Pemberian pembebanan, kondisi pembebanan yang diberikan pada model struktur bergantung dengan kondisi nyatanya. Kondisi ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang sedekat mungkin dengan kondisi yang sebenarnya. Beban yang biasa digunakan meliputi beban gaya, tekanan, momen baik statik maupun dinamis.
6. Penentuan jenis material pada setiap *part* dari geometri.
7. Penentuan jenis analisis yang akan digunakan.
8. Analisa, pada tahap ini biasanya dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga.

2.4 Standarisasi EN-13749:2011 (Tentang Aplikasi Perkeretaapian)

Standar EN-13749:2011 adalah standar Eropa yang mengatur aplikasi perkeretaapian, khususnya mengenai roda dan bogie. Standar ini memberikan metode untuk merancang kerangka bogie yang memenuhi persyaratan struktural. Standar ini diterapkan untuk memastikan keselamatan dan kinerja yang memadai dari sistem perkeretaapian. EN-13749:2011 telah disetujui oleh CEN (European Committee for Standardization) pada tanggal 26 Februari 2011 dan berlaku di seluruh negara anggota CEN (13749, 2011). Pada standar EN-13749 Persyaratan struktural untuk bogie dalam kategori tertentu tidak unik dan harus selalu didefinisikan sesuai dengan persyaratan operasi, ada perbedaan dalam pilihan antar aplikasi sehingga tidak boleh bertentangan dengan standar eropa ini. eropa ini. Tidak semua jenis bogie masuk kedalam kategori standar EN-13749. Sedangkan *bogie frame* kereta *flat wagon* digolongkan kedalam golongan B-V dikarenakan merupakan bogie untuk barang. Dalam standar ini menjabarkan ketentuan untuk analisa pada bogie meliputi *static test* dan *fatigue test*. *Static test* dibedakan menjadi 2 berdasarkan tipe pembebanannya yaitu beban luar biasa dimana tidak terjadi deformasi permanen atau defleksi yang berlebihan. Dan tes saat beban normal dimana tidak timbul *fatigue crack*. pada penelitian ini dilakukan pengujian statis digunakan tes beban luar biasa.

2.5 Analisis Tegangan

Dalam buku "*Mechanics of Materials*" oleh Russell C. Hibbeler, konsep von Mises sering digunakan dalam konteks analisis tegangan untuk mengukur risiko kegagalan suatu bahan yang mengalami tegangan. Analisis *von mises stress* adalah salah satu teknik analisis yang digunakan dalam Metode Elemen Hingga (MEH) untuk menentukan tegangan pada suatu struktur, untuk mengidentifikasi daerah atau komponen yang mungkin gagal berdasarkan tegangan yang diterimanya dari beban yang dikenakan. Analisis *von mises stress* digunakan untuk mengetahui kegagalan suatu material saat tegangan ekuivalen melebihi *yield stress* dari material yang digunakan, ketika *von mises stress* melebihi batas kekuatan materi, materi tersebut cenderung mengalami deformasi plastis atau mengalami kegagalan (Salimi, 2023).

Selain *von mises stress* terdapat *principal stress* dalam pengujian tegangan, *principal stress* adalah tegangan maksimum dan minimum pada suatu titik dalam struktur yang muncul dalam arah tertentu berbeda dengan *von mises stress* yang tidak memiliki arah. *Principal stress* diukur dalam arah tertentu dan merupakan hasil dari kombinasi tegangan normal dan tegangan geser, dan memiliki tiga tegangan principal σ_1 , σ_2 , dan σ_3 , σ_1 adalah *principal stress*

maksimum, σ_3 adalah tegangan minimum, σ_2 adalah tegangan yang berada diantara keduanya. Tujuan dari *principal stress* digunakan untuk menentukan nilai maksimum dan minimum dari tegangan normal pada suatu titik dalam struktur, untuk mengevaluasi potensi kegagalan pada bidang tertentu dan untuk merancang struktur yang lebih efektif. Selain itu, data tersebut juga digunakan untuk menganalisis kelelahan material yang dapat terjadi akibat pembebanan multiaksial atau kondisi di mana sebuah komponen atau struktur mengalami tegangan atau regangan dalam lebih dari satu arah atau sumbu secara bersamaan yang dialami bogie selama operasi. Dengan memahami distribusi *principal stress*, desain bogie dapat dioptimalkan berdasarkan kriteria kegagalan tertentu guna meminimalkan konsentrasi tegangan pada area-area kritis. Nilai tegangan rata-rata dan amplitudo ini dapat dimanfaatkan untuk memverifikasi apakah kondisi pembebanan multiaksial dalam simulasi telah mewakili kondisi operasional nyata yang akan dialami bogie. Pengujian tegangan maksimal dan minimal principal stress untuk menentukan dari besar tegangan rata-rata σ_m dan tegangan amplitudo σ_a . (Prasojo & Kaelani, 2016)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (2.2)$$

Keterangan :

- σ_m = Tegangan Rata-rata
- σ_a = Tegangan Amplitudo
- σ_{max} = Tegangan Maksimal
- σ_{min} = Tegangan Minimal

Rumus Tegangan :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

Keterangan :

- σ = Tegangan
- F = Gaya yang bekerja pada benda
- A = Luas Penampang

Rumus Regangan :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

Keterangan :

ε = Regangan

ΔL = Perubahan panjang

L_0 = Panjang awal material

2.6 Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu benda akibat adanya gaya yang bekerja pada benda tersebut. Deformasi termasuk penting dalam rekayasa struktural dan rekayasa material karena memahami bagaimana material dan struktur merespon beban adalah kunci untuk merancang struktur yang aman dan efisien. Deformasi dapat terjadi dalam berbagai cara, tergantung pada jenis material dan jenis beban yang diberikan. Beberapa jenis deformasi yang sering ditemui dalam mekanika bahan. (R.C.Hibbeler, 2016)

- Deformasi Elastis : Deformasi ini dapat terjadi saat bahan mengalami perubahan bentuk akibat beban, tetapi akan kembali ke bentuk semula ketika beban dihilangkan. Termasuk dalam karakteristik bahan elastis. Deformasi elastis sering ditemukan pada material seperti baja dan aluminium.
- Deformasi Plastis : Deformasi plastis ini terjadi saat bahan mengalami perubahan bentuk yang bersifat permanen bahkan setelah beban dihilangkan. Deformasi plastis ini terjadi ketika material mengalami tegangan yang melebihi batas elastisitasnya. Termasuk dalam karakteristik bahan plastis, seperti logam.
- Deformasi Geser : Deformasi geser terjadi ketika dua lapisan bahan bergeser satu terhadap yang lain, mengubah bentuk relatif disalah satunya, merupakan jenis deformasi yang sering terkait dengan bahan yang mengalami beban geser, seperti logam yang mengalami pengerjaan logam.

2.7 Analisis Beban yang Digunakan

Pada Analisis kasus pembebanan *bogie frame* didapatkan rumus untuk mengetahui nilai dari gaya yang bekerja pada bogie, rumus tersebut didapatkan dari standar EN 13749 yang sesuai dengan kategori *bogie wagon* atau kategori B-V dan terdapat 6 variasi kasus pembebanan yang mendekati kondisi *real*. Perhitungan beban bogie terdapat dalam standar (13749, 2011).

a. Perhitungan Beban Bogie Gaya Vertikal

Bogie dibebani dalam arah vertikal, gaya vertikal pada bogie kereta barang adalah kekuatan yang berperan dalam menyalurkan beban dari kereta barang ke rel. Yang berfungsi membantu mendistribusikan beban dari kereta ke rel, memastikan

bahwa berat didistribusikan secara merata sepanjang jalur. Pengaruh Gaya Vertikal pada Infrastruktur yang berlebihan atau tidak merata dapat menyebabkan kerusakan Rel dan Roda, Tekanan berlebih pada rel atau roda dapat menyebabkan keausan, kelelahan bahan, atau kerusakan langsung (Bian et al., 2015)

$$F_Z = \left(\frac{M_w}{2} - m \right) \cdot g \quad (2.5)$$

Dimana :

F_Z = Total beban vertikal yang ditopang oleh bogie

M_w = Berat yang ditopang per bogie

m = Massa bogie

g = Gravitasi

Perhitungan beban Bogie dalam Gaya Vertikal (terdapat 2 case) yaitu:

Case 1 : gaya diterapkan hanya pada poros

$$F_{ZPmax} = 2 \cdot F_Z \quad (\text{Menggunakan beban faktor} = 2) \quad (2.6)$$

Dimana :

F_{ZPmax} = Gaya vertikal yang diterapkan pada poros tengah dengan beban *max*

Case 2 : gaya diterapkan pada poros dan satu *side bearer*

$$F_{Z1max} \text{ (or } F_{Z2max}) = 1,5 \times F_Z \cdot \alpha \quad (2.7)$$

$$F_{ZP} = 1,5 \times F_Z (1-\alpha) \quad (\text{Menggunakan beban faktor} = 1,5) \quad (2.8)$$

Dimana :

F_{Z1max} (or F_{Z2max}) = Gaya vertikal yang diterapkan pada setiap *side bearer*

F_{ZP} = Gaya vertikal yang diterapkan pada poros tengah

F_Z = Total beban vertikal yang ditopang oleh bogie

F_{Z1} dan F_{Z2} adalah gaya vertikal yang bekerja pada *sidebearers*, α adalah koefisien ayunan benda, Dalam kasus ini, telah mempertimbangkan dengan nilai $\alpha = 0,3$.

b. Perhitungan Beban Bogie Gaya Transversal

Gaya transversal pada bogie kereta barang adalah kekuatan lateral atau samping yang beraksi pada bogie saat kereta bergerak, terutama saat melintasi tikungan atau terkena angin samping. Gaya ini penting karena dapat mempengaruhi stabilitas kereta, meningkatkan risiko *derailment* jika tidak dikelola dengan baik. Gaya transversal

cenderung mendorong kereta ke sisi luar dari kurva ketika melalui tikungan. Gaya transversal meningkat dengan kecepatan kereta dan berkurang dengan memperbesar radius tikungan (Abe, 2015)

$$F_{x1max} = F_{x2max} = \frac{F_{xmax}}{2} = 10^4 + \frac{F_z + m \cdot g}{6} \quad (2.9)$$

Dimana :

F_{x1max} or F_{x2max} = Gaya transversal

F_z = Total beban vertikal yang ditopang oleh bogie

m = Massa bogie

g = Gravitasi

c. Perhitungan Beban Bogie Gaya Longitudinal

Gaya longitudinal pada bogie kereta barang adalah kekuatan yang bekerja sepanjang arah panjang kereta, gaya ini penting karena berpengaruh langsung terhadap bagaimana kereta memulai gerakan, berhenti, dan bagaimana kereta merespon saat mengalami perubahan kecepatan secara mendadak, seperti saat terjadi pengereman darurat. Gaya longitudinal menggambarkan interaksi antara kereta dan rel saat kereta mempercepat atau melambat. Kekuatan ini tergantung pada massa total kereta. (Zhai et al., 2019)

$$F_{y1max} = 0,1 \times (F_z + m \cdot g) \quad (2.10)$$

Dimana :

F_{y1max} = Gaya longitudinal

F_z = Total beban vertikal yang ditopang oleh bogie

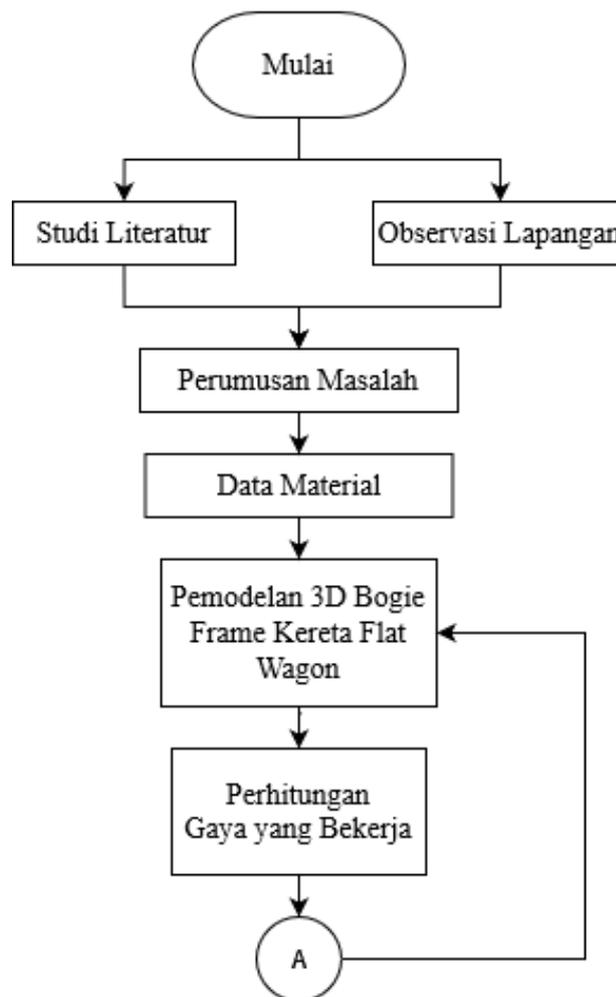
m = Massa bogie

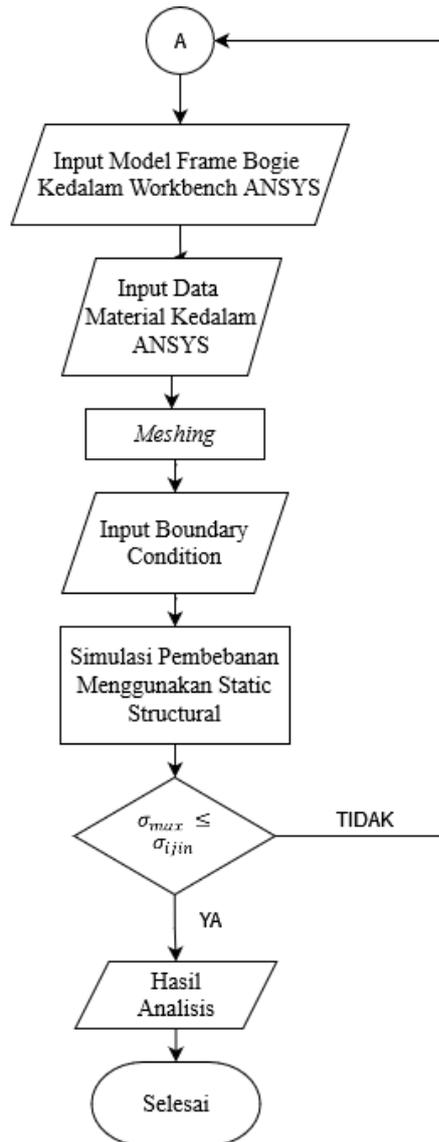
g = Gravitasi

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Pada bab ini akan dirumuskan mengenai langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini. Yang perlu dipersiapkan agar tercapainya penelitian yang valid. Pada penelitian *Bogie frame* kereta *flat wagon* ini dilakukan untuk menganalisa apabila bogie terkena beban eksepsional. *Bogie frame* kereta *flat wagon* ini merupakan bogie dari kereta pengangkut rel kereta api. Yang akan dianalisis kali ini hanya rangka dari bogie saja. Dalam melakukan penelitian tersebut dibutuhkan beberapa tahapan yang dilakukan, alur penelitian ini sendiri dapat dilihat pada gambar 3.1





3.2 Studi Literatur

Pada penelitian ini tahap awal yang dilaksanakan ialah melakukan studi literatur dari jurnal, buku, dan hasil karya Tugas Akhir yang dapat digunakan sebagai acuan yang berisi metodologi, hasil yang relevan dan terpercaya pada pengumpulan materi dalam penulisan proyek akhir ini. Saya menggunakan literatur seperti jurnal, buku dan beberapa artikel dari internet agar dapat menghasilkan informasi yang lengkap, terarah dan terpercaya dalam penulisan ini. Selain itu, studi literatur dilaksanakan agar penulis dapat lebih memahami tentang materi *bogie frame* dari kereta.

3.3 Observasi Lapangan

Tahap observasi lapangan dilakukan di PT. Industri Kereta Api Madiun untuk mengetahui kondisi aktual pada industri. Dilakukan observasi secara langsung khususnya pada proses manufaktur bogie, dimulai dari proses desain hingga mengetahui proses pembuatan bogie. Dalam melakukan proses desain, perlu dilakukan pengujian dengan berbagai metode. Salah satu metode yang digunakan adalah Metode Elemen Hingga, seperti yang akan dilakukan penelitian dalam karya tulis ini.

3.4 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah tentang proses desain bogie, di mana diperlukannya proses simulasi/ pengujian desain sebelum dilakukan proses manufaktur. Penggunaan bogie dalam industri kereta sangatlah penting, pada bogie yang diteliti ialah jenis bogie pengangkut rel kereta yang akan beroperasi di LRT Jabodebek. Sedangkan tujuan penelitian ini adalah memberikan hasil simulasi untuk mengetahui batas kemampuan, mengetahui area kritis dan batas keamanan dari desain yang sudah tersedia.

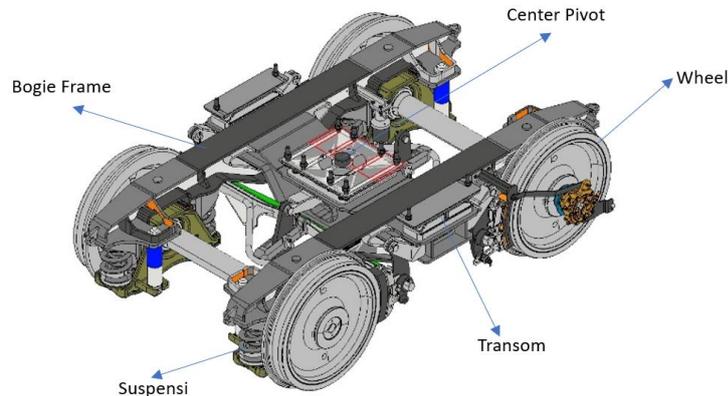
3.5 Data Material

Pada pembuatan *bogie frame* kereta *flat wagon*, jenis material yang digunakan yaitu S355J2+N pemilihan material ditentukan oleh permintaan dari customer kepada perusahaan. Dengan data material yang telah ditunjukkan pada Tabel 3.2 Material yang diperoleh terdapat Modulus Elastisitas sebesar 210 GPa, *Poisson's Ratio* sebesar 0,3, Masa Jenis sebesar $7.8 \times 10^{-c} \text{ kg/mm}^3$, Tegangan luluh sebesar 355 MPa, dan Tegangan Ultimate sebesar 470 – 630 MPa. Data Material ini didapatkan dari PT. Industri Kereta Api (Persero)

Tabel 3. 1 Spesifikasi Material

Material Properti	
Jenis Material	S355J2+N (BS EN 10025-2)
Modulus Elastisitas	210 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Masa Jenis	$7.8 \times 10^{-c} \text{ kg/mm}^3$
Tegangan Luluh	355 MPa
Tegangan Ultimate	470-630 MPa

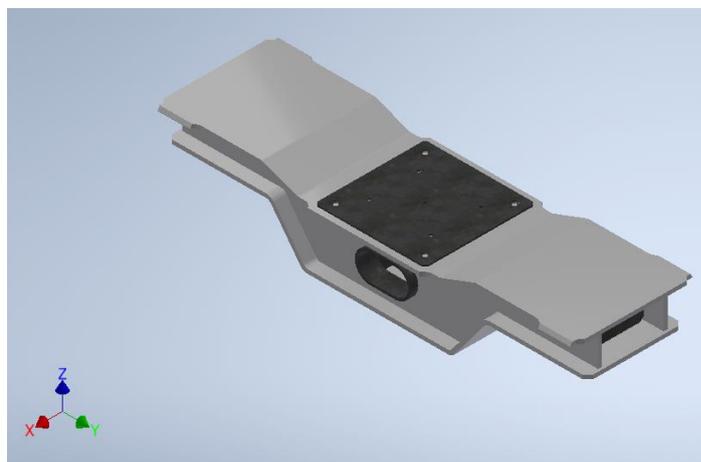
3.6 Pemodelan *Bogie Frame*



Gambar 3. 1 Desain 3D Bogie

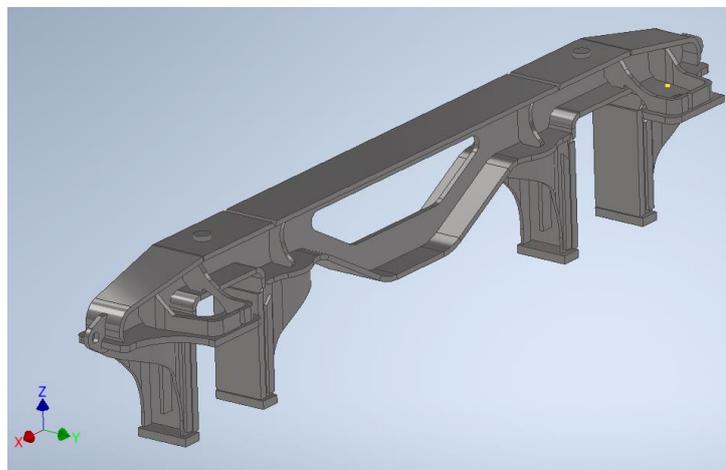
Gambar 3.2 melihat model solid 3D dari bogie kereta *flat wagon*. Yang dimana pada model bogie tersebut nantinya akan dijadikan penelitian ini. Model bogie kereta *flat wagon* ini penulis dapatkan dari PT. Industri Kereta Api (Persero). Pada bogie kereta *flat wagon* ini berbeda dengan bogie kereta sebelumnya, yang dimana hampir tiap kereta memiliki desain bogie kereta yang berbeda-beda dengan menyesuaikan kapasitas, jalur kereta dan kebutuhan dari kereta tersebut.

Transom pada kereta api berfungsi sebagai penopang horizontal yang membantu mempertahankan bentuk dan kekuatan struktural dari kereta. Transom ini menghubungkan bagian samping kereta, membantu mendistribusikan beban dan menambah kekakuan pada struktur kereta. Transom dapat digunakan untuk menyokong atau sebagai tempat pemasangan komponen lain seperti peralatan kereta, sistem kelistrikan, atau bagian *interior*. Ini memastikan bahwa komponen tersebut tetap pada posisi yang aman selama kereta beroperasi.

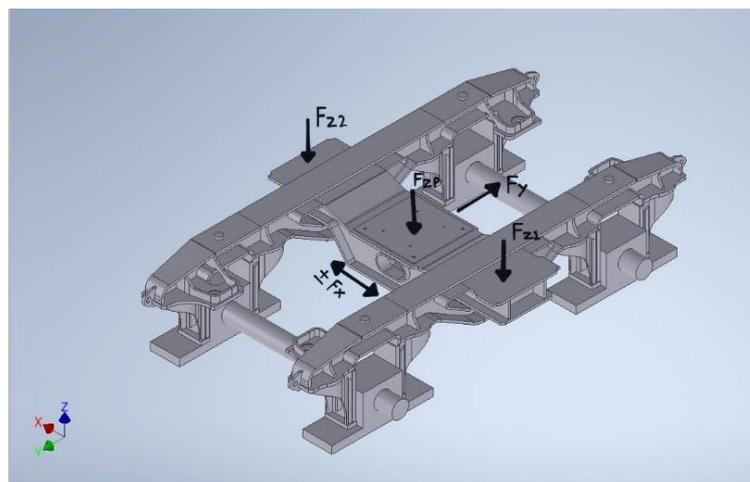


Gambar 3. 2 Desain 3D Transom

Side frame memberikan dukungan struktural yang penting bagi bogie kereta. *Side Frame* berfungsi sebagai kerangka utama yang menahan beban dari badan kereta dan menyalurkannya ke roda. *Side frame* membantu dalam menjaga roda pada posisi yang benar. Sangat penting untuk memastikan stabilitas dan keselamatan kereta saat beroperasi, terutama pada kecepatan tinggi atau saat melalui jalur yang bervariasi. Sekaligus dapat menyerap dan mengurangi guncangan serta getaran yang dihasilkan saat kereta berjalan. Untuk menjaga integritas mekanik dari kereta secara keseluruhan. *Side frame* juga sering digunakan sebagai titik pemasangan untuk komponen suspensi seperti pegas yang membantu dalam mengatur dan memperlancar gerakan vertikal bogie relatif terhadap badan kereta.



Gambar 3. 3 Desain 3D *Side Frame*



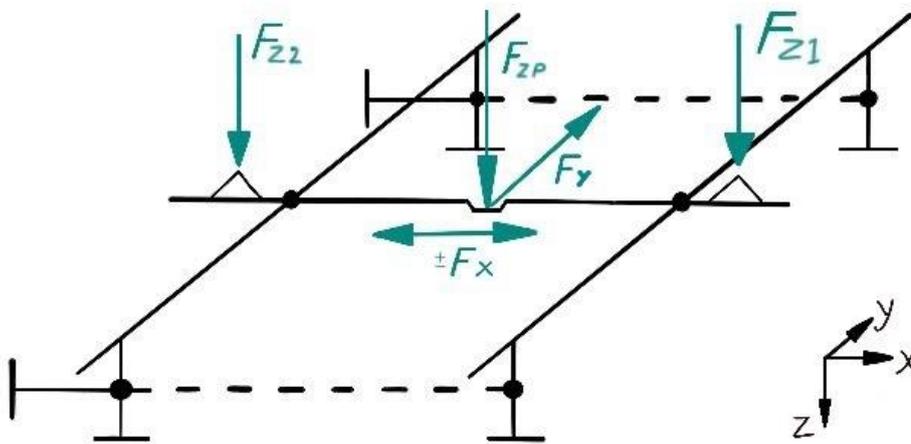
Gambar 3. 4 Desain *Assembly Bogie Frame*

Pada desain *bogie frame* didapatkan gambar 2D dari Perusahaan dan mewujudkannya menjadi gambar 3D dengan rasio 1:1. Desain 3D ini hasil penyederhanaan dari model awal bogie kereta *flat wagon*. Penyederhanaan ini dilakukan karena pada penelitian ini hanya bagian

frame dari bogie kereta *flat wagon* saja yang akan diteliti. Untuk bagian lainnya dihilangkan karena bukan merupakan rangka utama dari *frame bogie*. Penyederhanaan ini dilakukan dengan dasar penelitian (Dižo et al., 2019).

3.7 Analisis Kasus Pembebanan *Bogie Frame*

Dalam penelitian ini dilakukan 6 kasus pembebanan, yang ditentukan oleh kombinasi beban yang dihitung, yang bekerja di lokasi bogie seperti pada *free body diagram* pada Gambar 3.5 kombinasi beban-beban yang dilakukan ditentukan sedemikian rupa sehingga mewakili beban maksimal yang akan terjadi selama pengoprasian. Skema aplikasi titik pembebanan dilakukan berdasarkan standar EN 13749.



Gambar 3.5 *Free Body Diagram*

Untuk *bogie frame* kereta *flat wagon* atau gerbong barang dengan poros tengah dan dua *sideframe*, kombinasi pembebanan gaya didapatkan dari referensi penelitian Dižo et, al pada tahun 2018 pada Tabel 3.2. Dimana pada tiap barisnya diberi tanda:

(*) = Untuk tanda menyatakan tidak ada gaya yang bekerja

(V) = Untuk tanda menyatakan ada gaya yang bekerja

Tabel 3. 2 Kombinasi Pembebanan Gaya

Load case	F_{zPmax} [kN]	F_{zP} [kN]	F_{z1max} [kN]	F_{z2max} [kN]	F_{xmax} [kN]	F_{y1max} [kN]
1	v	*	*	*	*	*
2	*	v	v	*	*	*
3	*	v	*	v	*	*
4	*	v	v	*	v	*
5	*	v	*	v	-v	*
6	*	v	*	*	*	v

Dimana :

Load case 1 : Kereta menerima *full load* di tengah dengan kondisi kereta bergerak dengan kecepatan tetap

Load case 2 : Beban bertumpu pada titik F_{Zp} di tengah dan F_{Zl} . Diasumsikan kondisi kereta berat sebelah atau karena kereta miring ke kanan yang disebabkan rel kereta tidak rata.

Load case 3 : Beban bertumpu pada titik F_{Zp} di tengah dan F_{Z2} . Diasumsikan kondisi kereta berat sebelah atau karena kereta miring ke kiri yang disebabkan rel kereta tidak rata.

Load case 4 : Beban bertumpu pada titik F_{Zp} di tengah dan F_{Zl} . Diasumsikan kondisi kereta berbelok ke arah kanan.

Load case 5 : Beban bertumpu pada titik F_{Zp} di tengah dan F_{Zl} . Diasumsikan kondisi kereta berbelok ke arah kiri.

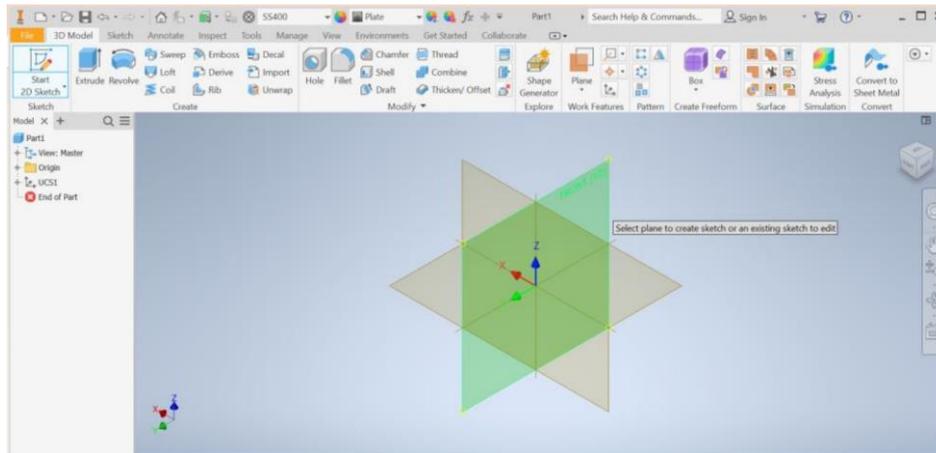
Load case 6 : Beban bertumpu pada titik F_{Zp} di tengah tetapi terdapat gaya pengereman.

3.8 Metode Elemen Hingga

Model elemen hingga dilakukan dengan memproyeksikan atau memasukkan gambar 3D desain kedalam *software* Ansys. Pembuatan 3D desain dan penyederhanaan *bogie frame* menggunakan *software* Inventor Student Version. Setelah itu dilakukan analisis menggunakan *software* Ansys. Penyederhanaan dilakukan untuk memudahkan proses analisa yang akan dilakukan pada penelitian yaitu analisa struktur statis. Pada simulasi kali ini digunakan pada pengujian statis beban lebih dengan merujuk pada standar yang dipakai pada penelitian ini yaitu standar EN 13749. Simulasi dilakukan dengan beberapa tahapan yang harus dilakukan dengan memasukkan data dan nilai yang sesuai, agar mendapatkan hasil simulasi seperti kondisi nyata.

3.8.1 Pemodelan Geometri

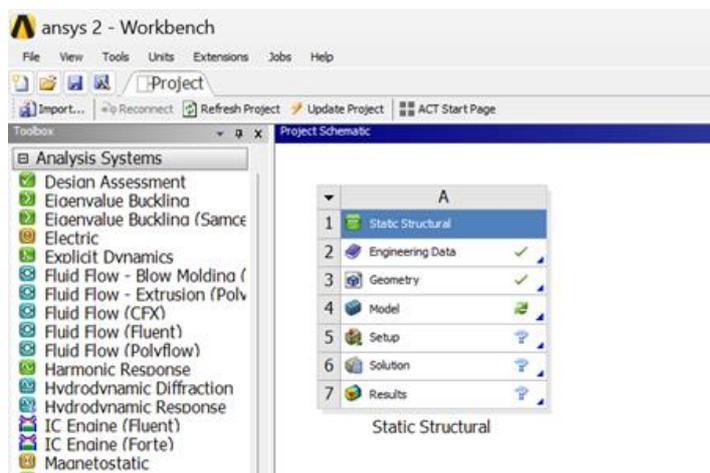
Pemodelan geometri *bogie frame* kereta api dalam ANSYS dimulai dengan mempersiapkan data geometri yang akurat, baik berupa gambar teknik, model CAD, atau spesifikasi teknis yang memberikan dimensi dan bentuk secara detail. Proses pemodelan dalam ANSYS diawali dengan membuat sketsa dasar dari *bogie frame* pada salah satu bidang kerja (*work plane*). Desain 3D yang sudah dibuat atau *final assembly* kemudian diimpor menjadi file STP agar geometri dapat diinput kedalam ansys.



Gambar 3. 6 *Work Plane Inventor*

3.8.2 Pemilihan Sistem Analisis

Analisis *static structural* merupakan salah satu jenis analisis yang paling umum digunakan dalam ANSYS untuk mempelajari perilaku mekanik suatu struktur atau komponen di bawah kondisi beban statis atau kondisi pembebanan yang tidak berubah terhadap waktu. Analisis ini sangat berguna dalam mengevaluasi tegangan dan deformasi pada *bogie frame* kereta api ketika dikenai beban-beban seperti berat kendaraan, gaya inersia saat berbelok, dan kondisi pembebanan lainnya.

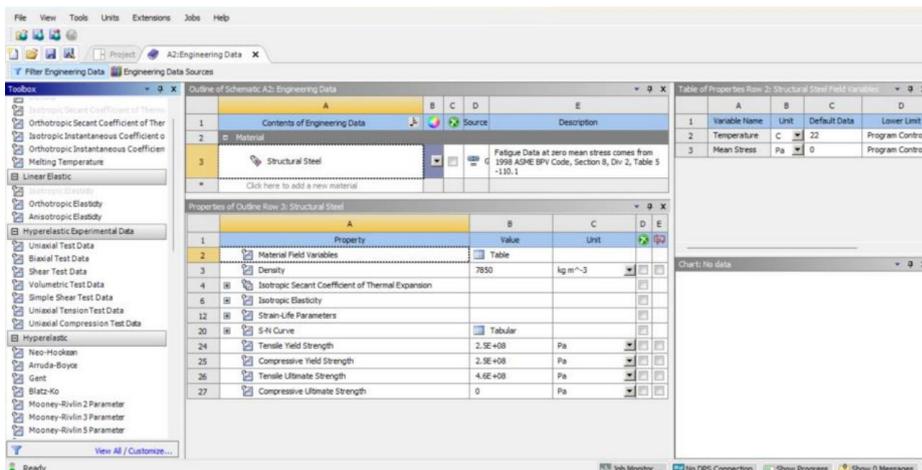


Gambar 3. 7 *Tampilan Static Structural*

Analisis *static structural* sangat bermanfaat untuk mengidentifikasi area-area kritis pada *bogie frame* yang mengalami tegangan atau deformasi berlebihan, sehingga desain dapat dioptimalkan untuk meningkatkan kekuatan dan keamanan struktur. Selain itu, analisis ini juga dapat digunakan untuk memverifikasi apakah desain *bogie frame* memenuhi kriteria keamanan dan faktor keamanan yang dipersyaratkan.

3.8.3 Pendefinisian Material dan Properti

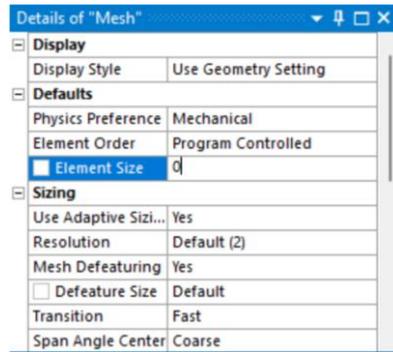
Setelah model geometri *bogie frame* kereta api selesai dibuat, langkah selanjutnya yaitu mendefinisikan material dan properti yang sesuai dengan bahan yang digunakan dalam pembuatan *bogie frame* tersebut. Properti material yang didefinisikan meliputi modulus elastisitas (*modulus Young*), rasio Poisson, densitas, konduktivitas termal, dan lainnya tergantung pada jenis analisis yang akan dilakukan. Kesalahan dalam memasukkan data properti material dapat menyebabkan hasil simulasi yang menyimpang dari kondisi sebenarnya, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi keputusan desain atau analisis struktural yang diambil. Oleh karena itu, dalam tahap ini harus memastikan bahwa data properti material yang dimasukkan ke dalam ANSYS sesuai dengan spesifikasi material yang sebenarnya digunakan pada *bogie frame* kereta api.



Gambar 3. 8 Tampilan Material dan Properti

3.8.4 Meshing

Proses membagi model geometri *bogie frame* menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung pada titik-titik node (*nodes*). Langkah ini penting karena solusi numerik dalam metode elemen hingga dihitung pada setiap elemen dan node. Proses *meshing* dimulai dengan memilih jenis elemen yang sesuai, seperti elemen garis, tetrahedron, atau heksahedral, bergantung pada geometri dan jenis analisis yang dilakukan. Ansys kemudian akan membagi model geometri menjadi elemen-elemen dengan menempatkan *nodes* dan menghubungkannya. Dalam *meshing* ini juga menentukan *elemen size* dengan melakukan uji konvergensi untuk mencari nilai eror paling kecil, nilai eror paling kecil yang akan digunakan dalam menentukan *element size*.



Gambar 3. 9 Tampilan *Meshing*

3.8.5 Penerapan Kondisi Batas dan Pembebanan

Menentukan batas dan pembebanan pada titik-titik tertentu pada struktur yang akan disimulasikan, menentukan kondisi batas berupa nilai gaya dan tumpuan yang akan diterapkan pada objek penelitian. Kondisi batas dan pembebanan ini berupa beban statis. Untuk pembebanan yang akan diterapkan menggunakan beban eksepsional atau beban penuh. Beban eksepsional digunakan untuk memastikan bahwa struktur *bogie frame* dapat menahan semua beban yang diterimanya tanpa mengalami kegagalan atau kerusakan yang tidak diinginkan bisa berupa beban mati, beban hidup atau beban yang tidak terduga. Kondisi batas dan pembebanan dapat mempengaruhi distribusi tegangan pada struktur, sehingga perlu diperhatikan lebih cermat dalam perancangan dan analisis struktur. Pada titik pembebanan juga harus dengan jelas dan akurat untuk memastikan hasil analisis yang akurat dan dapat diandalkan. Jenis tumpuan menggunakan *remote displacement*, pemilihan lokasi gaya dibuat dengan mendekati kondisi sebenarnya, hal ini sangat penting dalam perancangan dan analisis struktur untuk memastikan keamanan dan keandalan struktur tersebut.

3.8.6 *Solution and Result*

Pada pemilihan *solution* dan *result* disesuaikan dengan tujuan atau outputan hasil yang diinginkan di awal, pemilihan *solution* atau *result* yang dipilih yaitu *principal stress* untuk memastikan bahwa tegangan maksimum tidak melebihi batas ijin atau *yield stress* dan mengetahui area kritis sehingga *bogie frame* kereta bisa dinyatakan aman atau tidak apabila terkena beban lebih. Lalu pemilihan *directional deformation* untuk mengetahui perubahan bentuk atau pengerasan yang terjadi dalam arah tertentu pada objek atau struktur yang disimulasikan. Perubahan bentuk yang terjadi dalam arah tertentu baik itu sepanjang sumbu X, Y dan Z sehingga mengetahui area mana saja yang berpengaruh.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

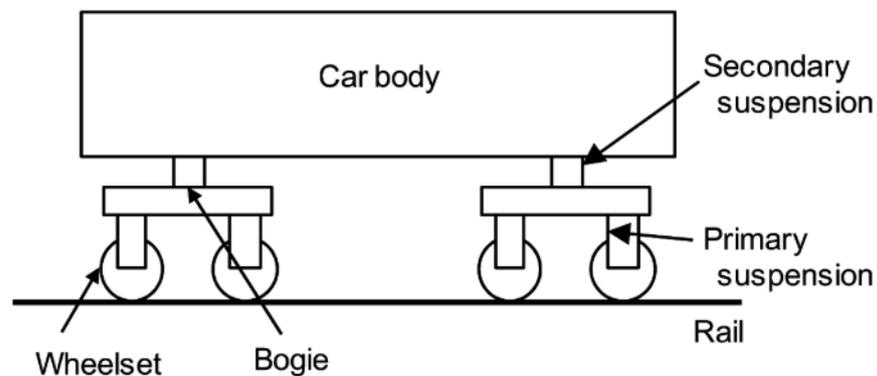
4.1 Perhitungan Kasus Pembebanan

Pada perhitungan kasus pembebanan *bogie frame* didapatkan rumus untuk mengetahui nilai dari gaya yang bekerja pada bogie, rumus tersebut didapatkan dari standar S355J2+N BS EN 10025-2 yang sesuai dengan kategori bogie wagon atau kategori B-V yang nantinya hasil dari nilai tersebut dimasukkan kedalam kasus pembebanan dan terdapat 6 variasi kasus pembebanan yang mendekati kondisi *real*.

Tabel 4. 1 Data Load

No	Description	Load
1.	Berat Bogie (m)	4500 Kg
2.	Berat total (Mv)	48000 Kg
3.	Berat yang ditopang Bogie	39000 Kg
4.	Berat yang ditopang perbogie (Mw)	19500 Kg

Dari tabel 4.1 tersebut, disajikan data-data terkait berat kereta api beserta distribusi bebannya. Berat bogie yang digunakan adalah 4500 kg, sedangkan berat total keseluruhan kereta api mencapai 48000 kg. Dari berat total tersebut, sebagian besar beban ditopang oleh sistem bogie, yaitu sebesar 39000 kg. Dengan demikian, setiap bogie harus mampu menopang berat sebesar 19500 kg untuk mendistribusikan beban secara merata di atas rel.



Gambar 4. 1 Free Body Diagram Beban Bogie (Kondo & Yamazaki, 2013)

Untuk perhitungan dari beban yang ditopang per bogie dapat dihitung dibawah ini dengan menggunakan rumus :

Diketahui :

$$Mv = 48000$$

$$m = 4,5$$

Jawab :

$$\begin{aligned} F_{zmax} &= \frac{2(Mv - 2.m)}{4} \\ &= \frac{2(48000 - 2.4,5)}{4} \\ &= 19,5 \text{ KN} \end{aligned}$$

Selanjutnya disajikan hasil analisis komputer terhadap *frame bogie*, yang dikenakan enam kasus pembebanan sesuai dengan pembebanan eksepsional yang dijelaskan diatas. Tabel 4.1 berisi data perhitungan yang diperlukan untuk diterapkan sebagai beban pada bogie.

Berdasarkan data pada tabel 4.1, besar gaya pembebanan dapat dihitung dengan menggunakan rumus standar EN 13749 yang sesuai dengan kategori *bogie wagon* atau kategori B-V sebagai berikut:

1. Menghitung gaya vertikal, gaya vertikal pada bogie kereta merupakan kekuatan yang bekerja secara tegak lurus terhadap rel, utamanya berperan dalam menyalurkan beban dari kereta ke rel. Gaya ini mencakup beban statis dari berat kereta itu sendiri yang terjadi akibat pergerakan kereta. Rumus untuk menghitung gaya vertikal:

Diketahui:

$$M_w = 19500$$

$$m = 4,5$$

$$g = 9,81$$

Jawab:

$$F_Z = \left(\frac{M_w}{2} - m \right) \cdot g$$

$$F_Z = \left(\frac{19500}{2} - 4,5 \right) \cdot 9,81$$

$$F_Z = \mathbf{95604 \text{ N}}$$

Pada gaya vertikal terdapat 2 *case* yaitu gaya vertikal pada *case* 1, dimana gaya hanya diterapkan pada 1 poros :

Diketahui:

$$F_Z = 95604$$

Jawab:

$$F_{ZPmax} = 2.F_Z$$

$$F_{ZPmax} = 2 \times 95604$$

$$F_{ZPmax} = \mathbf{191208 \text{ N}}$$

Menghitung gaya vertikal pada *Case* 2, dimana gaya diterapkan pada poros dan satu *sidebearer* :

Pada poros tengah didapatkan nilai dengan rumus :

Diketahui:

$$F_{Zp} = 95604$$

$$\alpha = 0,3$$

Jawab:

$$F_{Z1max} \text{ (or } F_{Z2max}) = 1,5 \times F_Z \cdot \alpha$$

$$F_{Z1max} \text{ (or } F_{Z2max}) = 1,5 \times 95604 \times 0,3$$

$$F_{Z1max} \text{ (or } F_{Z2max}) = \mathbf{43022 \text{ N}}$$

Pada satu *sidebearer* didapatkan nilai dengan rumus :

Diketahui:

$$F_{Zp} = 95604$$

$$\alpha = 0,3$$

Jawab:

$$F_{ZP} = 1,5 \times F_Z (1-\alpha)$$

$$F_{ZP} = 1,5 \times 95604 (1 - 0,3)$$

$$F_{ZP} = 143406 (0,7)$$

$$F_{ZP} = \mathbf{100384 \text{ N}}$$

2. Menghitung gaya transversal, gaya transversal pada bogie kereta merujuk pada kekuatan lateral atau samping yang beraksi pada bogie selama kereta bergerak, khususnya ketika melintasi tikungan atau mengalami gaya angin samping. Rumus ini penting untuk memastikan stabilitas kereta saat beroperasi. Rumus untuk menghitung gaya transversal :

Diketahui:

$$F_{x1max} = F_{x2max} = 95604$$

$$m = 4,5$$

$$g = 9,81$$

Jawab:

$$F_{x1max} = F_{x2max} = \frac{F_{xmax}}{2} = 10^4 + \frac{F_z + m \cdot g}{6}$$

$$F_{x1max} = F_{x2max} = \frac{F_{xmax}}{2} = 10^4 + \frac{95604 + 4,5 \cdot 9,81}{6}$$

$$F_{x1max} = F_{x2max} = \mathbf{25942 \text{ N}}$$

3. Menghitung gaya longitudinal, gaya longitudinal pada bogie kereta merupakan kekuatan yang beraksi sepanjang arah panjang kereta. Gaya ini juga dapat muncul saat kereta melakukan pengereman atau saat memulai gerakan dari keadaan diam. Rumus untuk menghitung gaya longitudinal :

Diketahui:

$$F_{y1max} = 95604$$

$$m = 4,5$$

$$g = 9,81$$

Jawab:

$$F_{y1max} = 0,1 \times (F_z + m \cdot g)$$

$$F_{y1max} = 0,1 \times (95604 + 4,5 \times 9,81)$$

$$F_{y1max} = 0,1 \times (95648,145)$$

$$F_{y1max} = \mathbf{9565 \text{ N}}$$

Dari perhitungan rumus-rumus diatas maka didapatkan hasil dari perhitungan beban bogie frame pada tabel 4.2

Tabel 4. 2 Perhitungan Beban *Bogie Frame*

Formula	Load	Calculated Value [N]
1	F_{zPmax}	- 191208
2	F_{z1max}	-43022
3	F_{zP}	-100384
4	F_{x1max}	25942
5	F_{y1max}	9565

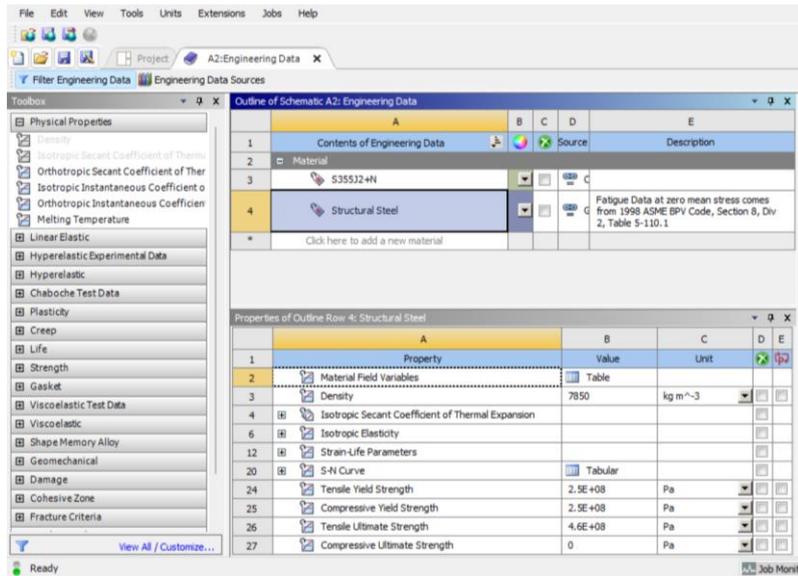
4.2 Metode Simulasi Pembebanan Menggunakan Software

Setelah membuat model menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor, langkah selanjutnya adalah mengimpor model tersebut ke dalam perangkat lunak ANSYS untuk melakukan analisis kekuatan struktur. Proses ini dilakukan karena ANSYS merupakan perangkat lunak yang khusus digunakan untuk melakukan simulasi terkait kekuatan dan performa suatu struktur atau komponen. Dalam melakukan analisis menggunakan ANSYS, terdapat beberapa tahapan yang harus dilalui. Tahapan-tahapan tersebut dilakukan secara berurutan dan saling terkait satu sama lain. Setiap tahapan memiliki peran dan fungsi yang penting dalam menghasilkan analisis yang akurat dan dapat diandalkan.

4.2.1 Setting Engineering Data

Pada awalnya, material yang secara default terdefinisi dalam menu *engineering data* adalah *Structural Steel*. Namun, karena jenis material yang akan digunakan dalam analisis ini bukan *Structural Steel*, maka perlu dilakukan penambahan jenis material baru pada menu *Engineering Data*. Langkah ini diperlukan untuk memastikan bahwa sifat-sifat mekanik dari material yang sebenarnya dapat digunakan dalam proses analisis.

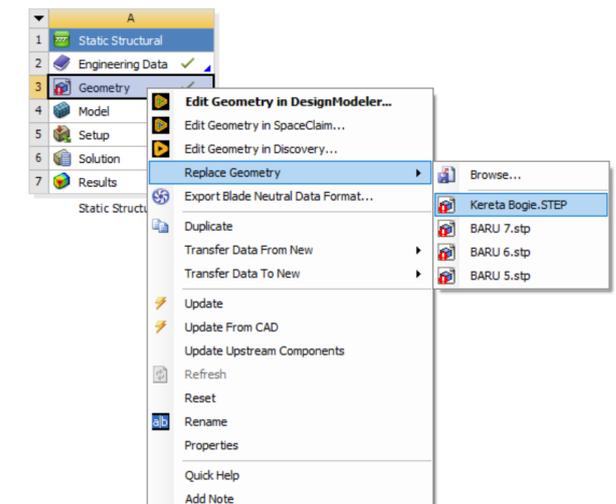
Material yang akan ditambahkan adalah S355J2+N, yang memiliki karakteristik dan sifat mekanik yang berbeda dengan *Structural Steel*. Data-data penting terkait sifat mekanik dari material S355J2+N, seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan *rasio poisson*, perlu dimasukkan dengan akurat ke dalam menu *engineering data*. Gambar 4.2 menunjukkan proses penambahan data sifat mekanik material S355J2+N ke dalam perangkat lunak ANSYS. Langkah ini sangat penting untuk menjamin keakuratan hasil analisis kekuatan struktur yang akan dilakukan.



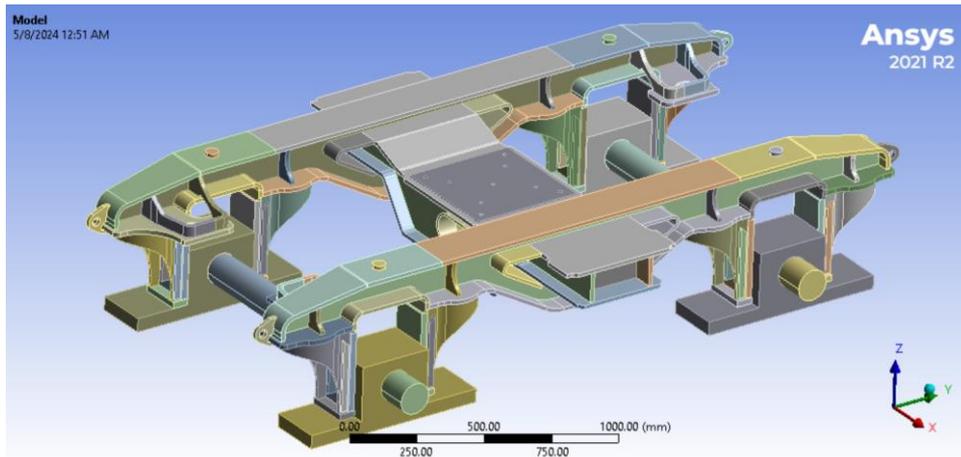
Gambar 4. 2 Material Properties

4.2.2 Input Geometri

Langkah pertama yang harus dilakukan adalah mengekspor file desain geometri dari *Autodesk Inventor* ke dalam format .stp (STEP). Format .stp merupakan format standar yang dapat dibaca oleh berbagai perangkat lunak desain dan analisis, sehingga memudahkan pertukaran data antar perangkat lunak. Setelah itu, *file* .stp diimpor ke ANSYS dengan memilih menu *Geometry > Import Geometry > pilih file .stp* yang sesuai, seperti pada Gambar 4.3. Cara ini memastikan geometri yang dianalisis di ANSYS sama persis dengan desain awal di *Autodesk Inventor*.



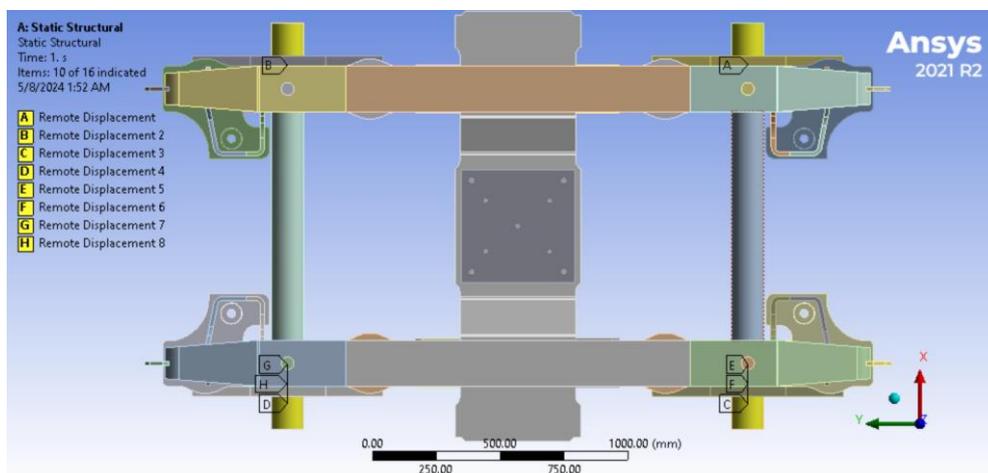
Gambar 4. 3 Impor File Desain ke Ansys



Gambar 4. 4 Input Model Geometri

4.2.3 *Input Boundary Conditions*

Dalam melakukan analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS, sangat penting untuk menetapkan kondisi batas (*boundary conditions*) yang seakurat mungkin dengan kondisi nyata yang akan dialami oleh struktur atau komponen yang dianalisis. Dalam kasus ini, kondisi batas yang ditetapkan harus mencerminkan situasi saat bogie kereta api tersebut diuji secara aktual. Pemilihan tumpuan *remote displacement* pada *axle shaft*, merupakan komponen utama bogie yang menerima beban langsung dari berat kereta dan muatan, sehingga *displacement* terbesar terjadi pada daerah *axle shaft*. *Axle shaft* terhubung langsung dengan roda yang berkontak dengan rel, menyebabkannya menerima gaya-gaya dari interaksi roda-rel seperti vertikal, transversal, dan longitudinal. (Supriyana & Kholidin, 2016) Pemilihan titik *remote displacement* pada *axle shaft* merupakan penetapan kondisi batas yang sesuai dengan kondisi operasi nyata bogie kereta barang, seperti ditunjukkan pada gambar 4.5



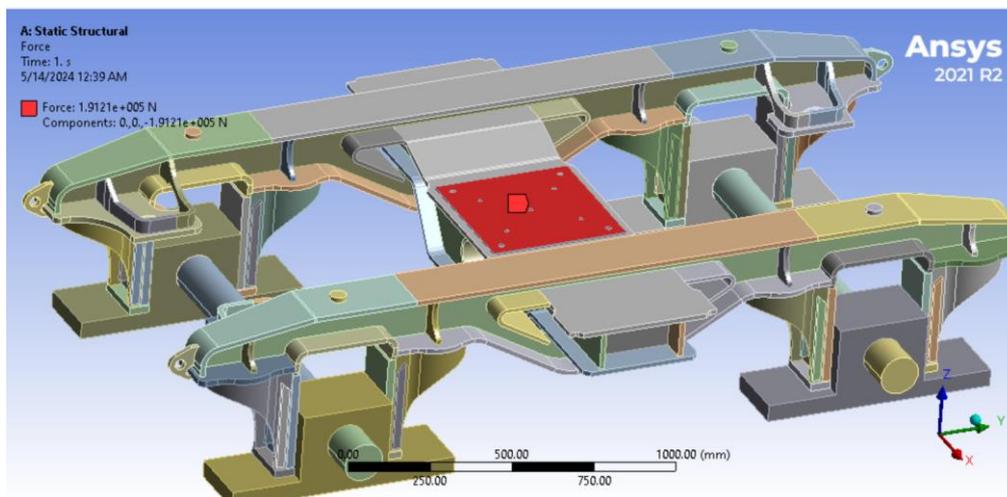
Gambar 4. 5 Pemilihan *Remote Displacement*

4.2.4 Input Gaya

Dalam melakukan simulasi *static structural* pada bogie kereta api menggunakan perangkat lunak ANSYS, terdapat beberapa input gaya yang harus ditetapkan sesuai dengan kondisi operasi nyata bogie. Nilai-nilai input gaya diperoleh dari perhitungan gaya yang sudah dihitung pada tabel 4.3 hasil perhitungan beban pada *load case* 1. Dari perhitungan yang telah didapat nilai gaya yang bekerja pada bogie kereta *flat wagon* yang akan di input adalah sebagai berikut :

Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Beban Pada *Load case* 1

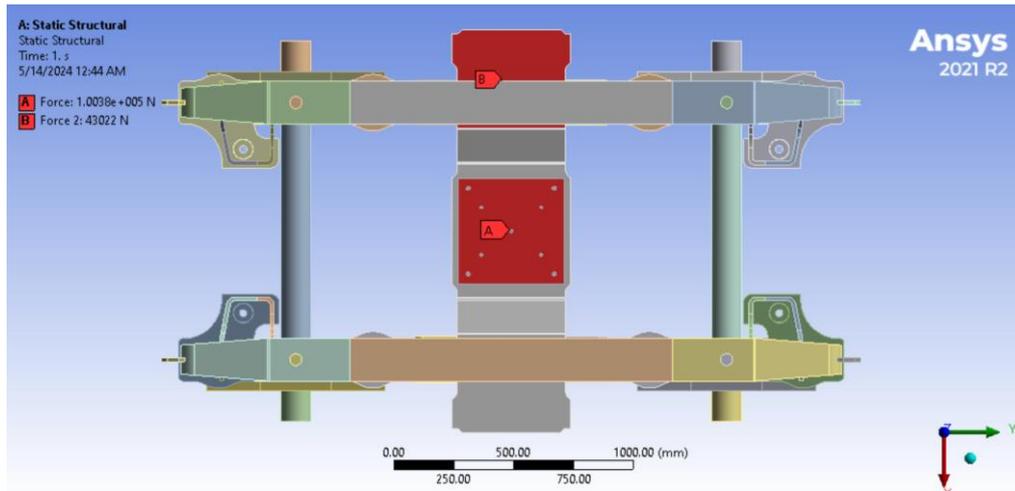
Pembebanan	Hasil Perhitungan (N)
	Beban Maksimal
Gaya Vertikal ($F_{zp_{max}}$) hanya pada poros tengah	-191208



Gambar 4. 6 Input Gaya Pada *Load Case* 1

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Beban Pada *Load Case* 2

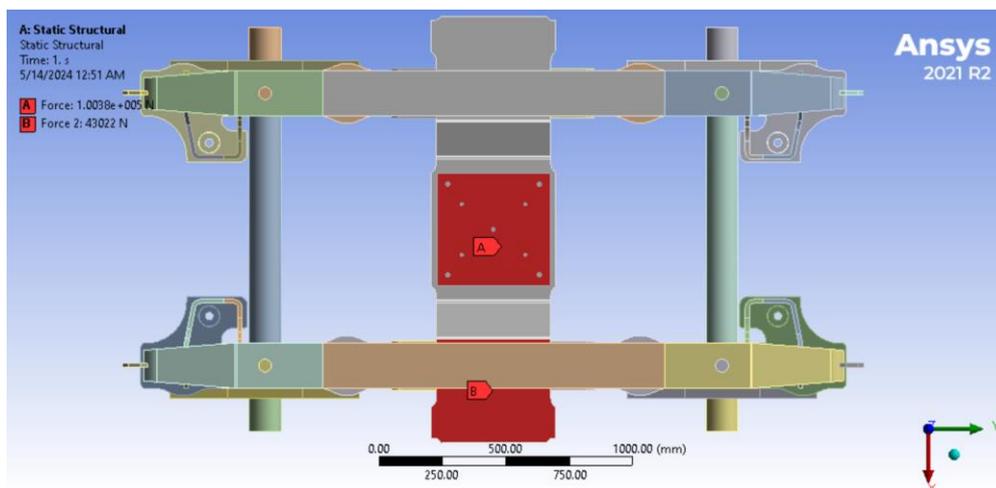
Pembebanan	Hasil Perhitungan (N)
	Beban Maksimal
Gaya Vertikal ($F_{zp_{max}}$) pada poros tengah	-100384
Gaya Vertikal ($F_{zI_{max}}$)	-43022



Gambar 4. 7 Input Gaya Pada *Load Case 2*

Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Beban Pada *Load Case 3*

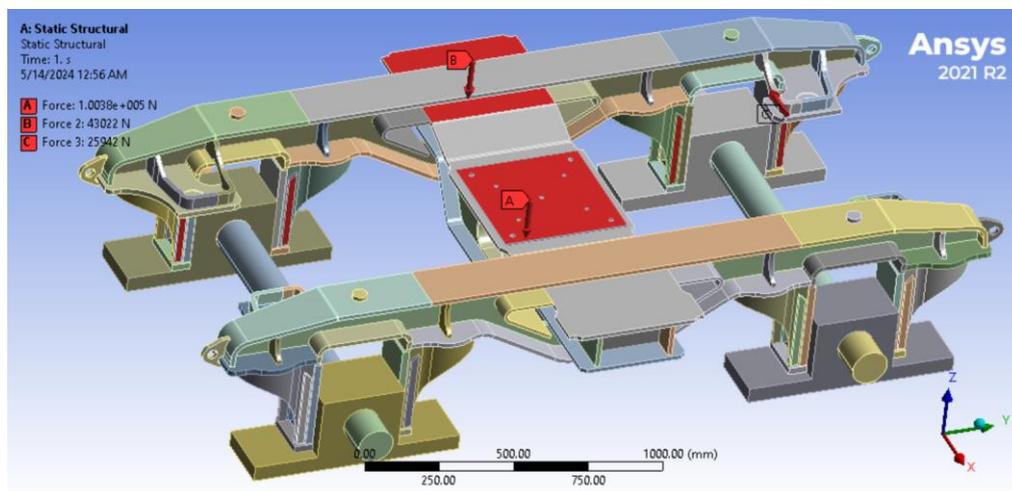
Pembebanan	Hasil Perhitungan (N)
	Beban Maksimal
Gaya Vertikal ($Fz_{p_{max}}$) pada poros tengah	-100384
Gaya Vertikal ($Fz_{2_{max}}$)	-43022



Gambar 4. 8 Input Gaya Pada *Load Case 3*

Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Beban Pada *Load Case 4*

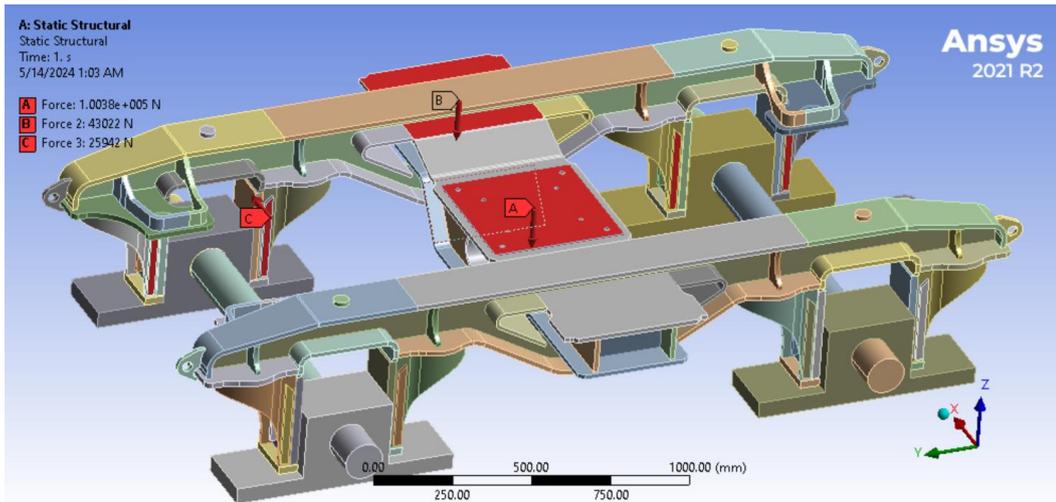
Pembebanan	Hasil Perhitungan (N)
	Beban Maksimal
Gaya Vertikal ($Fz_{p_{max}}$) pada poros tengah	-100384
Gaya Vertikal ($Fz2_{max}$)	-43022
Gaya Transversal ($Fx1$)	-25942



Gambar 4. 9 Input Gaya Pada *Load Case 4*

Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Beban Pada *Load Case 5*

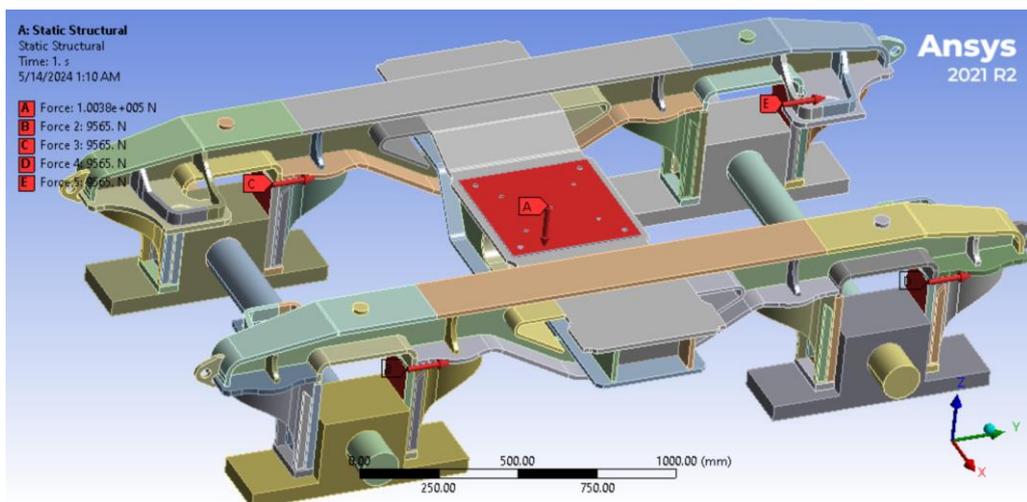
Pembebanan	Hasil Perhitungan (N)
	Beban Maksimal
Gaya Vertikal ($Fz_{p_{max}}$) pada poros tengah	-100384
Gaya Vertikal ($Fz1_{max}$)	- 43022
Gaya Transversal ($Fx2$)	25942



Gambar 4. 10 Input Gaya Pada *Load Case 5* View -X Axis

Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Beban Pada *Load Case 6*

Pembebanan	Hasil Perhitungan (N)
	Beban Maksimal
Gaya Vertikal ($F_{z_{p_{max}}}$) pada poros tengah	-100384
Gaya Longitudinal ($F_{y_{max}}$)	9565



Gambar 4. 11 Input Gaya Pada *Load Case 6*

4.2.5 Validasi Meshing

Dalam tahap pemodelan, dilakukan proses meshing yang melibatkan pembagian komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen diskrit yang lebih kecil. Tujuan utama dari proses meshing ini adalah untuk meningkatkan tingkat konvergensi model, sehingga data yang diperoleh memiliki kualitas yang lebih baik. Selama proses *meshing*, tiga parameter validasi digunakan untuk memastikan kualitas mesh yang dihasilkan, yaitu *skewness*, *element quality*, dan *orthogonal quality*. *Spektrum box* yang menunjukkan nilai-nilai dari ketiga parameter validasi tersebut akan disajikan untuk memudahkan analisis dan evaluasi kualitas *mesh* yang dihasilkan.



Gambar 4. 12 *Element Quality mesh spectrum* (www.ansys.com)

Skewness mesh metrics spectrum

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

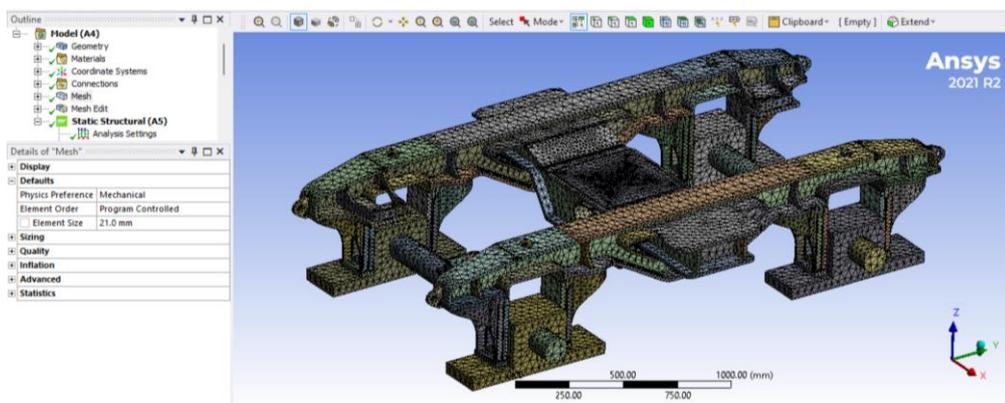
Gambar 4. 13 *Skewness mesh spectrum* (www.ansys.com)

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum

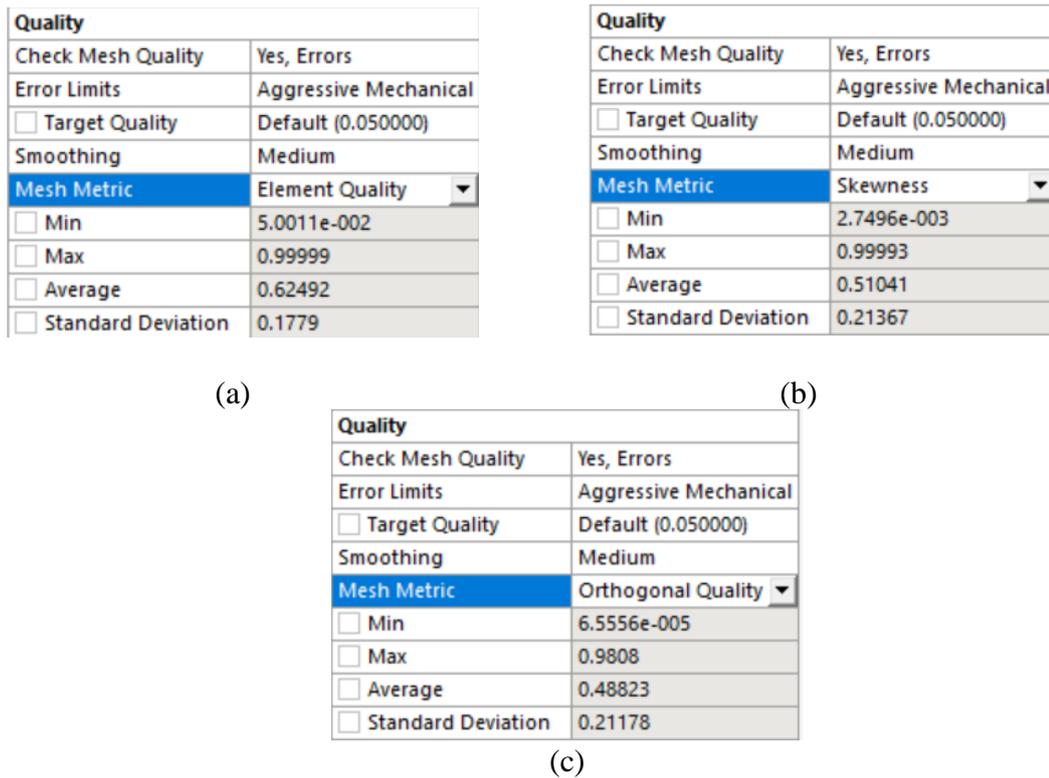
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Gambar 4. 14 *Orthogonal Quality mesh spectrum* (www.ansys.com)

Pada pemodelan analisis digunakan *mesh* sebesar 21 mm, dan didapatkan kualitas *mesh* seperti pada gambar dibawah :



Gambar 4. 15 Menggunakan *Element size* 21 mm



Gambar 4. 16 Kualitas Meshing : (a) *Element Quality*, (b) *Skewness Quality*, (c) *Orthogonal Quality*

Tabel 4. 9 Kualitas Meshing

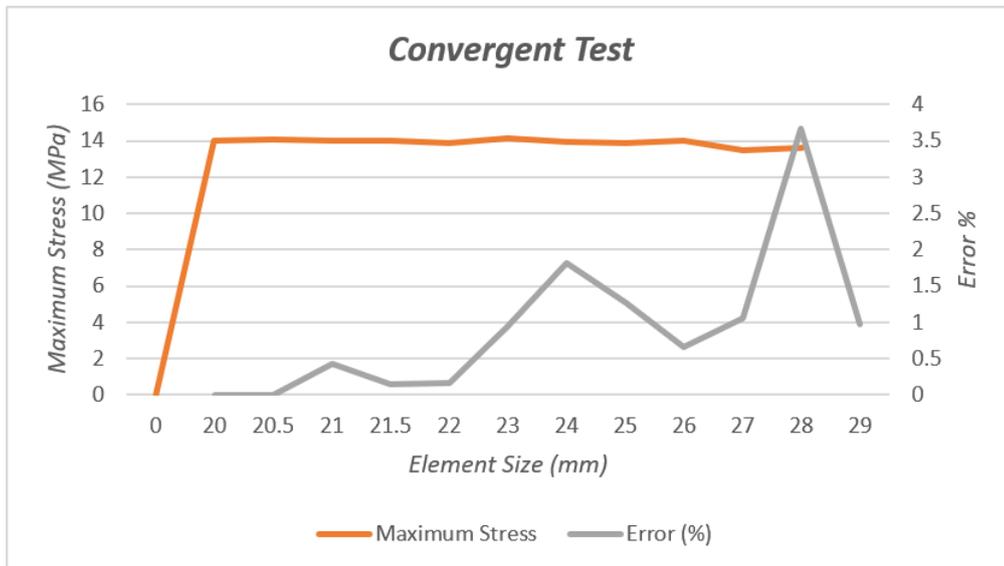
Metode	Nilai	Keterangan
<i>Element Quality</i>	0.624	Baik
<i>Skewness Quality</i>	0.510	Baik
<i>Orthogonal Quality</i>	0.488	Baik

4.2.6 Uji Konvergensi

Dalam pemodelan elemen hingga, uji konvergensi merupakan langkah penting yang harus dilakukan untuk memverifikasi keakuratan hasil simulasi. Proses uji konvergensi dilaksanakan dengan melakukan variasi pada ukuran mesh, kemudian mengamati apakah hasil yang diperoleh akan mengarah dan menuju pada suatu nilai tertentu secara konvergen seiring dengan perubahan ukuran *mesh*. Perlu diperhatikan bahwa semakin kecil ukuran *mesh* tidak selalu menjamin hasil akan konvergen. Presentasi eror dihitung dengan membandingkan nilai absolut selisih tegangan dari dua iterasi yang berurutan dengan nilai iterasi tegangan terbaru. Hasil dari uji konvergensi dapat dilihat pada tabel 4.10

Tabel 4. 10 Hasil Uji Konvergensi

No	Element Size (mm)	Jumlah Nodes	Maximum Stress (MPa)	Jumlah Elements	Error (%)
1	0		0	0	-
2	29	186133	13.528	86330	-
3	28	196638	13.617	92075	0.65
4	27	203883	13.485	95894	0.97
5	26	217507	13.999	103118	3.67
6	25	231505	13.852	110369	1.05
7	24	248207	13.943	119088	0.65
8	23	260491	14.122	125426	1.27
9	22	271483	13.866	130775	1.81
10	21.5	281251	13.998	136221	0.94
11	21	292924	14.021	142845	0.16
12	20	313805	13.981	153759	0.29



Gambar 4. 17 Grafik Uji Konvergensi

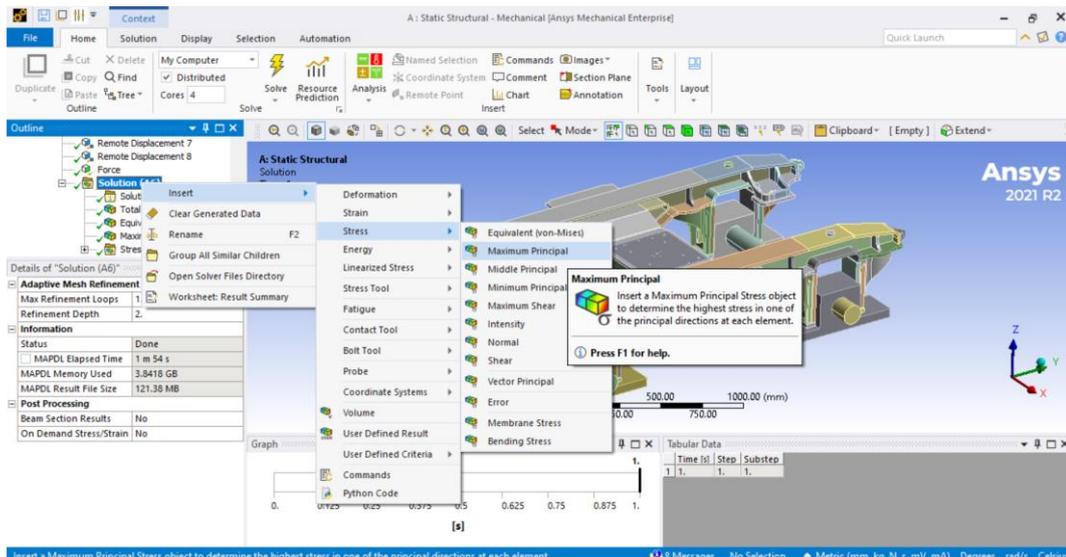
$$Error = \frac{|\sigma_i - \sigma_{i-1}|}{\sigma_i} \times 100\%$$

Hasil uji konvergensi menyatakan bahwa dari 12 variasi *meshing* yang dilakukan terdapat nilai eror paling kecil yaitu 0,16% dimana error yang didapatkan kurang dari 1%. maka dari berbagai ukuran *mesh* yang diuji dipilih ukuran *mesh* 21 mm karena menghasilkan besar eror kurang dari 1% dan memiliki nilai eror relatif yang paling kecil.

4.2.7 Hasil Pembebanan *Principal Stress*

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan *principal stress* pada *bogie frame* kereta menggunakan ANSYS, diperoleh beberapa informasi penting. Distribusi tegangan utama (*principal stress*) pada *bogie frame* menunjukkan area-area kritis yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi. Nilai tegangan maksimum yang diperoleh dari simulasi perlu dibandingkan dengan kekuatan luluh (*yield strength*) material *bogie frame*. Jika tegangan maksimum melebihi kekuatan luluh, maka terdapat risiko deformasi plastis atau kerusakan pada *bogie frame* di area kritis tersebut.

Selain tegangan maksimum, distribusi tegangan secara keseluruhan juga memberikan informasi mengenai lintasan aliran beban pada *bogie frame*. Hal ini dapat membantu dalam mengoptimalkan penempatan penguat atau penebalan plat pada area yang mengalami beban tinggi untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur *bogie frame* secara keseluruhan. Hasil simulasi pembebanan *principal stress* pada ANSYS memberikan informasi tentang integritas struktural dan keamanan desain *bogie frame* kereta, sehingga potensi kegagalan atau kerusakan dapat diantisipasi dan diminimalisir.



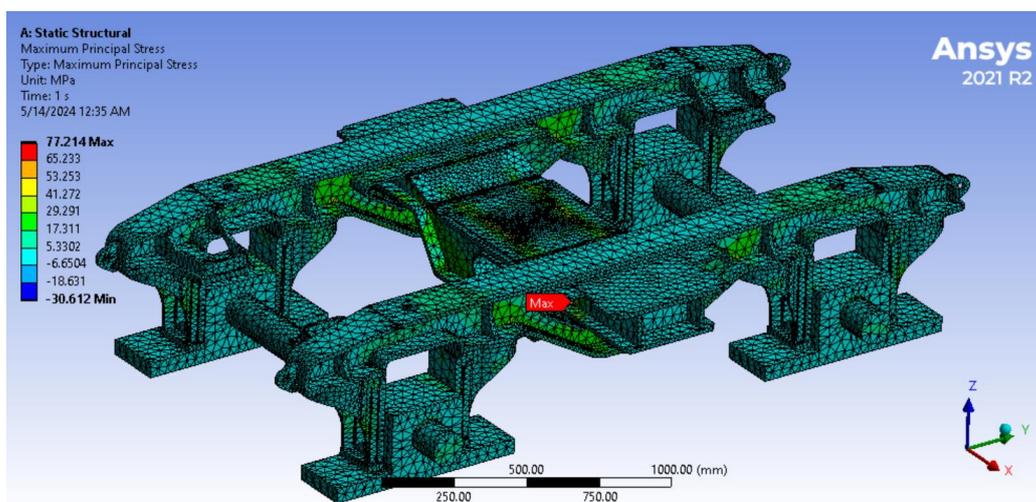
Gambar 4. 18 Metode *Principal Stress*

a. Simulasi *Principal Stress Load Case 1*

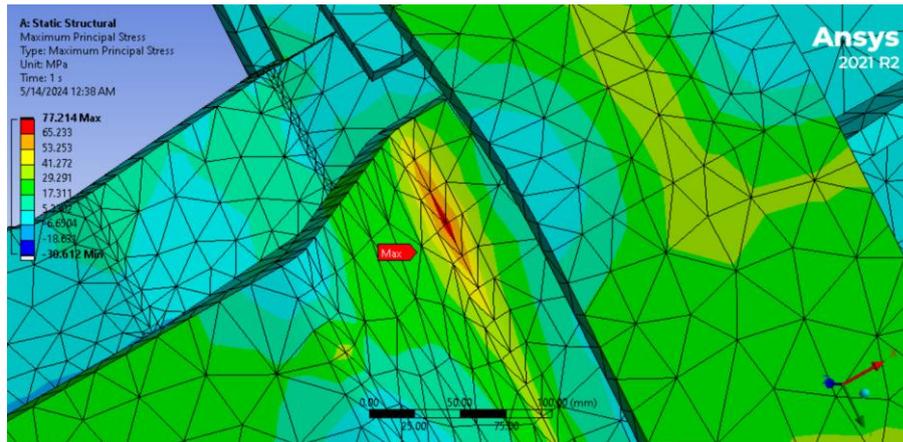
Hasil analisis *principal stress* (tegangan utama) menggunakan perangkat lunak ANSYS, perubahan nilai tegangan ditunjukkan melalui gradasi warna mulai dari biru hingga merah. Warna biru mewakili nilai tegangan terendah sebesar -30,612 MPa, sedangkan warna merah menunjukkan nilai tegangan tertinggi yaitu 77,214 MPa. Perubahan besar nilai tegangan akan mempengaruhi perubahan warna pada hasil visualisasi.

Pada kondisi tegangan yang rendah, warna yang ditampilkan adalah biru, yang mengindikasikan kondisi aman. Namun, ketika tegangan yang diberikan pada *bogie frame* semakin besar, warna akan berubah menjadi kuning yang menandakan kondisi perhatian (Hutagalung et al., 2021). Apabila tegangan terus meningkat hingga mencapai nilai kritis, maka warna akan berubah menjadi merah, yang mengindikasikan bahwa *bogie frame* berada dalam kondisi kritis dan berpotensi mengalami kerusakan atau patah. Lalu untuk tanda (+) pada nilai tegangan maksimal menandakan bahwa tegangan yang dialami oleh benda kerja bersifat tarik atau *tensile stress*. Sedangkan untuk tanda (-) menunjukkan bahwa tegangan yang dialami oleh benda kerja bersifat tekan atau *compressive stress*. Perubahan besar nilai tegangan akan mempengaruhi perubahan warna pada hasil visualisasi karena warna merepresentasikan nilai tegangan atau deformasi tersebut. Semakin besar nilai tegangan, warna akan berubah dari biru menjadi kuning, oranye, dan merah, sesuai dengan rentang nilai yang ditetapkan dalam skala warna pada simulasi ANSYS.

Gambar 4.19 hasil simulasi yang disajikan menunjukkan respon *bogie frame* dengan pembebanan arah vertikal sebesar -191208 N. *Principal stress* maksimum yang terjadi adalah sebesar 77,214 MPa dan tegangan maksimum terjadi di area bawah transom dikarenakan transom banyak menerima beban untuk solusinya bisa dilakukan penebalan plat atau dilakukan penambahan penguat atau *stiffener*. Nilai *principal stress* maksimum ini masih berada di bawah kekuatan luluh (*yield strength*) dari material S355J2+N yang digunakan, yaitu sebesar 355 MPa. Dengan tegangan kerja yang lebih rendah daripada tegangan yang diizinkan, hal ini mengindikasikan bahwa desain *bogie frame* masih aman untuk dioperasikan dalam kondisi pembebanan yang diberikan.



Gambar 4. 19 Hasil Simulasi *Principal Stress* Pada *Load Case 1*



Gambar 4. 20 Titik Tegangan Maksimal *Load Case 1*

Pengujian dilakukan untuk menentukan nilai tegangan maksimum dan minimum dari *principal stress* (tegangan utama). Hasil dari pengujian ini kemudian digunakan untuk menghitung besaran tegangan rata-rata dan tegangan amplitudo dengan memasukkan nilai-nilai tersebut ke dalam rumus yang telah ditetapkan. Dengan mengetahui tegangan rata-rata dan amplitudo, evaluasi lebih lanjut dapat dilakukan untuk memastikan kekuatan dan keamanan operasi komponen yang diuji dalam menghadapi berbagai kondisi pembebanan.

Tegangan Rata-rata :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{77,214 + (-30,612)}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{46,602}{2}$$

$$\sigma_m = 23,301 \text{ MPa}$$

Tegangan Amplitudo :

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

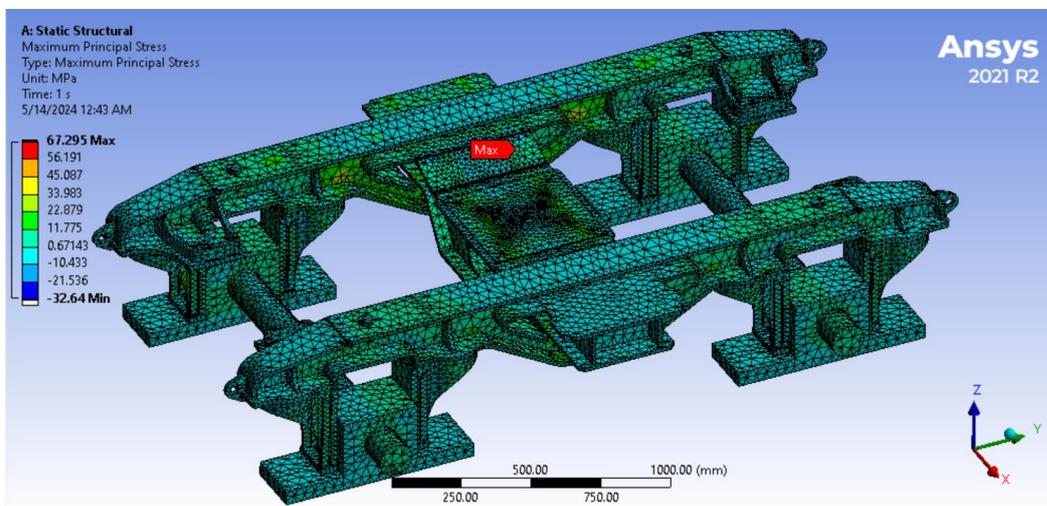
$$\sigma_a = \left| \frac{77,214 - (-30,612)}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{107,826}{2} \right|$$

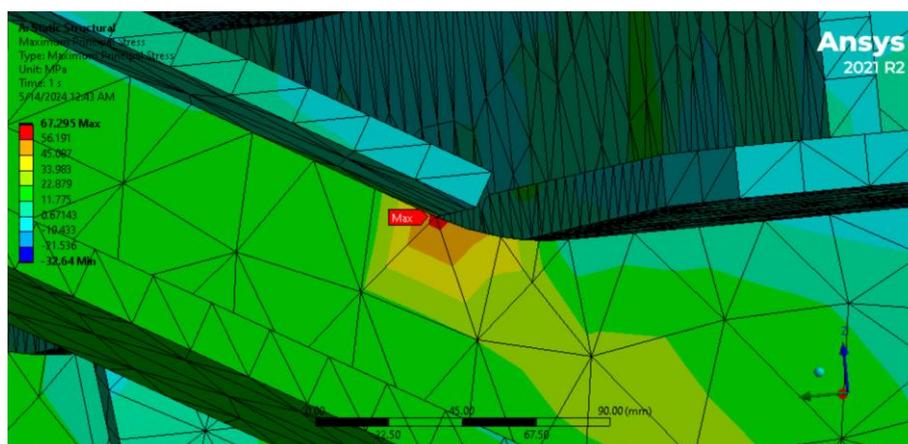
$$\sigma_a = 53,913 \text{ MPa}$$

b. Simulasi *Principal Stress Load Case 2*

Gambar 4.21 menunjukkan hasil simulasi *bogie frame* dengan beban F_{zp} -100384 N dan F_{z1} -43022 N. Tegangan *principal* maksimal sebesar 67,295 MPa terjadi pada daerah sambungan *stiffener* dan *sidebearer* karena pada daerah tersebut banyak menerima beban untuk solusinya bisa dilakukan memodifikasi model pada area sambungan *stiffener* dan *sidebearer* tersebut. Dalam kondisi beban bertumpu pada titik F_{zp} di tengah dan F_{z1} diasumsikan kondisi kereta berat sebelah atau karena kereta miring ke kanan yang disebabkan rel kereta tidak rata. *Principal stress* masih berada di bawah kekuatan luluh (*yield strength*) material S355J2+N, yaitu sebesar 355 MPa. Dengan tegangan kerja yang lebih kecil daripada tegangan yang diizinkan, ini mengindikasikan bahwa *bogie frame* masih aman untuk beroperasi.



Gambar 4. 21 Hasil Simulasi *Principal Stress* Pada *Load Case 2*



Gambar 4. 22 Titik Tegangan Maksimal *Load Case 2*

Tegangan Rata-rata :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{67,295 + (-32,64)}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{34,655}{2}$$

$$\sigma_m = 17,3275 \text{ MPa}$$

Tegangan Amplitudo :

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

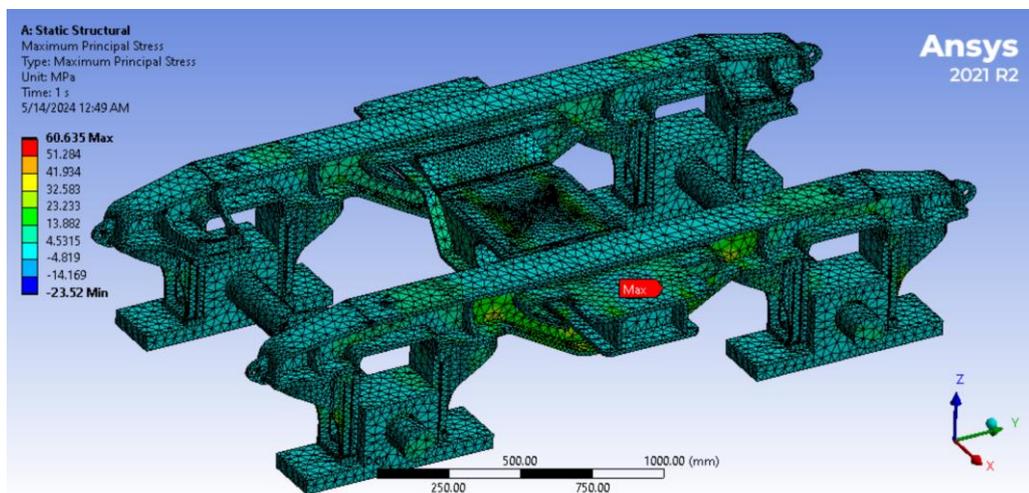
$$\sigma_a = \left| \frac{67,295 - (-32,64)}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{99,935}{2} \right|$$

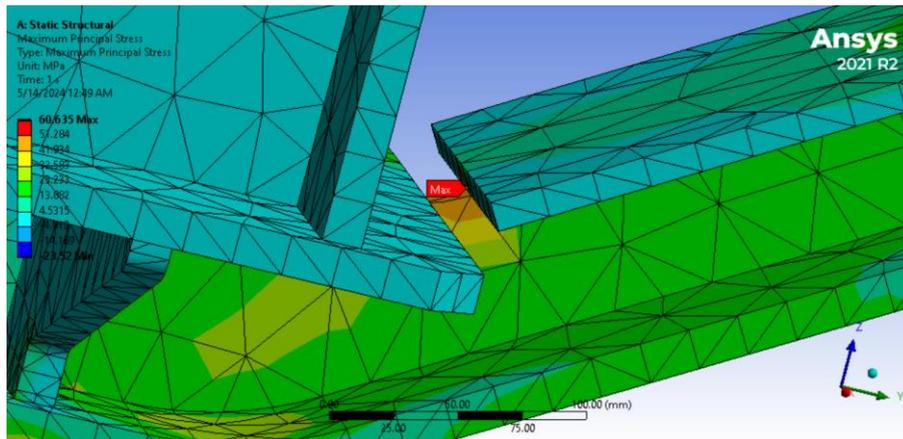
$$\sigma_a = 49,9675 \text{ MPa}$$

c. Simulasi *Principal Stress Load Case 3*

Pada *load case 3* Beban bertumpu pada titik *FZp* di tengah dan *FZ2*. Diasumsikan kondisi kereta berat sebelah atau karena kereta miring ke kiri yang disebabkan rel kereta tidak rata *bogie frame* mendapatkan beban -100384 N dan -43022 N, *principal stress* maksimal yang muncul sebesar 60,635 MPa pada daerah sambungan *stiffener* dan *sidebearer* karena banyak menerima beban untuk solusinya bisa dilakukan memodifikasi model pada area sambungan *stiffener* dan *sidebearer* tersebut. *Principal stress* masih berada di bawah kekuatan luluh (*yield strength*) material S355J2+N, yaitu sebesar 355 MPa. Dengan tegangan kerja yang lebih kecil daripada tegangan yang diizinkan, mengindikasikan bahwa *bogie frame* masih aman untuk beroperasi.



Gambar 4. 23 Hasil Simulasi *Principal Stress* Pada *Load Case 3*



Gambar 4. 24 Titik Tegangan Maksimal *Load Case 3*

Tegangan Rata-rata :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{60,635 + (-23,52)}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{37,115}{2}$$

$$\sigma_m = 18,5575 \text{ MPa}$$

Tegangan Amplitudo

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{60,635 - (-23,52)}{2} \right|$$

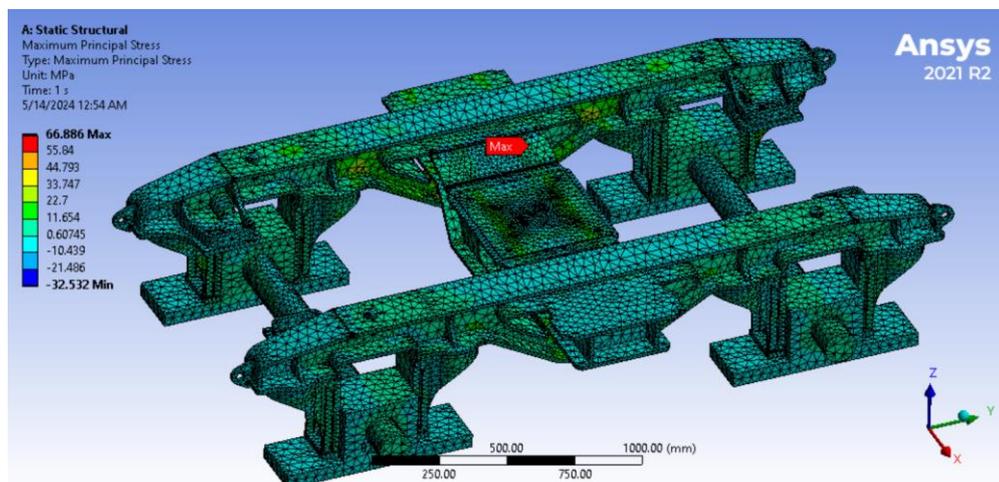
$$\sigma_a = \left| \frac{84,155}{2} \right|$$

$$\sigma_a = 42,0775 \text{ MPa}$$

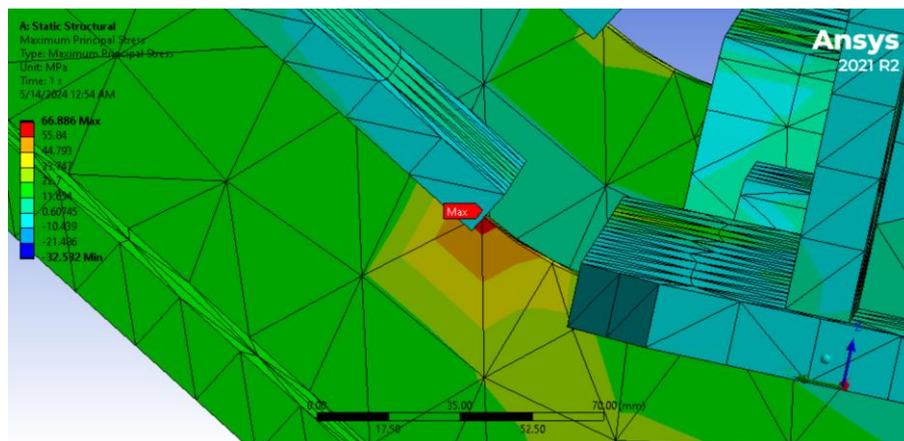
d. Simulasi *Principal Stress Load Case 4*

Kondisi yang disimulasikan adalah ketika kereta berbelok ke arah kanan dengan beban bertumpu pada titik Fz_p di tengah dan Fz_l . Diasumsikan besarnya beban yang bertumpu pada Fz_p adalah -100384 N, pada Fz_l adalah -43022 N, dan terdapat gaya transversal Fx_l sebesar -25942 N. Simulasi pada kondisi pembebanan ini menghasilkan nilai tegangan maksimal sebesar 66,886 MPa dan tegangan minimal sebesar -32,532 MPa. Berbeda dengan contoh sebelumnya, nilai-nilai beban yang diberikan pada *Load Case 4* ini terdapat tambahan gaya transversal Fx_l yang mewakili gaya akibat kereta berbelok dan beban berat sebelah.

Tegangan maksimal terjadi di daerah sambungan *stiffener* dan *sidebearer* karena banyak menerima beban untuk solusinya bisa dilakukan memodifikasi model pada area sambungan *stiffener* dan *sidebearer* tersebut. Meskipun nilai tegangan maksimal dan minimal yang diperoleh cukup besar, namun masih berada di bawah kekuatan luluh (*yield strength*) material S355J2+N yang digunakan untuk *bogie frame*, yaitu sebesar 355 MPa. Dengan tegangan kerja yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan, hal ini mengindikasikan bahwa desain *bogie frame* masih aman untuk dioperasikan dalam kondisi pembebanan yang kompleks seperti saat berbelok dengan beban berat sebelah seperti pada *Load Case 4* tersebut.



Gambar 4. 25 Hasil Simulasi *Principal Stress* Pada *Load Case 4*



Gambar 4. 26 Titik Tegangan Maksimal *Load Case 4*

Tegangan Rata-rata :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{66,886 + (-32,532)}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{34,354}{2}$$

$$\sigma_m = 17,177 \text{ MPa}$$

Tegangan Amplitudo :

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{66,886 - (-32,532)}{2} \right|$$

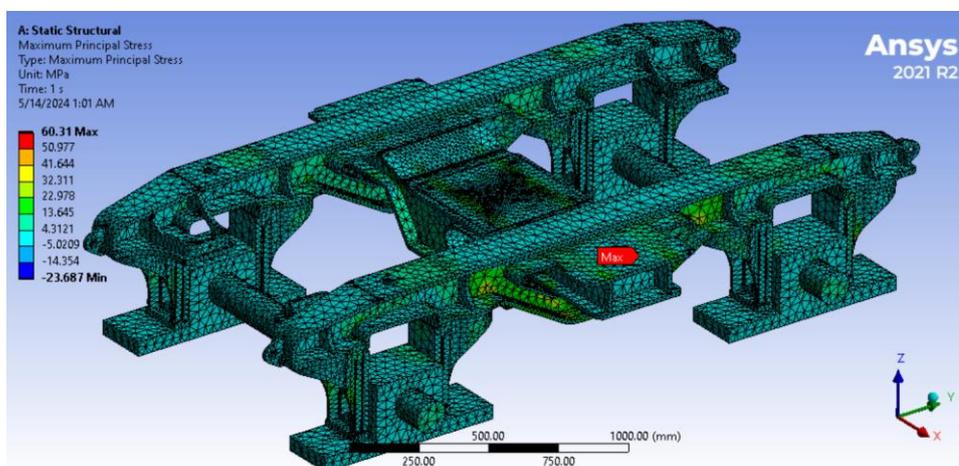
$$\sigma_a = \left| \frac{99,418}{2} \right|$$

$$\sigma_a = 49,709 \text{ MPa}$$

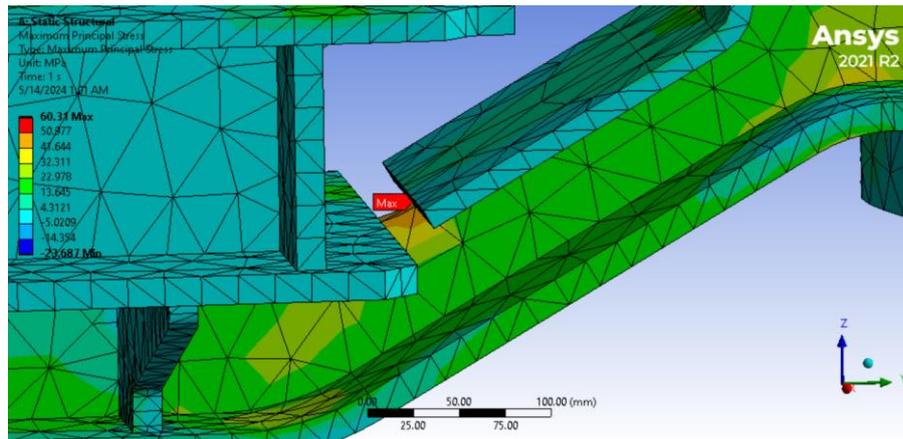
e. Simulasi *Principal Stress Load Case 5*

Kondisi yang disimulasikan adalah ketika kereta berbelok ke arah kiri dengan beban bertumpu pada titik Fz_p di tengah dan Fz_2 . Diasumsikan besarnya beban yang bertumpu pada Fz_p adalah -100384 N, pada Fz_1 adalah -43022 N, dan terdapat gaya transversal Fx_1 sebesar 25942 N. Simulasi pada kondisi pembebanan ini menghasilkan nilai tegangan maksimal sebesar 60,31 MPa pada daerah sambungan *stiffener* dan *sidebearer* karena banyak menerima beban untuk solusinya bisa dilakukan memodifikasi model pada area sambungan *stiffener* dan *sidebearer* tersebut.

Nilai-nilai tegangan yang diperoleh masih berada di bawah kekuatan luluh (*yield strength*) dari material S355J2+N yang digunakan untuk *bogie frame*, yaitu sebesar 355 MPa. Dengan tegangan kerja yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan, hal ini mengindikasikan bahwa desain *bogie frame* masih aman untuk dioperasikan dalam kondisi pembebanan tersebut.



Gambar 4. 27 Hasil Simulasi *Principal Stress* Pada *Load Case 5*



Gambar 4. 28 Titik Tegangan Maksimal *Load Case 5*

Tegangan Rata-rata :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{60,31 + (-23,687)}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{36,623}{2}$$

$$\sigma_m = 18,3115 \text{ MPa}$$

Tegangan Amplitudo :

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{60,31 - (-23,687)}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{83,997}{2} \right|$$

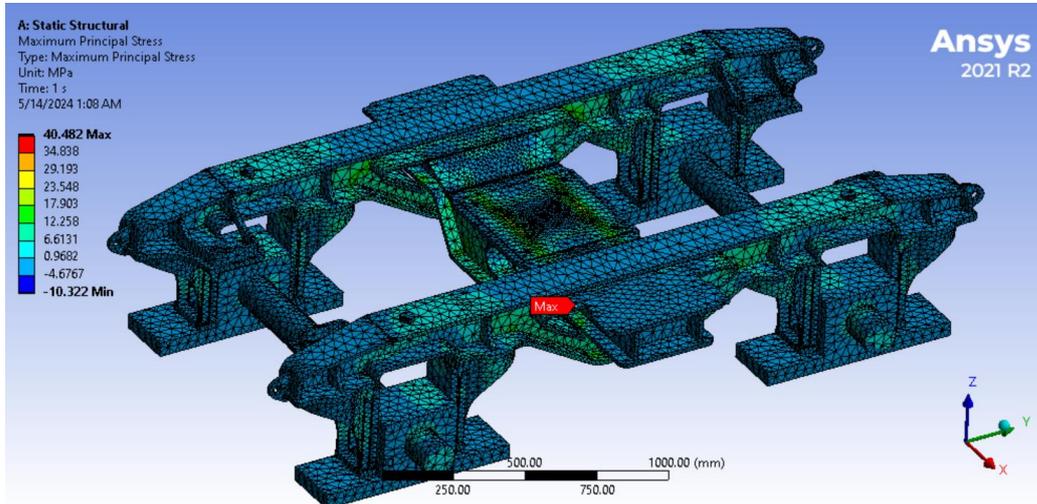
$$\sigma_a = 41,9985 \text{ MPa}$$

f. Simulasi *Principal Stress Load Case 6*

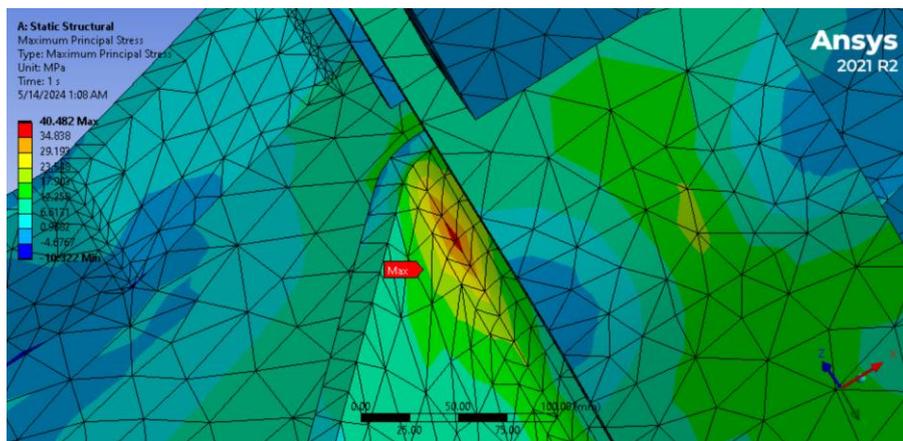
Pada *Load Case 6*, kondisi yang disimulasikan adalah ketika terdapat gaya pengereman dengan beban bertumpu pada titik F_{zp} di tengah. Beban yang bertumpu pada titik F_{zp} diasumsikan sebesar -100384 N, sedangkan pada titik F_y adalah 9565 N. Simulasi pada kondisi pembebanan ini menghasilkan nilai tegangan maksimal sebesar 40,482 MPa, nilai tegangan maksimal terjadi dibawah transom dikarenakan transom banyak menerima beban untuk solusinya bisa dilakukan penebalan plat atau dilakukan penambahan penguat atau *stiffener*.

Nilai tegangan maksimal maupun tegangan minimal yang diperoleh masih berada di bawah kekuatan luluh (*yield strength*) material S355J2+N yang digunakan untuk *bogie frame*, yaitu

sebesar 355 MPa. Dengan tegangan maksimal yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan, hal ini mengindikasikan bahwa desain *bogie frame* masih aman untuk dioperasikan dalam kondisi pembebanan yang terjadi saat pengereman seperti pada *Load Case* 6 tersebut.



Gambar 4. 29 Hasil Simulasi *Principal Stress* Pada *Load Case* 6



Gambar 4. 30 Titik Tegangan Maksimal *Load Case* 6

Tegangan Rata-rata :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{40,482 + (-10,322)}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{30,16}{2}$$

$$\sigma_m = 15,08 \text{ MPa}$$

Tegangan Amplitudo :

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{40,482 - (-10,322)}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{50,804}{2} \right|$$

$$\sigma_a = 25,402 \text{ MPa}$$

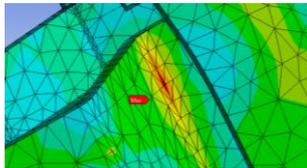
Tabel 4.11 menunjukkan nilai-nilai tegangan rata-rata dan amplitudo dari simulasi *principal stress* pada beberapa *load case* :

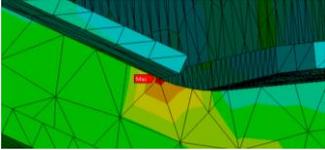
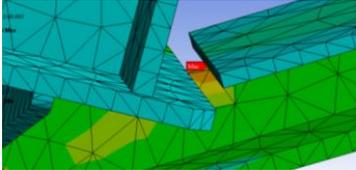
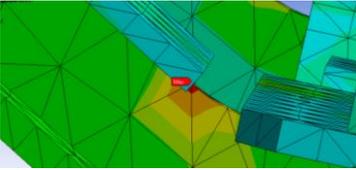
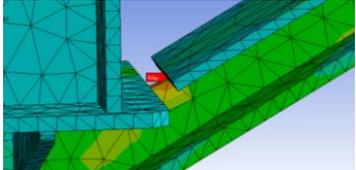
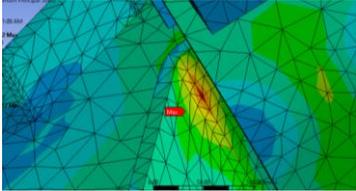
Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Tegangan Amplitudo dan Tegangan Rata-rata

No.	Kondisi <i>Load Case</i>	Tegangan Rata-rata (MPa)	Tegangan Amplitudo (MPa)
1	<i>Load Case 1</i>	23,301	53,913
2	<i>Load Case 2</i>	17,3275	49,9675
3	<i>Load case 3</i>	18,5575	42,0775
4	<i>Load Case 4</i>	17,177	49,709
5	<i>Load Case 5</i>	18,3115	41,9985
6	<i>Load Case 6</i>	15,08	25,402

Tabel 4.12 menunjukkan validasi tegangan maksimum *principal stress* dari setiap *load case*, dimana pada tabel memperlihatkan titik tegangan maksimal, *critical area*, dan memvalidasi bahwa tegangan maksimal yang keluar tidak melebihi dari batas maksimal atau *yield stress*.

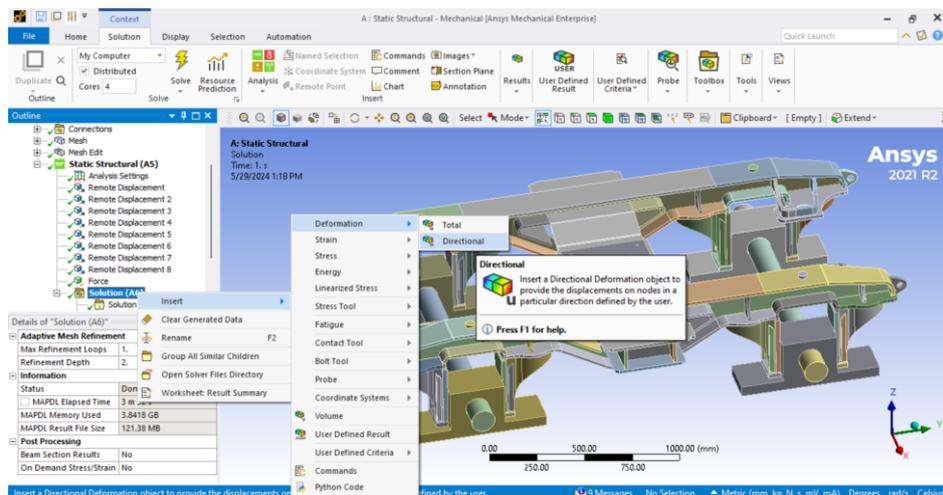
Tabel 4. 12 Validasi Tegangan Maximum *Principal Stress*

No.	Kondisi <i>Load Case</i>	Tegangan Maksimum (MPa)	Daerah Tegangan Maksimum	Kriteria (MPa)	Keterangan
1.	<i>Load Case 1</i>	77,214	Dibawah Transom 	355	OK

2.	<i>Load Case 2</i>	67,295	<p>Sambungan <i>Stiffener</i> dan <i>Side bearer</i></p> 	355	OK
3.	<i>Load case 3</i>	60,635	<p>Sambungan <i>Stiffener</i> dan <i>Side bearer</i></p> 	355	OK
4.	<i>Load Case 4</i>	66,886	<p>Sambungan <i>Stiffener</i> dan <i>Side bearer</i></p> 	355	OK
5.	<i>Load Case 5</i>	60,31	<p>Sambungan <i>Stiffener</i> dan <i>Side bearer</i></p> 	355	OK
6.	<i>Load Case 6</i>	40,482	<p>Dibawah <i>Transom</i></p> 	355	OK

4.2.8 Hasil Deformasi

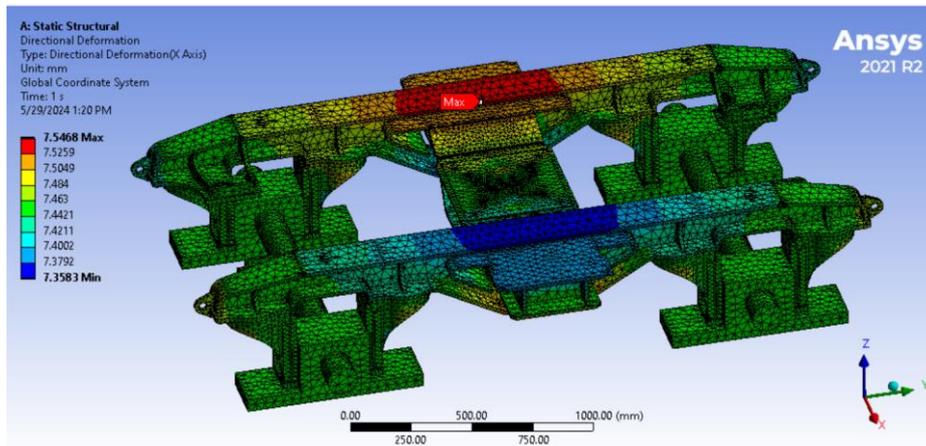
Berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS, analisis deformasi yang dilakukan pada model *bogie frame* kereta api memberikan informasi penting mengenai perilaku struktur di bawah kondisi pembebanan operasional yang dimodelkan. Melalui visualisasi deformasi pada model, area-area kritis yang mengalami deformasi signifikan dapat diidentifikasi. Hasil simulasi deformasi menggunakan perangkat lunak ANSYS memberikan informasi penting tentang perilaku struktur *bogie frame* kereta api dibawah kondisi pembebanan tertentu.



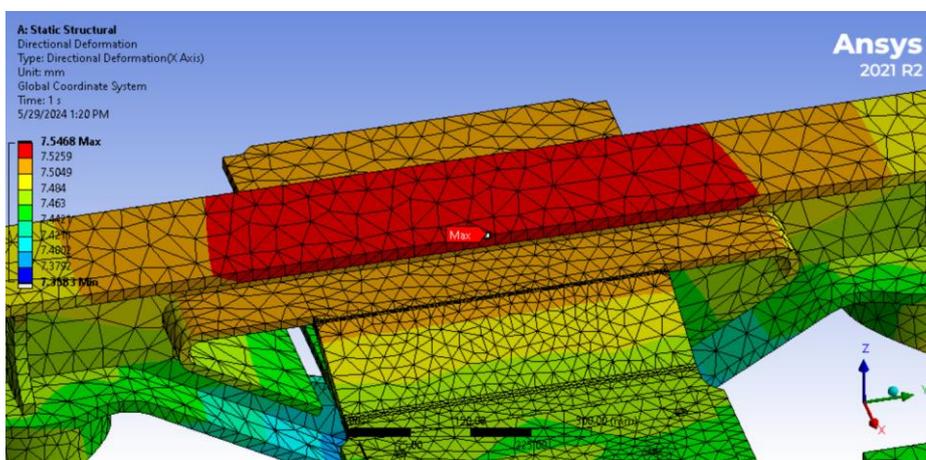
Gambar 4. 31 Metode Deformasi

a. Simulasi *Directional Deformation* Pada *Load Case 1*

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *X-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah Top Plate sebelah kiri *bogie frame* sebesar 7,5468 mm selain itu juga terdapat searah *X-Axis Directional Deformation* terkecil pada Top Plate sebelah kanan *bogie frame* dengan nilai 7,3583 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, deformasi pada *X-Axis* terjadi di top plate sebelah kanan dan kiri dari *sidebearer*, meskipun beban vertikal diterapkan pada tengah transom, terjadi karena distribusi gaya dan momen yang dihasilkan oleh beban tersebut. Beban vertikal pada tengah transom menciptakan momen lentur yang menyebabkan gaya tarik di kedua sisi transom. Gaya ini diteruskan ke top plate dari *sidebearer*, memaksa komponen ini menahan gaya lateral pada *X-Axis*. Reaksi pada sambungan antara transom dan *sidebearer* menambah konsentrasi tegangan di area tersebut.

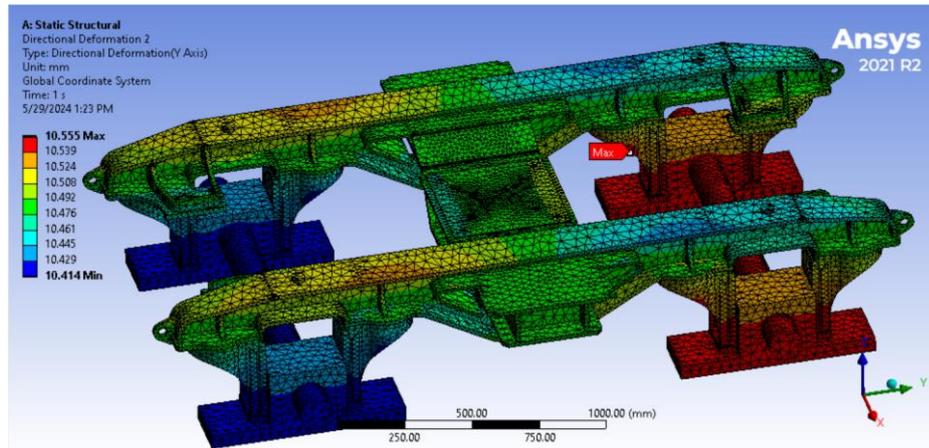


Gambar 4. 32 *Directional Deformation Pada X-Axis*

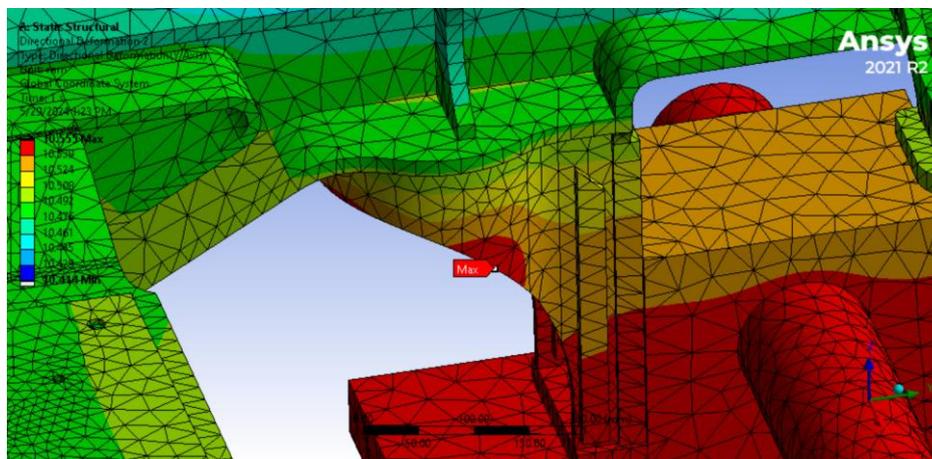


Gambar 4. 33 *Titik Directional Deformation Pada X-Axis*

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Y-axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Spring Cup* sebelah depan kiri *bogie frame* sebesar 10,555 mm selain itu juga terdapat searah *Y-axis Directional Deformation* terkecil pada *Spring Cup* bagian belakang kiri *bogie frame* dengan nilai 10,414 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, deformasi maksimal pada *Y-axis* di *Spring Cup* sebelah depan kiri dan belakang kanan dari *sidebearer*, meskipun beban vertikal diterapkan pada tengah transom, terjadi karena distribusi gaya dan interaksi struktural kompleks dalam bogie kereta. Ketika beban vertikal diterapkan di tengah transom, beban ini menyebabkan momen lentur yang menghasilkan gaya tarik di seluruh struktur, termasuk *Spring Cup*. *Spring Cup* dirancang untuk menahan gaya vertikal dari pegas suspensi, tetapi momen lentur dan distribusi beban menyebabkan gaya lateral yang signifikan di sepanjang *Y-axis*.



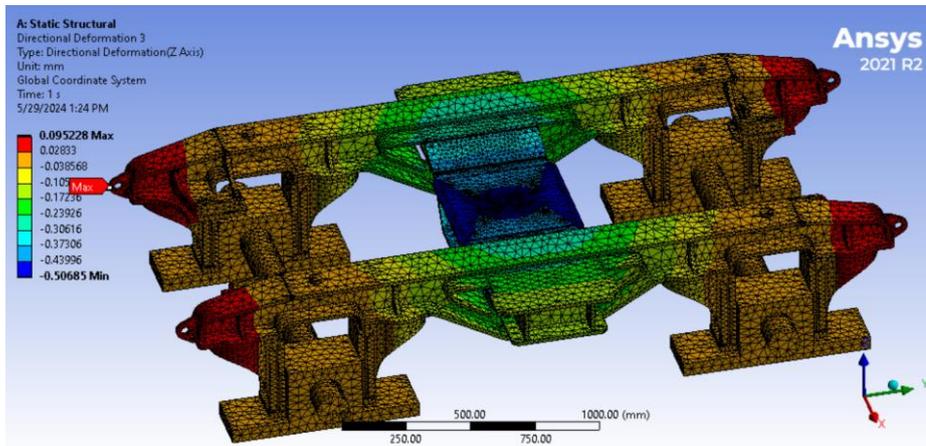
Gambar 4. 34 *Directional Deformation* Pada Y-Axis



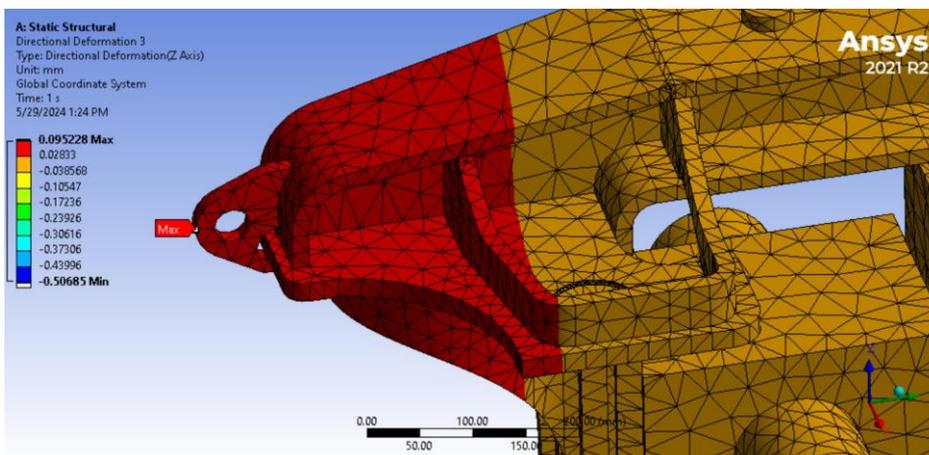
Gambar 4. 35 Titik *Directional Deformation* Pada Y-Axis

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Z-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah tengah transom *bogie frame* sebesar -0,50685 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tekan atau *compressive stress*, selain itu juga terdapat searah *Z-Axis Directional Deformation* terkecil ada pada daerah *Hook* ujung belakang kiri bagian *bogie frame* sebesar 0,50685 mm mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, deformasi pada *Z-Axis* di bagian tengah transom dan di ujung *Hook* sebelah kiri dari *sidebearer*, meskipun beban vertikal diterapkan di tengah transom, disebabkan oleh distribusi gaya dan momen lentur yang dihasilkan. Ketika beban vertikal diterapkan pada tengah transom momen lentur tercipta, menghasilkan gaya tarik di ujung *Hook* dan gaya tekan di tengah transom. Hal ini menyebabkan tegangan positif (+) di ujung *Hook* karena mereka menahan gaya tarik yang dihasilkan oleh momen lentur. Sebaliknya, di tengah transom terjadi deformasi negatif (-) karena area tersebut menahan gaya tekan. Desain struktural dan kekakuan material memastikan bahwa beban vertikal menyebabkan distribusi gaya yang menciptakan momen lentur, menghasilkan tegangan tarik di ujung *Hook* dan

tegangan tekan di tengah transom, menciptakan deformasi maksimal pada Z-Axis sesuai dengan arah beban yang diterima.



Gambar 4. 36 Directional Deformation Pada Z-Axis

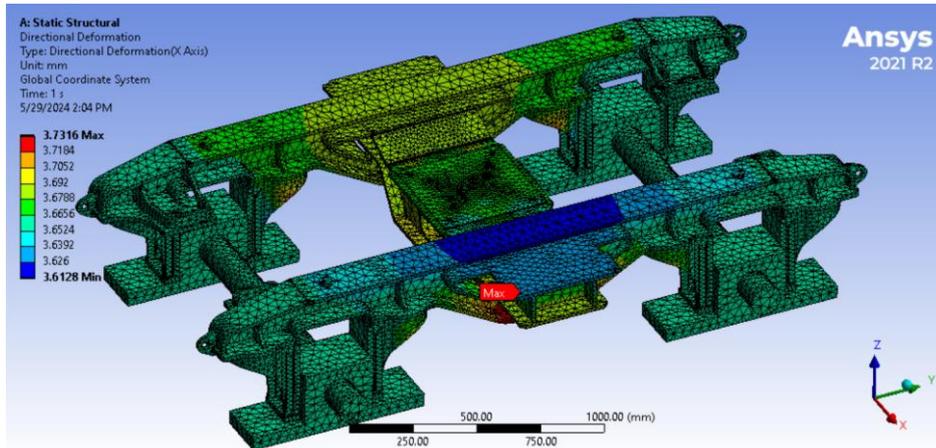


Gambar 4. 37 Titik Directional Deformation Pada Z-Axis

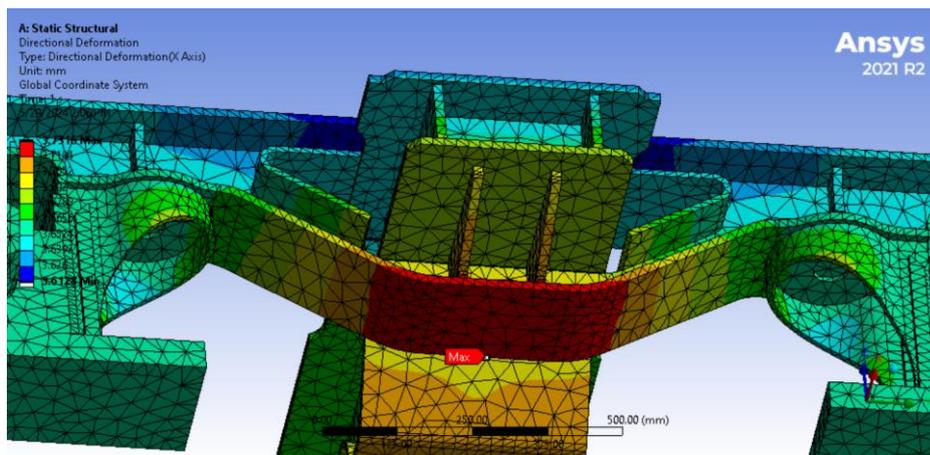
b. Simulasi *Directional Deformation* Pada *Load Case 2*

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *X-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Bottom Plate* sebelah kanan *bogie frame* sebesar 3,7316 mm selain itu juga terdapat searah *X-Axis Directional Deformation* terkecil pada sebelah kanan *Top Plate bogie frame* dengan nilai 3,6128 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, ketika beban vertikal diterapkan pada tengah dan ujung kiri transom, distribusi gaya yang tidak merata menyebabkan variasi deformasi pada komponen bogie. Pada *X-Axis*, deformasi maksimal warna merah terjadi pada *Bottom Plate* karena beban berat sebelah menyebabkan momen lentur dan gaya tarik yang besar di area tersebut, terutama karena *Bottom Plate* langsung menahan sebagian besar beban vertikal dan lateral. Sementara itu, deformasi maksimal warna biru terjadi pada *Top Plate sidebearer* sebelah kanan karena area ini mengalami gaya tekan yang lebih kecil

sebagai reaksi terhadap distribusi beban yang tidak merata. Beban berat sebelah menciptakan momen lentur dan torsi yang menghasilkan gaya tarik pada *Bottom Plate* dan gaya tekan pada *Top Plate*, menyebabkan perbedaan tegangan yang signifikan di antara kedua komponen tersebut. Kombinasi beban, momen, dan reaksi struktural inilah yang menghasilkan deformasi maksimal pada *Bottom Plate* dan deformasi minimal pada *Top Plate* di *X-Axis*.



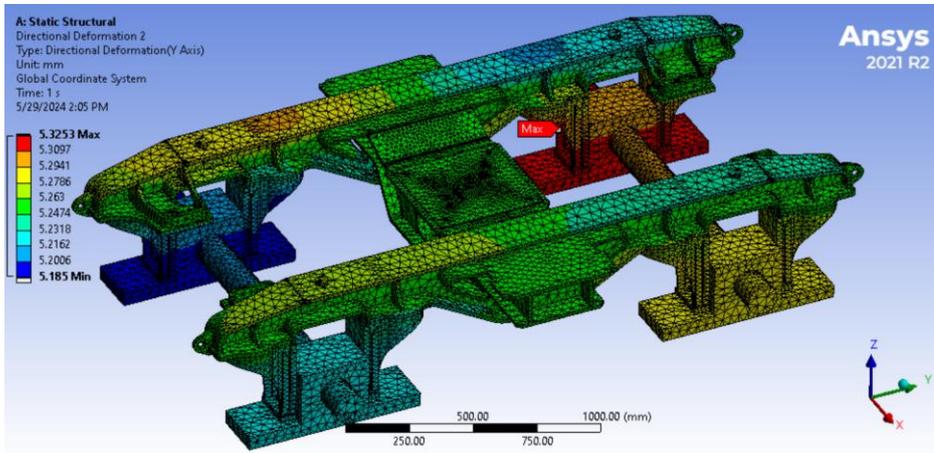
Gambar 4. 38 *Directional Deformation* Pada *X-Axis*



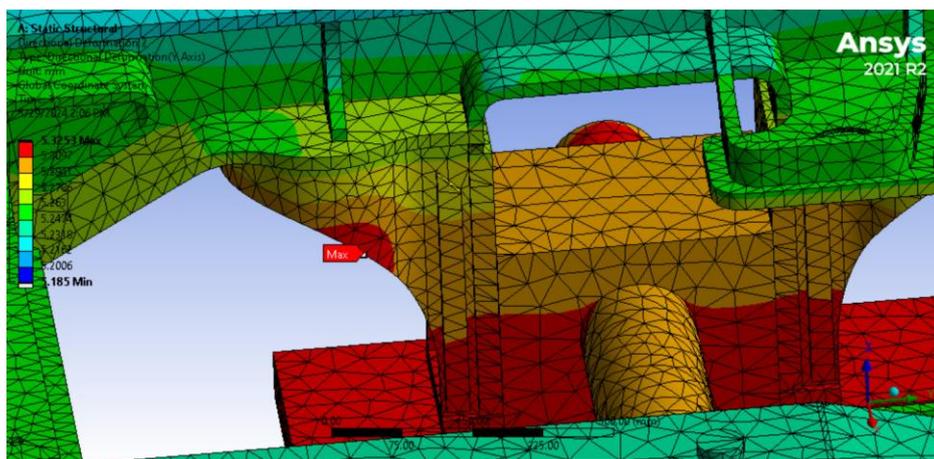
Gambar 4. 39 Titik *Directional Deformation* Pada *X-Axis*

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Y-axle Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Spring Cup* sebelah depan kiri *bogie frame* sebesar 5,3253 mm selain itu juga terdapat searah *Y-axle Directional Deformation* terkecil pada *Spring Cup* bagian belakang kiri *bogie frame* dengan nilai 5,185 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*. Beban vertikal pada tengah dan ujung kiri transom menyebabkan distribusi gaya yang tidak merata, menghasilkan momen lentur dan torsi yang signifikan. Ini menyebabkan deformasi maksimal pada *Y-axle* di *Spring Cup* depan dan belakang di *sidebearer* sebelah kiri. *Spring Cup* dirancang untuk menahan gaya dari pegas suspensi, dan beban berat sebelah meningkatkan gaya lateral di

sidebearer sebelah kiri. Akibatnya, *Spring Cup* menanggung beban lateral lebih besar, menghasilkan deformasi tinggi pada *Y-axle*. Kombinasi distribusi beban yang tidak merata dan reaksi struktural menyebabkan konsentrasi deformasi di area tersebut.



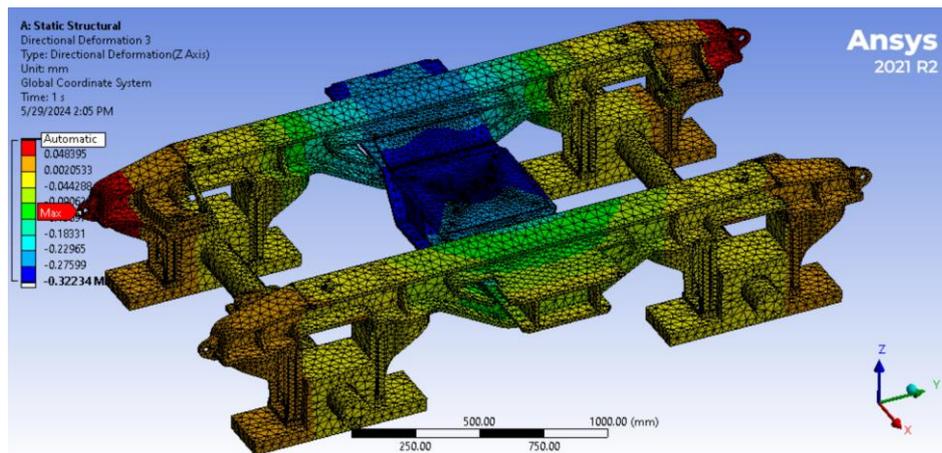
Gambar 4. 40 Directional Deformation Pada Y-Axis



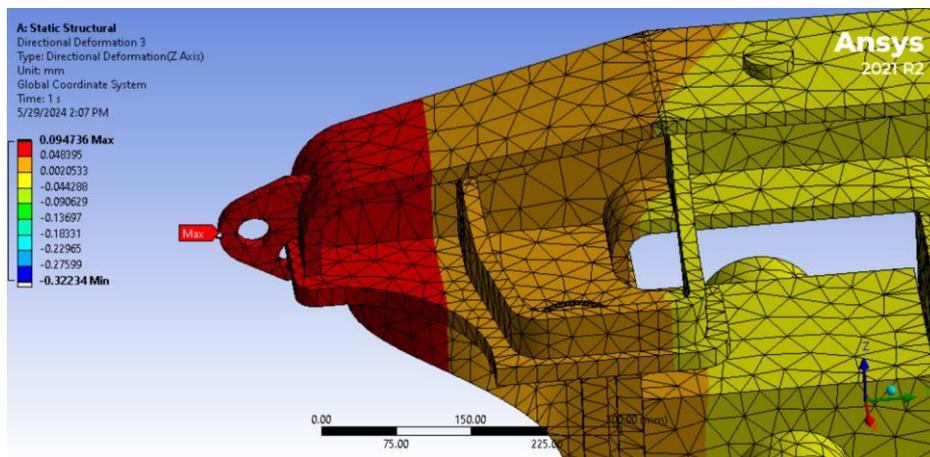
Gambar 4. 41 Titik Directional Deformation Pada Y-Axis

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Z-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah tengah transom *bogie frame* sebesar -0,32234 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tekan atau *compressive stress*, selain itu juga terdapat searah *Z-Axis Directional Deformation* terkecil ada pada daerah *Hook* ujung belakang kiri bagian *bogie frame* sebesar 0,094736 mm mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, ketika beban vertikal diterapkan pada tengah dan ujung kiri transom (beban berat sebelah), distribusi gaya yang tidak merata menyebabkan deformasi maksimal pada *Z-Axis* di ujung *Hook* sebelah kiri dari *sidebearer* dan deformasi minimal di ujung kiri transom. Beban berat sebelah menyebabkan momen lentur yang signifikan pada transom, menghasilkan gaya tarik di ujung *Hook* sebelah kiri dan gaya tekan di tengah transom. Deformasi positif (+) pada ujung *Hook* sebelah kiri terjadi karena gaya tarik yang dihasilkan

oleh momen lentur, yang mencoba menarik *Hook* ke arah luar. Sebaliknya, deformasi negatif (-) di ujung kiri transom terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah dan gaya tekan yang mencoba mendorong area ini ke dalam. Desain struktural dan kekakuan material memastikan bahwa beban vertikal dan momen lentur mendistribusikan gaya-gaya ini secara spesifik, menyebabkan konsentrasi tegangan tarik di ujung *Hook* dan tegangan tekan di ujung kiri transom. Kombinasi distribusi beban, momen lentur, dan reaksi struktural inilah yang menghasilkan deformasi maksimal dan minimal pada *Z-Axis* di area-area tersebut.



Gambar 4. 42 Directional Deformation Pada Z-Axis

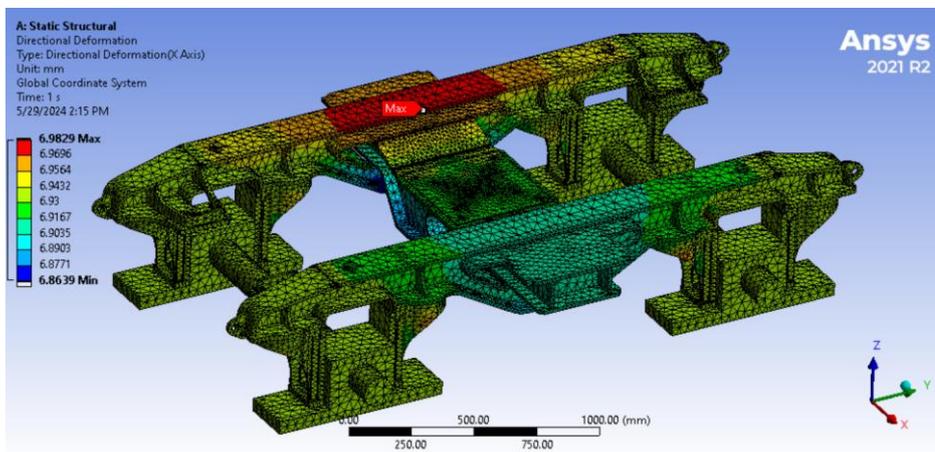


Gambar 4. 43 Titik Directional Deformation Pada Z-Axis

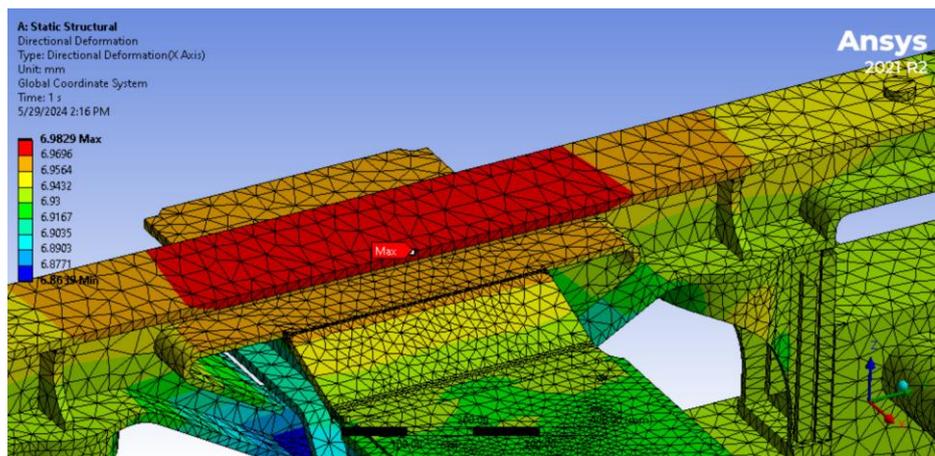
c. Simulasi *Directional Deformation* Pada Load Case 3

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *X-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Top Plate* sebelah kiri *bogie frame* sebesar 6,9829 mm selain itu juga terdapat searah *X-Axis Directional Deformation* terkecil pada *Bottom Plate* sebelah kiri *bogie frame* dengan nilai 6,8639 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, ketika beban vertikal diterapkan pada tengah dan ujung kanan transom (beban berat sebelah), distribusi gaya

yang tidak merata menyebabkan variasi deformasi pada komponen bogie. Pada *X-Axis*, deformasi maksimal warna merah terjadi pada *Top Plate* karena beban berat sebelah menyebabkan momen lentur dan gaya tarik yang besar di area tersebut, terutama karena *Top Plate* langsung menahan sebagian besar beban vertikal dan lateral. Sementara itu, deformasi maksimal warna biru terjadi pada *Bottom Plate sidebearer* sebelah kiri karena area ini mengalami gaya tekan yang lebih kecil sebagai reaksi terhadap distribusi beban yang tidak merata. Beban berat sebelah menciptakan momen lentur dan torsi yang menghasilkan gaya tarik pada *Top Plate* dan gaya tekan pada *Bottom Plate*, menyebabkan perbedaan deformasi yang signifikan di antara kedua komponen tersebut. Kombinasi beban, momen, dan reaksi struktural inilah yang menghasilkan deformasi maksimal pada *Top Plate* dan deformasi minimal pada *Bottom Plate* di *X-Axis*.



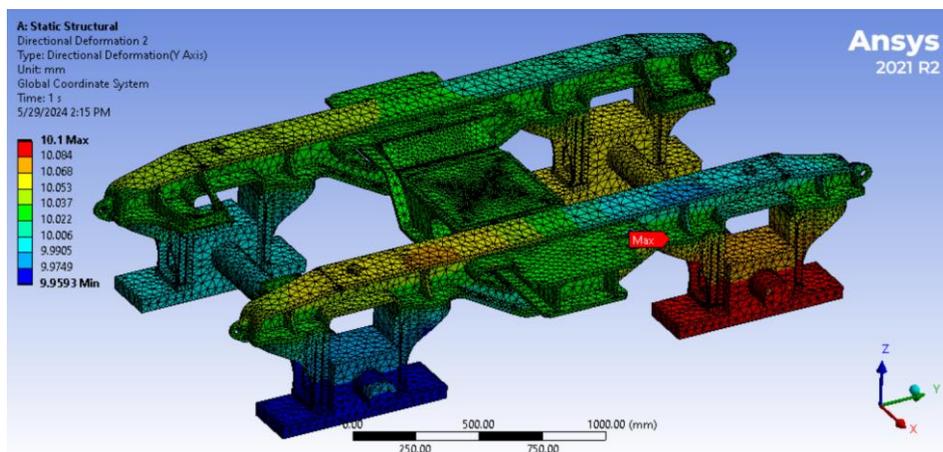
Gambar 4. 44 Directional Deformation Pada X-Axis



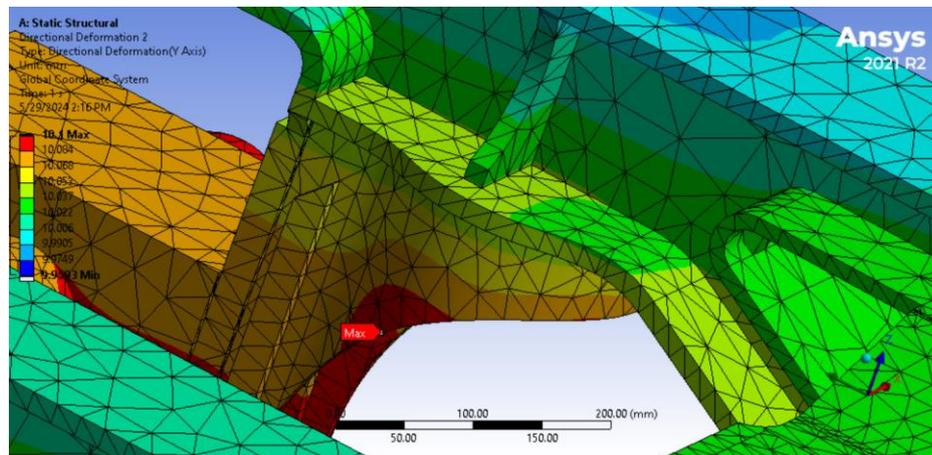
Gambar 4. 45 Titik Directional Deformation Pada X-Axis

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Y-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Spring Cup* sebelah depan kanan *bogie frame* sebesar 10 mm selain itu juga terdapat searah *Y-Axis*

Directional Deformation terkecil pada *Spring Cup* bagian belakang kanan *bogie frame* dengan nilai 9,9593 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, beban vertikal pada tengah dan ujung kanan transom menyebabkan distribusi gaya yang tidak merata, menghasilkan momen lentur dan torsi yang signifikan. Menyebabkan deformasi maksimal pada *Y-Axis* di *Spring Cup* depan dan belakang di *sidebearer* sebelah kanan. *Spring Cup* dirancang untuk menahan gaya dari pegas suspensi, dan beban berat sebelah meningkatkan gaya lateral di *sidebearer* sebelah kanan. Akibatnya, *Spring Cup* menanggung beban lateral lebih besar, menghasilkan deformasi tinggi pada *Y-Axis*. Kombinasi distribusi beban yang tidak merata dan reaksi struktural menyebabkan konsentrasi deformasi di area tersebut.



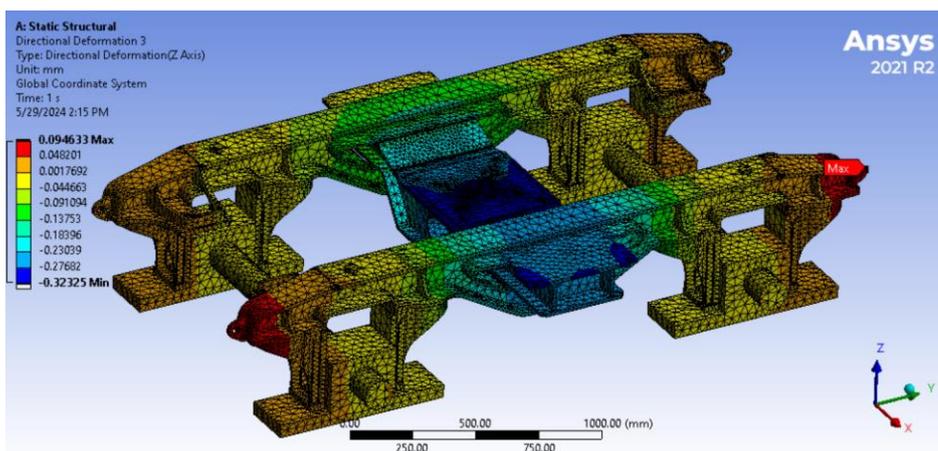
Gambar 4. 46 *Directional Deformation* Pada *Y-Axis*



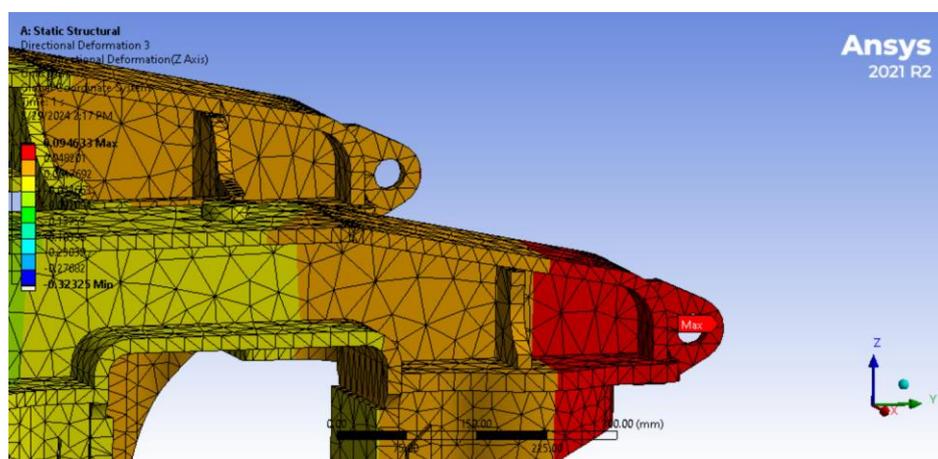
Gambar 4. 47 Titik *Directional Deformation* Pada *Y-Axis*

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Z-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah tengah transom *bogie frame* sebesar -0,32325 mm mengalami tegangan tekan atau *compressive stress* selain itu juga terdapat searah *Z-Axis Directional Deformation* terkecil ada pada daerah *Hook* ujung depan kanan bagian *bogie frame* sebesar 0,094633 mm mengalami tegangan tarik atau

tensile stress, ketika beban vertikal diterapkan pada tengah dan ujung kanan transom, distribusi gaya yang tidak merata menyebabkan deformasi maksimal pada *Z-Axis* di ujung *Hook* sebelah kanan dari *sidebearer* dan deformasi minimal di ujung kanan transom. Beban berat sebelah menyebabkan momen lentur yang signifikan pada transom, menghasilkan gaya tarik di ujung *Hook* sebelah kanan dan gaya tekan di ujung kanan transom. Deformasi positif (+) pada ujung *Hook* sebelah kanan terjadi karena gaya tarik yang dihasilkan oleh momen lentur, yang mencoba menarik *Hook* ke arah luar. Sebaliknya, deformasi negatif (-) di ujung kanan transom terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah dan gaya tekan yang mencoba mendorong area ini ke dalam. Desain struktural dan kekakuan material memastikan bahwa beban vertikal dan momen lentur mendistribusikan gaya-gaya ini secara spesifik, menyebabkan konsentrasi tegangan tarik di ujung *Hook* dan tegangan tekan di ujung kanan transom. Kombinasi distribusi beban, momen lentur, dan reaksi struktural inilah yang menghasilkan deformasi maksimal dan minimal pada *Z-Axis* di area-area tersebut.



Gambar 4. 48 Directional Deformation Pada Z-Axis

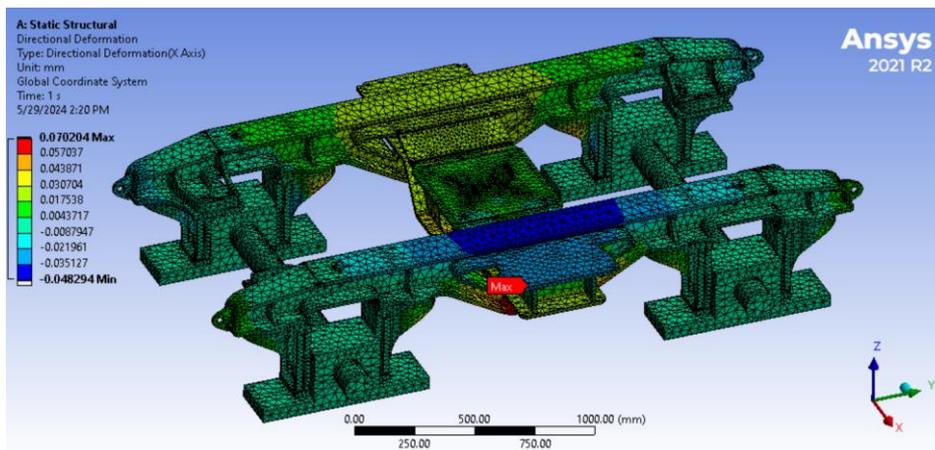


Gambar 4. 49 Titik Directional Deformation Pada Z-Axis

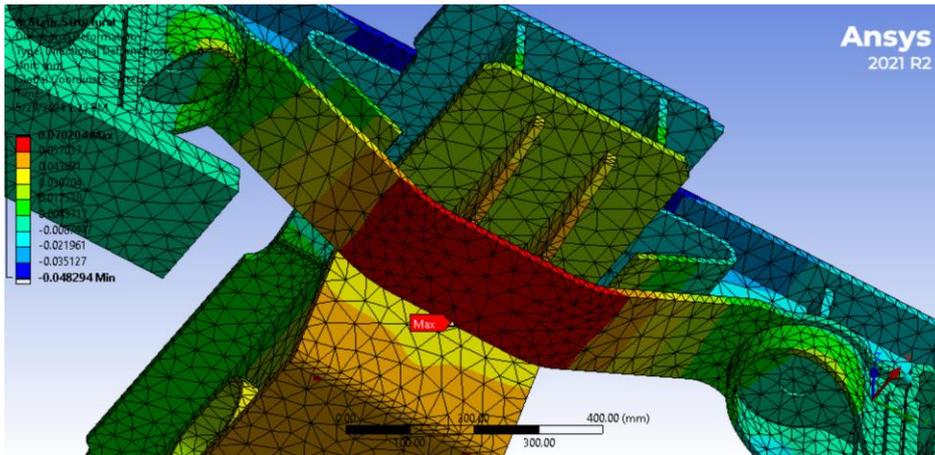
d. Simulasi *Directional Deformation* Pada *Load Case 4*

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *X-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Bottom Plate* sebelah kanan *bogie frame* sebesar 0,070204 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress* selain itu juga terdapat searah *X-Axis Directional Deformation* terkecil pada *Top Plate* sebelah kanan *bogie frame* dengan nilai -0,048294 mm mengalami tegangan tekan atau *compressive stress*, terdapat gaya transversal atau kendaraan berbelok ke kiri, beban yang lebih berat di daerah kiri menyebabkan distribusi tekanan yang lebih besar pada komponen daerah tersebut. Deformasi maksimal warna merah yang terjadi pada *Bottom Plate* di *sidebearer* kanan dapat dijelaskan oleh efek puntir dan distribusi beban yang tidak simetris. Ketika kendaraan berbelok, gaya sentrifugal menambah beban pada komponen di sisi luar (kanan) karena momen puntir yang dihasilkan. Ini menyebabkan *Bottom Plate* bagian kanan *sidebearer* mengalami deformasi tinggi karena menahan sebagian besar beban transversal dan vertikal yang terdistribusi secara asimetris.

Sebaliknya, deformasi maksimal warna biru yang terjadi pada *Top Plate* di *sidebearer* kanan menunjukkan bahwa bagian ini mengalami deformasi yang lebih rendah, karena sifat struktural yang lebih fleksibel atau beban yang terdistribusi lebih baik di sepanjang *top plate* dibandingkan *Bottom Plate*. Kombinasi beban vertikal dan transversal menciptakan kondisi di mana *Bottom Plate* menanggung lebih banyak stres daripada *Top Plate*.

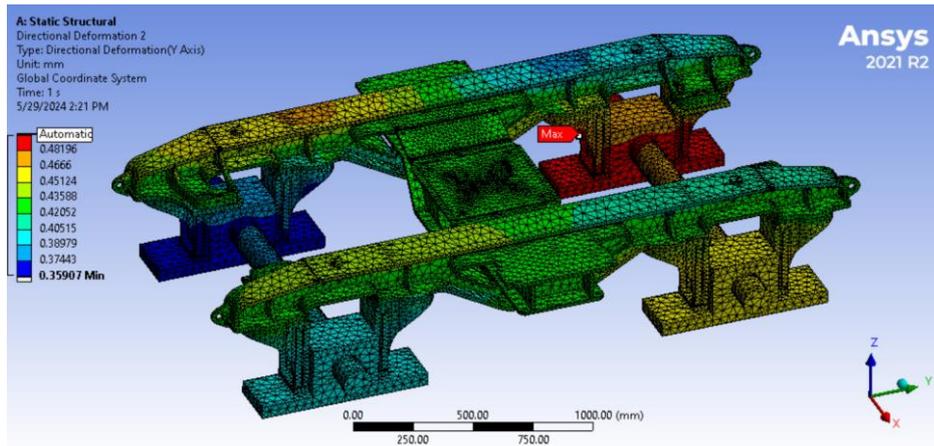


Gambar 4. 50 *Directional Deformation* Pada *X-Axis*

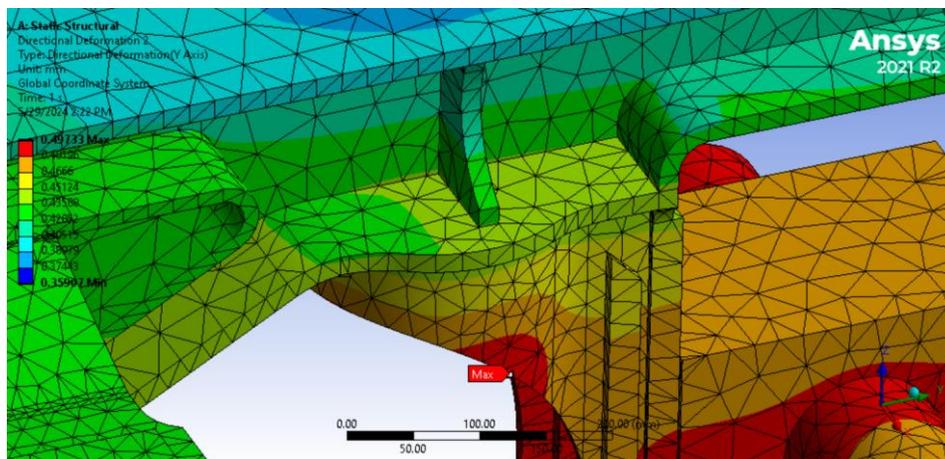


Gambar 4. 51 Titik *Directional Deformation* Pada *X-Axis*

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Y-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Spring Cup* sebelah depan kiri *bogie frame* sebesar 0,49733 mm selain itu juga terdapat searah *Y-Axis Directional Deformation* terkecil pada *Spring Cup* bagian belakang kiri *bogie frame* dengan nilai 0,35907 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, dalam situasi di mana kereta berbelok ke arah kiri dengan beban berat sebelah kiri, gaya sentrifugal dan beban vertikal yang tidak seimbang menghasilkan distribusi tekanan yang signifikan pada komponen di sisi kiri kereta. Pada *Y-Axis*, nilai deformasi maksimal yang terjadi pada *Spring Cup* di *sidebearer* kiri dikarenakan kombinasi dari beban vertikal yang lebih besar di sisi kiri dan gaya transversal yang dihasilkan oleh belokan. Ketika kereta berbelok ke kiri, beban tambahan dari gaya sentrifugal dan distribusi beban yang berat sebelah kiri menyebabkan peningkatan tekanan pada komponen di sisi tersebut. *Spring Cup* di *sidebearer* kiri, yang dirancang untuk menyerap sebagian besar beban vertikal dan transversal, mengalami deformasi yang lebih besar karena menahan beban yang terdistribusi tidak merata. Peningkatan deformasi pada *Spring Cup* di *sidebearer* kiri terjadi karena komponen ini harus menahan kombinasi beban vertikal dari berat sebelah dan gaya transversal dari belokan, yang menciptakan kondisi tekanan maksimal pada titik tersebut.

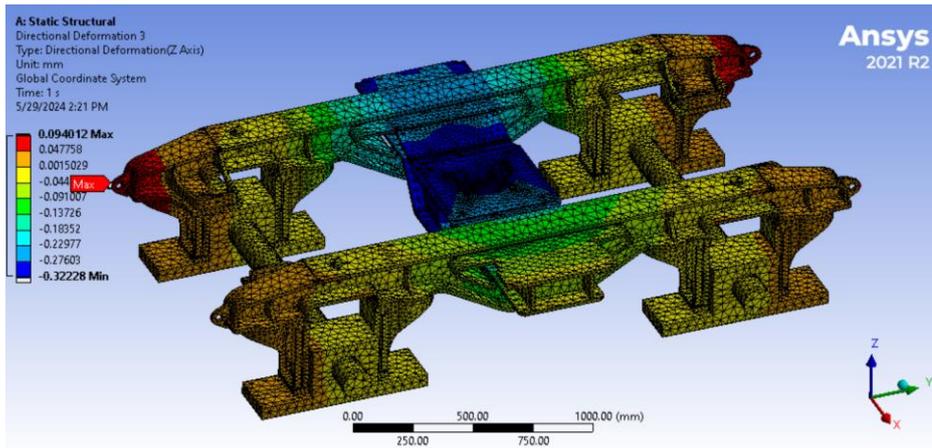


Gambar 4. 52 Directional Deformation Pada Y-Axis

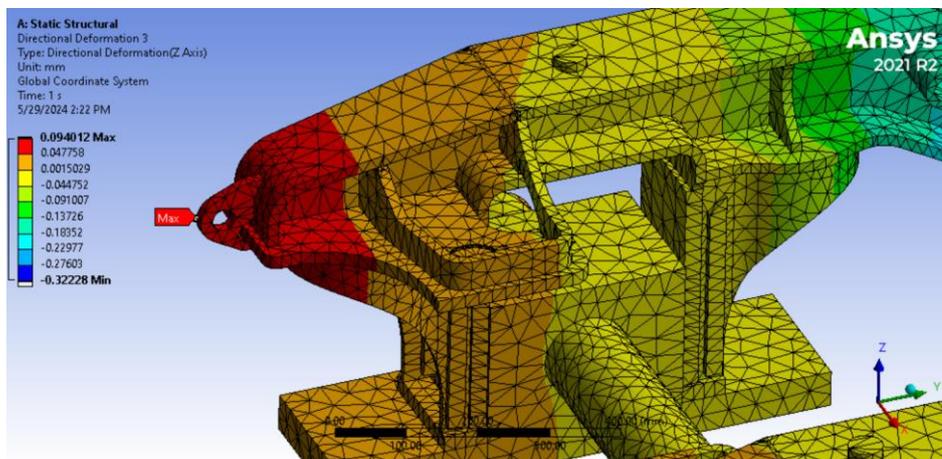


Gambar 4. 53 Titik Directional Deformation Pada Y-Axis

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Z-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah tengah transom *bogie frame* sebesar $-0,32228$ mm mengalami tegangan tekan atau *compressive stress*, selain itu juga terdapat searah *Z-Axis Directional Deformation* terkecil ada pada daerah *Hook* ujung belakang kiri bagian *bogie frame* sebesar $0,094012$ mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, deformasi maksimal pada *Z-Axis* di ujung *Hook sidebearer* kiri dan ujung kiri transom terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah, gaya transversal saat belokan, dan konsentrasi beban pada titik-titik struktural kritis. Ujung *Hook sidebearer* kiri menerima tekanan intensif dari beban gabungan, sementara ujung kiri transom menahan beban tambahan dari distribusi berat yang tidak merata, menciptakan kondisi di mana deformasi maksimal terjadi pada kedua titik ini.



Gambar 4. 54 Directional Deformation Pada Z-Axis

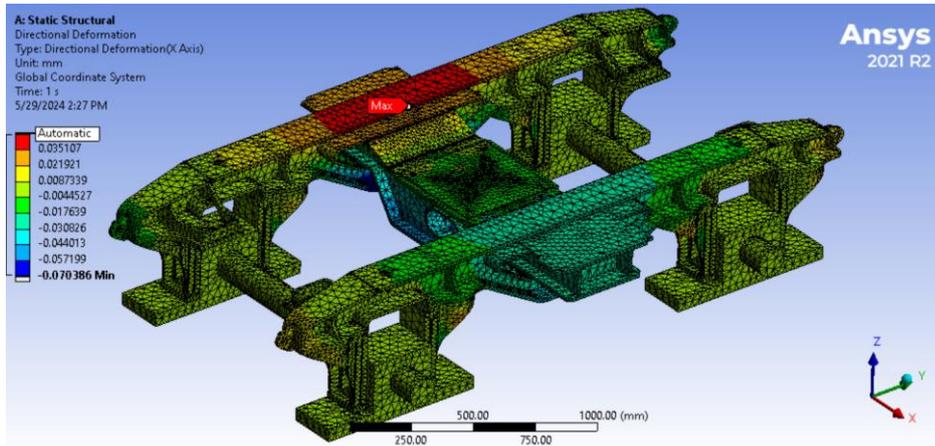


Gambar 4. 55 Titik Directional Deformation Pada Z-Axis

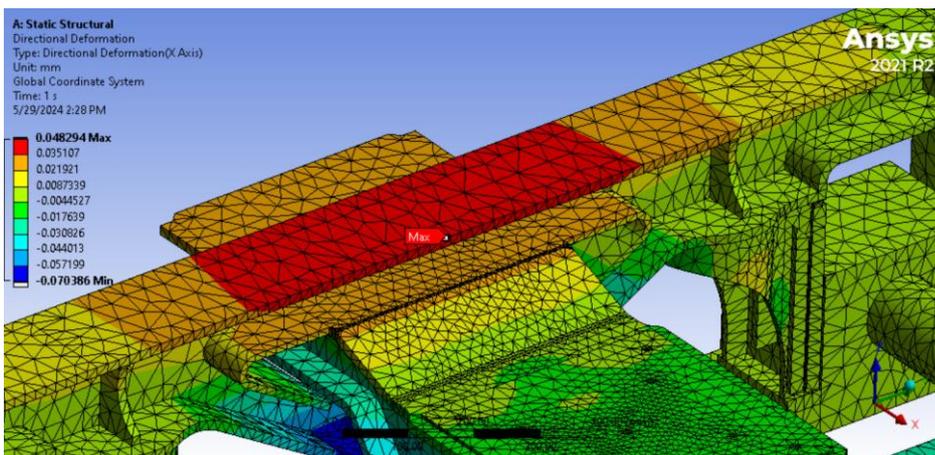
e. Simulasi Directional Deformation Pada Load Case 5

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *X-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Bottom Plate* sebelah kiri *bogie frame* sebesar $-0,070386$ mm mengalami tegangan tekan atau *compressive stress*, selain itu juga terdapat searah *X-Axis Directional Deformation* terkecil pada *Top Plate* sebelah kanan *bogie frame* dengan nilai $0,048294$ mm mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, terdapat gaya transversal atau kendaraan berbelok ke kanan, beban yang lebih berat di daerah kanan menyebabkan distribusi tekanan yang lebih besar pada komponen daerah tersebut. Deformasi maksimal warna merah yang terjadi pada *Top Plate* di *sidebearer* kiri dapat dijelaskan oleh efek puntir dan distribusi beban yang tidak simetris. Ketika kendaraan berbelok, gaya sentrifugal menambah beban pada komponen di sisi luar (kiri) karena momen puntir yang dihasilkan. Ini menyebabkan *Top Plate* bagian kiri *sidebearer* mengalami deformasi tinggi karena menahan sebagian besar beban transversal dan vertikal yang terdistribusi secara asimetris.

Sebaliknya, deformasi maksimal warna biru yang terjadi pada *Bottom Plate* di *sidebearer* kiri menunjukkan bahwa bagian ini mengalami tegangan yang lebih rendah, karena sifat struktural yang lebih fleksibel atau beban yang terdistribusi lebih baik di sepanjang *Bottom Plate* dibandingkan *Top Plate*. Kombinasi beban vertikal dan transversal menciptakan kondisi di mana *Top Plate* menanggung lebih banyak stres daripada *Bottom Plate*.



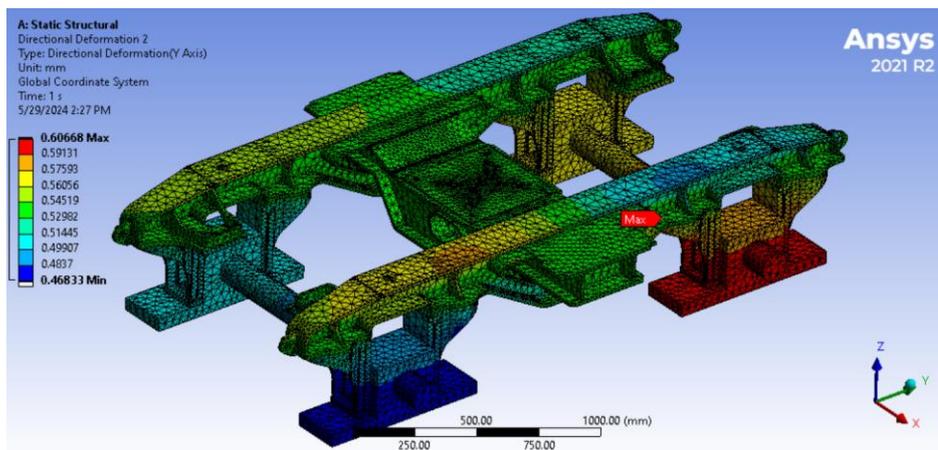
Gambar 4. 56 Directional Deformation Pada X-Axis



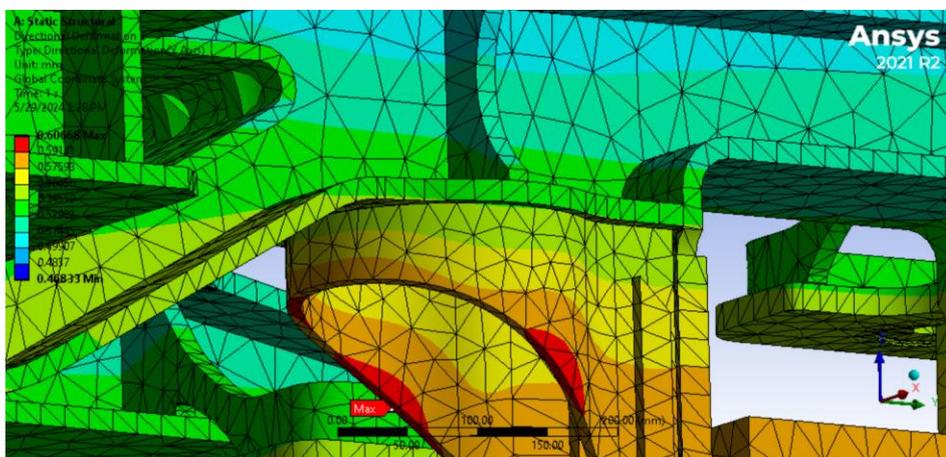
Gambar 4. 57 Titik Directional Deformation Pada X-Axis

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah sumbu *Y Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Spring Cup* sebelah depan kanan *bogie frame* sebesar 0,60668 mm selain itu juga terdapat searah *Y-Axis Directional Deformation* terkecil pada *Spring Cup* bagian belakang kanan *bogie frame* dengan nilai 0,46833 mm yang berarti mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, dalam situasi di mana kereta berbelok ke arah kanan dengan beban berat sebelah kanan, gaya sentrifugal dan beban vertikal yang tidak seimbang menghasilkan distribusi tekanan yang signifikan pada komponen di sisi kanan kereta. Pada *Y-Axis*, nilai deformasi maksimal yang terjadi pada *Spring Cup* di *sidebearer* kanan dikarenakan kombinasi dari beban vertikal yang lebih besar di sisi

kanan dan gaya transversal yang dihasilkan oleh belokan. Ketika kereta berbelok ke kanan, beban tambahan dari gaya sentrifugal dan distribusi beban yang berat sebelah kanan menyebabkan peningkatan tekanan pada komponen di sisi tersebut. *Spring Cup* di *sidebearer* kanan, yang dirancang untuk menyerap sebagian besar beban vertikal dan transversal, mengalami deformasi yang lebih besar karena menahan beban yang terdistribusi tidak merata. Peningkatan deformasi pada *Spring Cup* di *sidebearer* kanan terjadi karena komponen ini harus menahan kombinasi beban vertikal dari berat sebelah dan gaya transversal dari belokan, yang menciptakan kondisi tekanan maksimal pada titik tersebut.



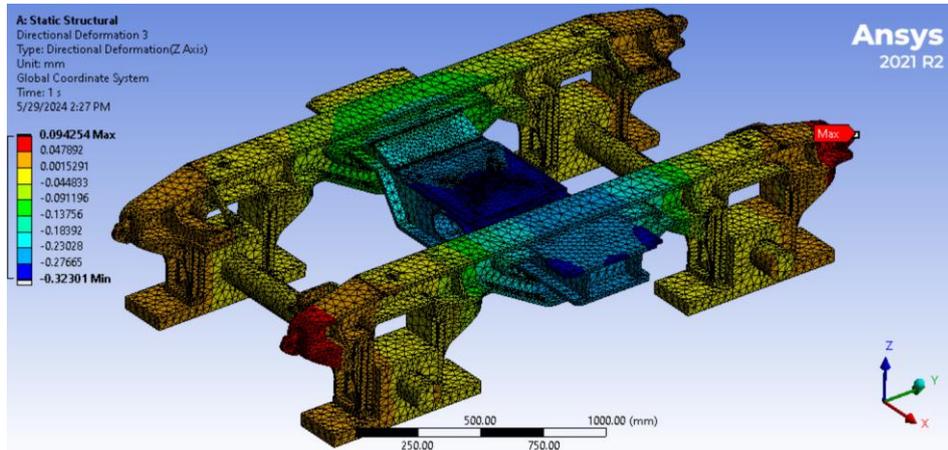
Gambar 4. 58 *Directional Deformation Pada Y-Axis*



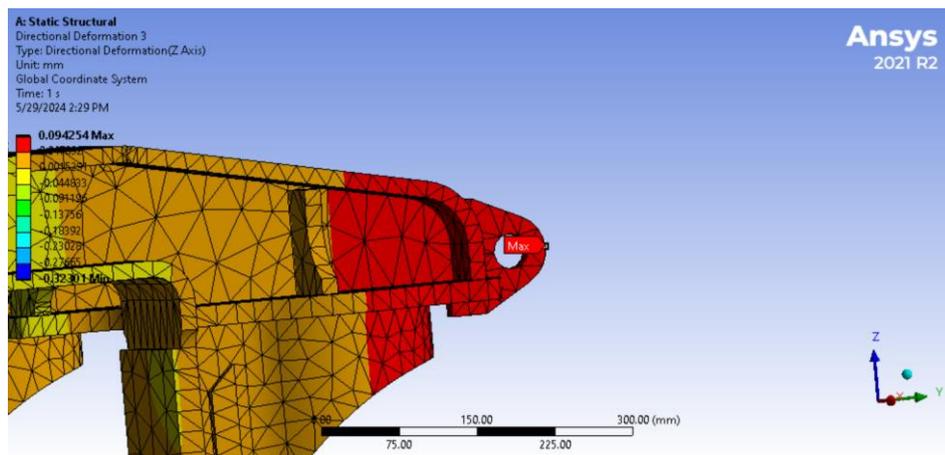
Gambar 4. 59 *Titik Directional Deformation Pada Y-Axis*

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Z-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah tengah transom *bogie frame* sebesar -0,32301 mm mengalami tegangan tekan atau *compressive stress*, selain itu juga terdapat searah *Z-Axis Directional Deformation* terkecil ada pada daerah *Hook* ujung depan kanan bagian *bogie frame* sebesar 0,094254 mm mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, deformasi maksimal pada *Z-Axis* di ujung *Hook sidebearer* kanan dan ujung

kanan transom terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah, gaya transversal saat belokan, dan konsentrasi beban pada titik-titik struktural kritis. Ujung *Hook sidebearer* kanan menerima tekanan intensif dari beban gabungan, sementara ujung kanan transom menahan beban tambahan dari distribusi berat yang tidak merata, menciptakan kondisi di mana deformasi maksimal terjadi pada kedua titik ini.



Gambar 4. 60 *Directional Deformation Pada Z-Axis*

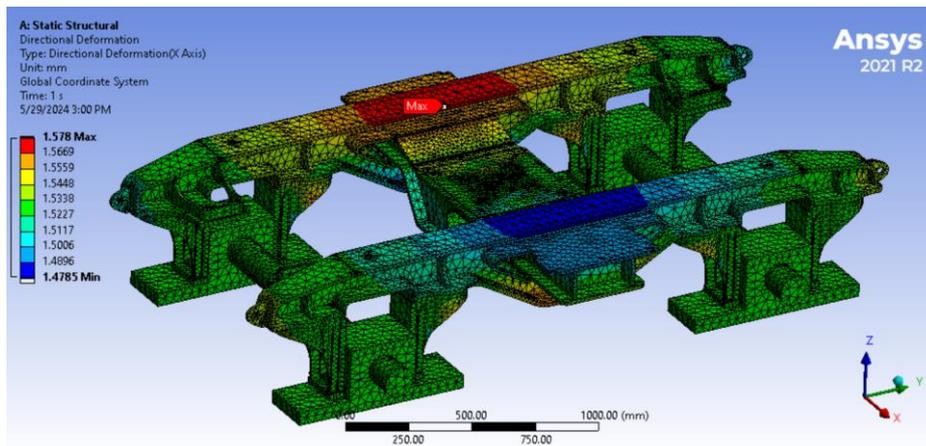


Gambar 4. 61 *Titik Directional Deformation Pada Z-Axis*

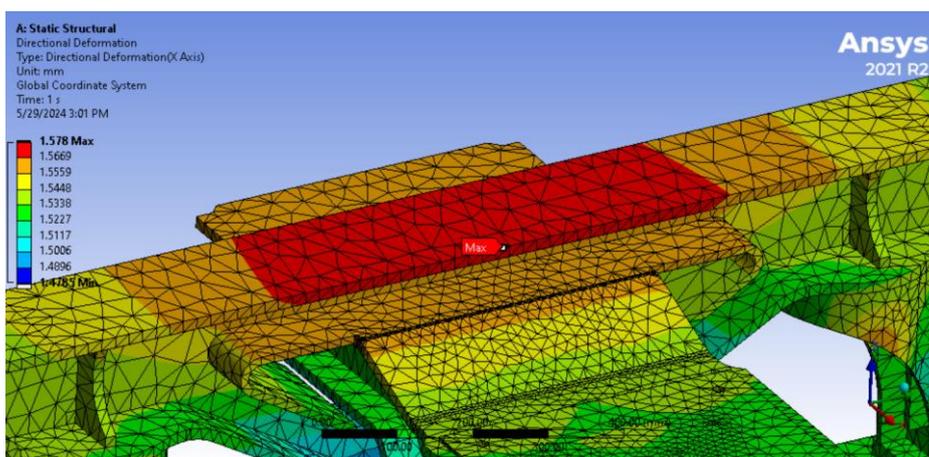
f. Simulasi *Directional Deformation* Pada *Load Case 6*

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *X-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Top Plate* sebelah kiri *bogie frame* sebesar 1,578 mm selain itu juga terdapat searah *X-Axis Directional Deformation* terkecil pada *Top Plate* sebelah kanan *bogie frame* dengan nilai 1,4785 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, Ketika beban vertikal terjadi di tengah transom dan kereta mengalami pengereman, distribusi beban dan gaya longitudinal yang dihasilkan mengubah distribusi deformasi pada struktur kereta. Pengereman menghasilkan gaya deselerasi yang signifikan, mempengaruhi komponen struktural, terutama

pada *X-Axis*. Pada *X-Axis*, nilai deformasi maksimal yang terjadi pada *Top Plate* kanan dan kiri pada *sidebearer* disebabkan oleh kombinasi beban vertikal dari pusat transom dan gaya longitudinal akibat pengereman. Ketika kereta mengerem, gaya deselerasi yang bekerja ke depan menimbulkan momen yang signifikan pada struktur kereta, terutama pada area yang menghubungkan transom dengan *sidebearer*. *Top Plate* pada *sidebearer* kanan dan kiri berfungsi sebagai komponen utama yang menahan beban longitudinal ini. Gaya longitudinal dari pengereman menimbulkan tekanan besar pada *top plate* karena bagian ini terletak di titik tumpu yang menerima beban dari seluruh struktur kereta. Kombinasi antara gaya vertikal dari beban tengah transom dan gaya longitudinal dari pengereman menyebabkan konsentrasi deformasi tinggi pada *Top Plate sidebearer*. *Top Plate* harus menahan gaya tarik yang dihasilkan oleh deselerasi, mengakibatkan deformasi maksimal pada kedua sisi (kanan dan kiri) karena gaya-gaya ini bekerja simetris pada kereta.



Gambar 4. 62 *Directional Deformation Pada X-Axis*

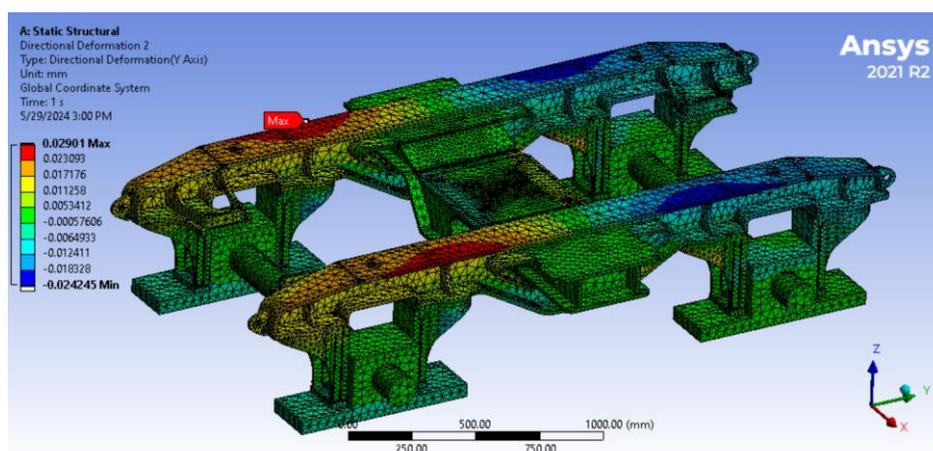


Gambar 4. 63 Titik *Directional Deformation Pada X-Axis*

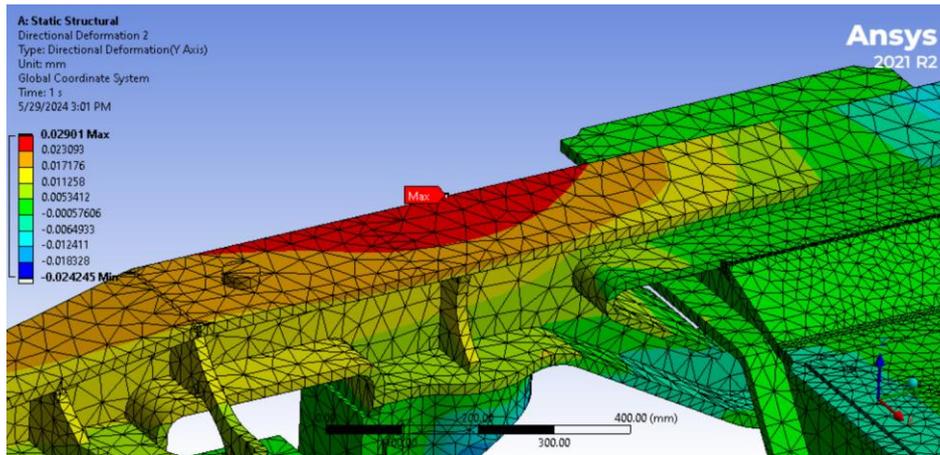
Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Y-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah *Top Plate*

bagian belakang kiri *bogie frame* sebesar 0,02901 mm selain itu juga terdapat searah *Y-Axis Directional Deformation* terkecil pada *Top Plate* bagian depan kiri *bogie frame* dengan nilai -0,024245 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, pengereman menghasilkan gaya deselerasi yang signifikan, mempengaruhi komponen struktural, terutama pada area yang berhubungan dengan *sidebearer*. Pada *Y-Axis*, nilai tegangan maksimal yang terjadi pada *Top Plate* bagian depan dan belakang, baik kanan maupun kiri pada *sidebearer*, disebabkan oleh kombinasi gaya vertikal dari beban yang terpusat di tengah transom dan gaya longitudinal akibat pengereman. Ketika kereta mengerem, gaya deselerasi ke depan menciptakan momen yang signifikan dan distribusi deformasi sepanjang *sidebearer*, terutama pada bagian top plate yang menghubungkan komponen vertikal dan longitudinal. *Top Plate* pada *sidebearer* depan dan belakang, kanan dan kiri, menahan kombinasi beban yang kompleks. Beban vertikal dari pusat transom menekan secara langsung ke bawah, sementara gaya longitudinal dari pengereman menyebabkan gaya tarik dan tekan sepanjang *Y-Axis*. Karena pengereman menciptakan gaya yang bekerja simetris di sepanjang sumbu longitudinal, tekanan ini didistribusikan ke seluruh area *Top Plate sidebearer*.

Bagian depan dan belakang *Top Plate* pada *sidebearer* kanan dan kiri menerima deformasi tinggi karena harus menahan gaya vertikal dan longitudinal secara bersamaan. Daerah ini menjadi titik kritis karena interaksi gaya-gaya tersebut menghasilkan momen yang besar pada titik-titik ini. Tekanan akibat gaya longitudinal yang dihasilkan oleh pengereman menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata, dengan konsentrasi deformasi tinggi pada bagian depan dan belakang *Top Plate*.

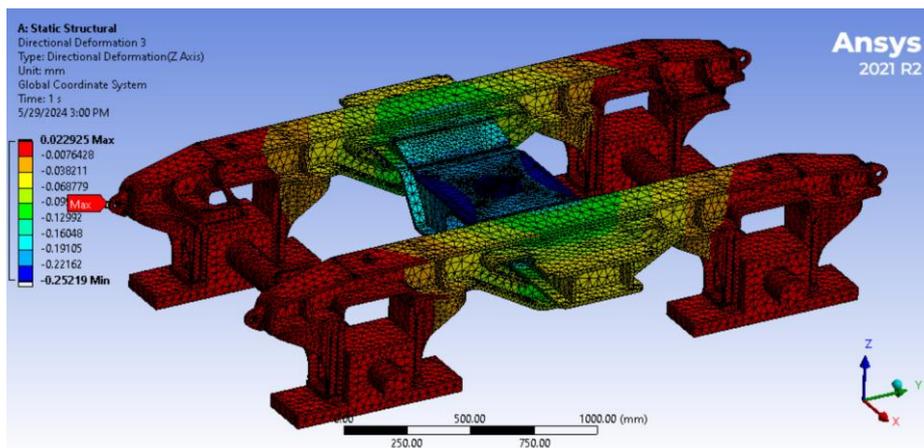


Gambar 4. 64 *Directional Deformation* Pada *Y-Axis*

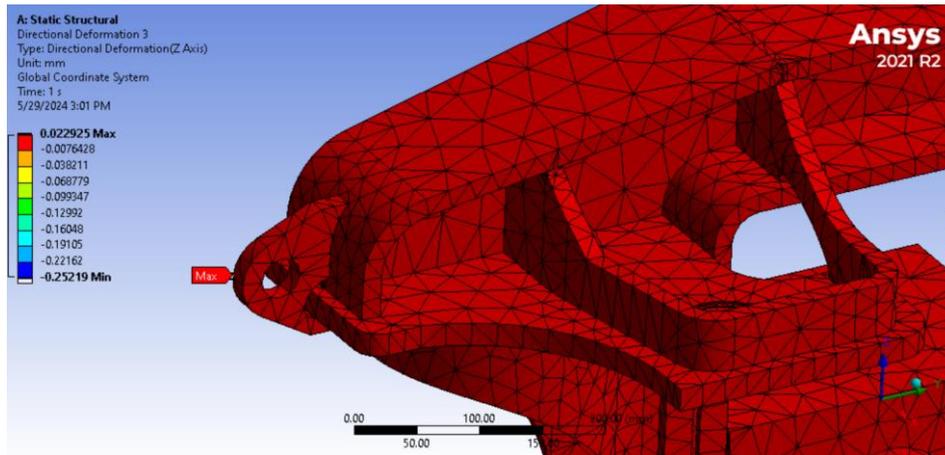


Gambar 4. 65 Titik *Directional Deformation* Pada *Y-Axis*

Hasil simulasi pembebanan *static structural* pada *bogie frame* kereta, area yang mengalami deformasi pada searah *Z-Axis Directional Deformation* terbesar ada pada daerah tengah transom *bogie frame* sebesar -0,25219 mm mengalami tegangan tekan atau *compressive stress*, selain itu juga terdapat searah *Z-Axis Directional Deformation* terkecil ada pada daerah *Hook* ujung belakang kiri bagian *bogie frame* sebesar 0,022925 mm yang berarti komponen mengalami tegangan tarik atau *tensile stress*, deformasi maksimal pada *Z-Axis* di ujung-ujung *Hook* dan area tengah transom terjadi karena interaksi antara beban vertikal dari pusat transom dan gaya longitudinal dari pengereman. Ujung-ujung *Hook* menahan kombinasi gaya tarik, sedangkan area tengah transom menahan tekanan besar dari beban vertikal dan gaya longitudinal yang bekerja bersama-sama, menyebabkan konsentrasi deformasi tinggi pada kedua area tersebut



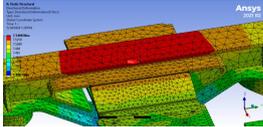
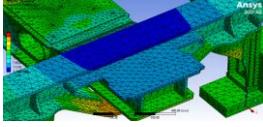
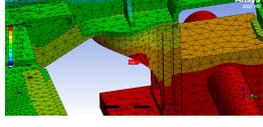
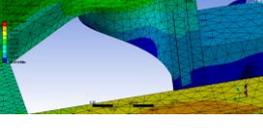
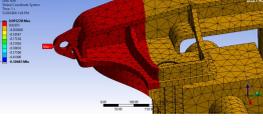
Gambar 4. 66 *Directional Deformation* Pada *Z-Axis*

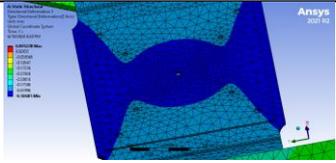
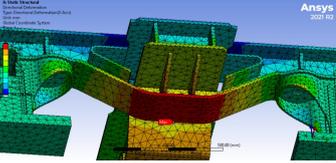
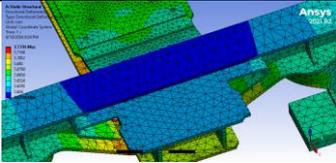
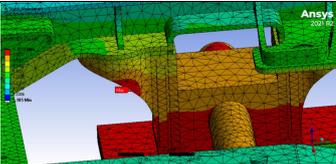
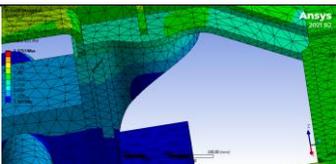
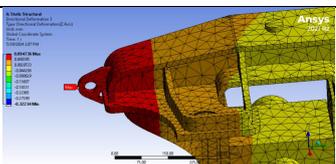
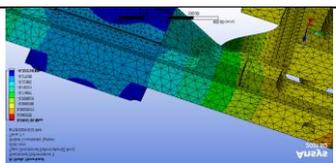
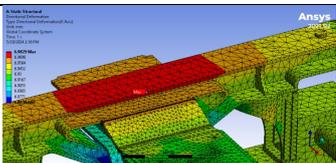
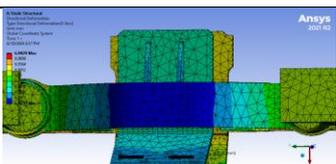
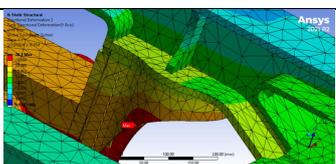


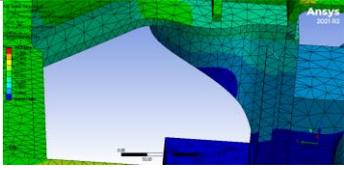
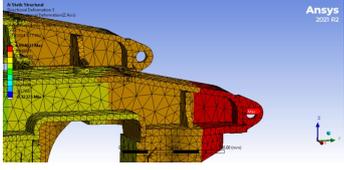
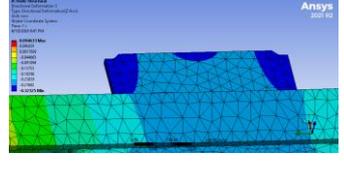
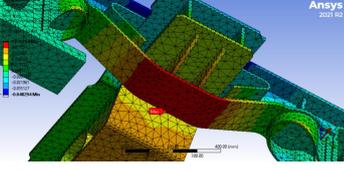
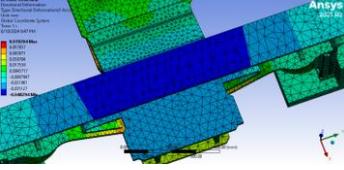
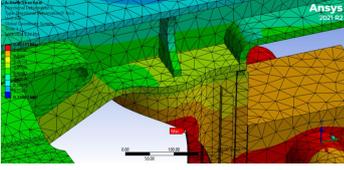
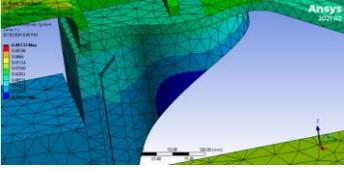
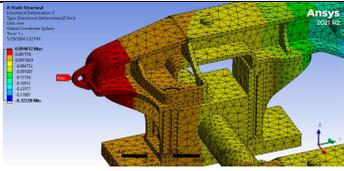
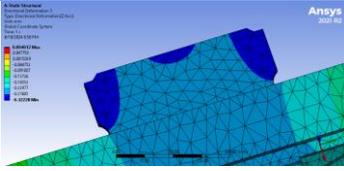
Gambar 4. 67 Titik *Directional Deformation* Pada Z-Axis

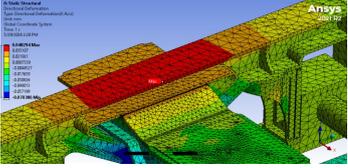
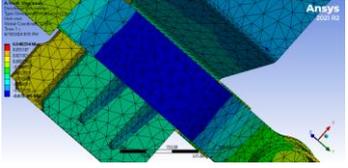
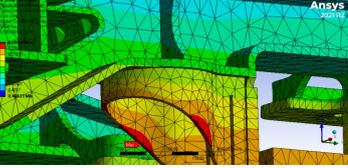
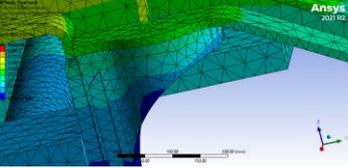
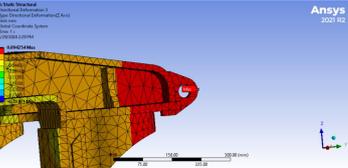
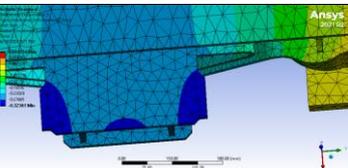
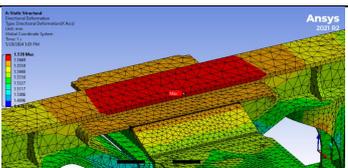
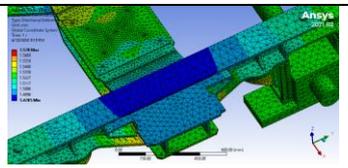
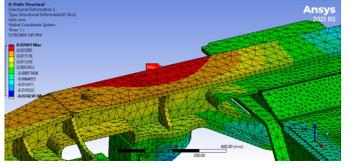
Hasil simulasi *static structural* dari *bogie frame* kereta api telah disajikan dalam tabel 4.12 yang merangkum *directional deformation* maksimal pada beberapa *load case* yang diujikan. Untuk menghindari deformasi yang menyebabkan perubahan geometri atau patah perlu dilakukan modifikasi dari bentuk geometri, penambahan *stiffener* atau dengan melakukan penggantian plat yang lebih tebal.

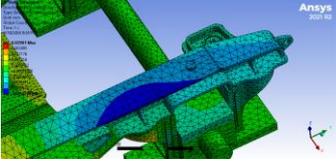
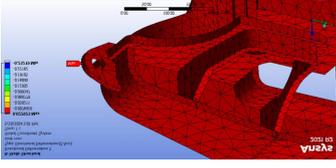
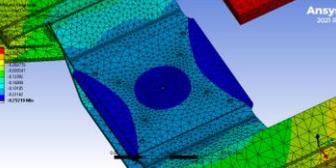
Tabel 4. 13 Hasil Rangkuman Nilai Deformasi

No.	Kondisi <i>Load Case</i>	Arah Sumbu	Daerah Deformasi Maksimum	Nilai Deformasi
1	<i>Load Case 1</i>	Sumbu X (mm)		7,5468 mm
				7,3583 mm
		Sumbu Y (mm)		10,555 mm
				10,414 mm
		Sumbu Z (mm)		0,095228 mm

				-0,50685 mm
2	<i>Load Case 2</i>	Sumbu X (mm)		3,7316 mm
				3,6128 mm
		Sumbu Y (mm)		5,3253 mm
				5,185 mm
		Sumbu Z (mm)		0,094736 mm
				-0,32234 mm
3	<i>Load Case 3</i>	Sumbu X (mm)		6,9829 mm
				6,8639 mm
		Sumbu Y (mm)		10,1 mm

4	Load Case 4	Sumbu Z (mm)		9,9593 mm
				0,094633 mm
				-0,32325 mm
		Sumbu X (mm)		0,070204 mm
				-0,48294 mm
		Sumbu Y (mm)		0,49733 mm
	0,35907 mm			
Sumbu Z (mm)		0,094012 mm		
		-0,32228 mm		

5	<i>Load Case 5</i>	Sumbu X (mm)		0,048294 mm
				-0,70386 mm
		Sumbu Y (mm)		0,60668 mm
				0,46833 mm
		Sumbu Z (mm)		0,094254 mm
				-0,32301 mm
6	<i>Load Case 6</i>	Sumbu X (mm)		1,578 mm
				1,4785 mm
		Sumbu Y (mm)		0,02901

				-0,024245 mm
		Sumbu Z (mm)		0,022925
				-0,25219 mm

Tabel 4. 14 Ringkasan Keterangan Hasil

No.	Load Case	Arah Sumbu	Keterangan Hasil
1	1	Sumbu X	Deformasi pada <i>X-Axis</i> terjadi di top plate sebelah kanan dan kiri dari <i>sidebearer</i> , meskipun beban vertikal diterapkan pada tengah transom, terjadi karena distribusi gaya dan momen yang dihasilkan oleh beban tersebut. Beban vertikal pada tengah transom menciptakan momen lentur yang menyebabkan gaya tarik di kedua sisi transom. Gaya ini diteruskan ke top plate dari <i>sidebearer</i> , memaksa komponen ini menahan gaya lateral pada <i>X-Axis</i> . Reaksi pada sambungan antara transom dan <i>sidebearer</i> menambah konsentrasi tegangan di area tersebut.
		Sumbu Y	Terjadi karena distribusi gaya dan interaksi struktural kompleks dalam bogie kereta. Ketika beban vertikal diterapkan di tengah transom, beban ini menyebabkan momen lentur yang menghasilkan gaya tarik di seluruh struktur, termasuk Spring Cup. Spring Cup dirancang untuk menahan gaya vertikal dari pegas suspensi, tetapi momen lentur dan distribusi beban menyebabkan gaya lateral yang signifikan di sepanjang <i>Y-axis</i> .
		Sumbu Z	Tegangan positif (+) di ujung Hook karena mereka menahan gaya tarik yang dihasilkan oleh momen lentur. Sebaliknya, di

			tengah transom terjadi deformasi negatif (-) karena area tersebut menahan gaya tekan. Desain struktural dan kekakuan material memastikan bahwa beban vertikal menyebabkan distribusi gaya yang menciptakan momen lentur, menghasilkan tegangan tarik di ujung Hook dan tegangan tekan di tengah transom.
2	2	Sumbu X	Deformasi maksimal warna merah terjadi pada <i>Bottom Plate</i> karena beban berat sebelah menyebabkan momen lentur dan gaya tarik yang besar di area tersebut, terutama karena <i>Bottom Plate</i> langsung menahan sebagian besar beban vertikal dan lateral. Sementara itu, deformasi maksimal warna biru terjadi pada <i>Top Plate sidebearer</i> sebelah kanan karena area ini mengalami gaya tekan yang lebih kecil sebagai reaksi terhadap distribusi beban yang tidak merata. Beban berat sebelah menciptakan momen lentur dan torsi yang menghasilkan gaya tarik pada <i>Bottom Plate</i> dan gaya tekan pada <i>Top Plate</i> , menyebabkan perbedaan tegangan yang signifikan di antara kedua komponen tersebut.
		Sumbu Y	Deformasi maksimal pada <i>Y-axle</i> di <i>Spring Cup</i> depan dan belakang di <i>sidebearer</i> sebelah kiri. <i>Spring Cup</i> dirancang untuk menahan gaya dari pegas suspensi, dan beban berat sebelah meningkatkan gaya lateral di <i>sidebearer</i> sebelah kiri. Akibatnya, <i>Spring Cup</i> menanggung beban lateral lebih besar, menghasilkan deformasi tinggi pada <i>Y-axle</i> . Kombinasi distribusi beban yang tidak merata dan reaksi struktural menyebabkan konsentrasi deformasi di area tersebut.
		Sumbu Z	Beban berat sebelah menyebabkan momen lentur yang signifikan pada transom, menghasilkan gaya tarik di ujung <i>Hook</i> sebelah kiri dan gaya tekan di tengah transom. Deformasi positif (+) pada ujung <i>Hook</i> sebelah kiri terjadi karena gaya tarik yang dihasilkan oleh momen lentur, yang mencoba menarik <i>Hook</i> ke arah luar. Sebaliknya, deformasi negatif (-) di ujung kiri transom

			terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah dan gaya tekan yang mencoba mendorong area ini ke dalam.
3	3	Sumbu X	Deformasi maksimal warna merah terjadi pada <i>Top Plate</i> karena beban berat sebelah menyebabkan momen lentur dan gaya tarik yang besar di area tersebut, terutama karena <i>Top Plate</i> langsung menahan sebagian besar beban vertikal dan lateral. Sementara itu, deformasi maksimal warna biru terjadi pada <i>Bottom Plate sidebearer</i> sebelah kiri karena area ini mengalami gaya tekan yang lebih kecil sebagai reaksi terhadap distribusi beban yang tidak merata. Beban berat sebelah menciptakan momen lentur dan torsi yang menghasilkan gaya tarik pada <i>Top Plate</i> dan gaya tekan pada <i>Bottom Plate</i> .
		Sumbu Y	Distribusi gaya yang tidak merata, menghasilkan momen lentur dan torsi yang signifikan. Menyebabkan deformasi maksimal pada <i>Y-Axis</i> di <i>Spring Cup</i> depan dan belakang di <i>sidebearer</i> sebelah kanan. <i>Spring Cup</i> dirancang untuk menahan gaya dari pegas suspensi, dan beban berat sebelah meningkatkan gaya lateral di <i>sidebearer</i> sebelah kanan. Akibatnya, <i>Spring Cup</i> menanggung beban lateral lebih besar.
		Sumbu Z	Deformasi positif (+) pada ujung <i>Hook</i> sebelah kanan terjadi karena gaya tarik yang dihasilkan oleh momen lentur, yang mencoba menarik <i>Hook</i> ke arah luar. Sebaliknya, deformasi negatif (-) di ujung kanan transom terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah dan gaya tekan yang mencoba mendorong area ini ke dalam.
4	4	Sumbu X	Deformasi maksimal warna merah yang terjadi pada <i>Bottom Plate</i> di <i>sidebearer</i> kanan dapat dijelaskan oleh efek puntir dan distribusi beban yang tidak simetris. Ketika kendaraan berbelok, gaya sentrifugal menambah beban pada komponen di sisi luar (kanan) karena momen puntir yang dihasilkan. Ini menyebabkan <i>Bottom Plate</i> bagian kanan <i>sidebearer</i> mengalami deformasi tinggi karena menahan sebagian besar beban transversal dan

			<p>vertikal yang terdistribusi secara asimetris. Sebaliknya, deformasi maksimal warna biru yang terjadi pada <i>Top Plate</i> di <i>sidebearer</i> kanan menunjukkan bahwa bagian ini mengalami deformasi yang lebih rendah, karena sifat struktural yang lebih fleksibel atau beban yang terdistribusi lebih baik di sepanjang <i>top plate</i> dibandingkan <i>Bottom Plate</i>.</p>
		Sumbu Y	<p>Deformasi maksimal yang terjadi pada <i>Spring Cup</i> di <i>sidebearer</i> kiri dikarenakan kombinasi dari beban vertikal yang lebih besar di sisi kiri dan gaya transversal yang dihasilkan oleh belokan. Ketika kereta berbelok ke kiri, beban tambahan dari gaya sentrifugal dan distribusi beban yang berat sebelah kiri menyebabkan peningkatan tekanan pada komponen di sisi tersebut.</p>
		Sumbu Z	<p>Terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah, gaya transversal saat belokan, dan konsentrasi beban pada titik-titik struktural kritis. Ujung <i>Hook sidebearer</i> kiri menerima tekanan intensif dari beban gabungan, sementara ujung kiri transom menahan beban tambahan dari distribusi berat yang tidak merata, menciptakan kondisi di mana deformasi maksimal terjadi pada kedua titik ini.</p>
5	5	Sumbu X	<p>Deformasi maksimal warna merah yang terjadi pada <i>Top Plate</i> di <i>sidebearer</i> kiri dapat dijelaskan oleh efek puntir dan distribusi beban yang tidak simetris. Ketika kendaraan berbelok, gaya sentrifugal menambah beban pada komponen di sisi luar (kiri) karena momen puntir yang dihasilkan. Ini menyebabkan <i>Top Plate</i> bagian kiri <i>sidebearer</i> mengalami deformasi tinggi karena menahan sebagian besar beban transversal dan vertikal yang terdistribusi secara asimetris. Sebaliknya, deformasi maksimal warna biru yang terjadi pada <i>Bottom Plate</i> di <i>sidebearer</i> kiri menunjukkan bahwa bagian ini mengalami tegangan yang lebih rendah, karena sifat struktural yang lebih fleksibel atau beban</p>

			yang terdistribusi lebih baik di sepanjang <i>Bottom Plate</i> dibandingkan <i>Top Plate</i> .
		Sumbu Y	Deformasi maksimal yang terjadi pada <i>Spring Cup</i> di <i>sidebearer</i> kanan dikarenakan kombinasi dari beban vertikal yang lebih besar di sisi kanan dan gaya transversal yang dihasilkan oleh belokan. Ketika kereta berbelok ke kanan, beban tambahan dari gaya sentrifugal dan distribusi beban yang berat sebelah kanan menyebabkan peningkatan tekanan pada komponen di sisi tersebut.
		Sumbu Z	Terjadi karena interaksi antara beban vertikal yang berat sebelah, gaya transversal saat belokan, dan konsentrasi beban pada titik-titik struktural kritis. Ujung <i>Hook sidebearer</i> kanan menerima tekanan intensif dari beban gabungan, sementara ujung kanan transom menahan beban tambahan dari distribusi berat yang tidak merata, menciptakan kondisi di mana deformasi maksimal terjadi pada kedua titik ini.
6	6	Sumbu X	Gaya longitudinal dari pengereman menimbulkan tekanan besar pada <i>top plate</i> karena bagian ini terletak di titik tumpu yang menerima beban dari seluruh struktur kereta. Kombinasi antara gaya vertikal dari beban tengah transom dan gaya longitudinal dari pengereman menyebabkan konsentrasi deformasi tinggi pada <i>Top Plate sidebearer</i> . <i>Top Plate</i> harus menahan gaya tarik yang dihasilkan oleh deselerasi, mengakibatkan deformasi maksimal pada kedua sisi (kanan dan kiri).
		Sumbu Y	Tegangan maksimal yang terjadi pada <i>Top Plate</i> bagian depan dan belakang, baik kanan maupun kiri pada <i>sidebearer</i> , disebabkan oleh kombinasi gaya vertikal dari beban yang terpusat di tengah transom dan gaya longitudinal akibat pengereman. Ketika kereta mengerem, gaya deselerasi ke depan menciptakan momen yang signifikan dan distribusi deformasi sepanjang <i>sidebearer</i> , terutama pada bagian top plate yang menghubungkan komponen vertikal dan longitudinal. Beban

			<p>vertikal dari pusat transom menekan secara langsung ke bawah, sementara gaya longitudinal dari pengereman menyebabkan gaya tarik dan tekan sepanjang <i>Y-Axis</i>. Karena pengereman menciptakan gaya yang bekerja simetris di sepanjang sumbu longitudinal, tekanan ini didistribusikan ke seluruh area <i>Top Plate sidebearer</i>.</p>
		Sumbu Z	<p>Deformasi maksimal pada <i>Z-Axis</i> di ujung-ujung <i>Hook</i> dan area tengah transom terjadi karena interaksi antara beban vertikal dari pusat transom dan gaya longitudinal dari pengereman. Ujung-ujung <i>Hook</i> menahan kombinasi gaya tarik, sedangkan area tengah transom menahan tekanan besar dari beban vertikal dan gaya longitudinal yang bekerja bersama-sama, menyebabkan konsentrasi deformasi tinggi pada kedua area tersebut.</p>

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan software ANSYS dengan percobaan 6 load case pada frame bogie kereta api flat wagon, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil simulasi pembebanan pada 6 *load case* dengan beban eksepsional, menunjukkan bahwa *bogie frame* kereta memiliki kemampuan yang kuat untuk menahan beban penuh atau beban eksepsional yang bekerja pada *bogie frame*. Tegangan maksimal *principal* dan tegangan deformasi yang terjadi pada *bogie frame* masih jauh di bawah batas *yield stress* dari material yang digunakan. Hal ini membuktikan bahwa bogie frame aman dan layak untuk dioperasikan dalam kondisi beban penuh atau beban eksepsional tanpa mengalami kegagalan struktural. Material yang digunakan dalam pembuatan bogie frame memiliki keamanan yang memadai untuk menjamin kekuatannya saat menerima beban maksimum. Dengan demikian, bogie frame kereta memiliki kemampuan yang kuat dan aman untuk menopang beban penuh yang bekerja pada frame bogie.
2. Pada analisis simulasi menggunakan *principal stress* dengan berbagai *load case*, tegangan maksimal terbesar terjadi pada *load case* 1 yaitu 77,214 MPa di daerah di bawah lekukan transom dalam kondisi kereta menerima full load saja dan dalam kondisi diam atau dengan kondisi kereta berjalan tetapi dalam kecepatan tetap/gaya normal. Sedangkan untuk deformasi maksimal terbesar terjadi pada load case 1, 2, dan 3 yaitu terjadi *critical area* pada daerah bagian Top Plate, Spring Cup, dan ujung Hook, karena pada daerah-daerah tersebut terkena beban atau reaksi dari gaya yang diberikan. Oleh karena itu, perhatian khusus perlu diberikan pada daerah yang mengalami area kritis.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis yang telah dijabarkan pada bab sebelumnya, berikut ini adalah beberapa rekomendasi yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut.

1. Memperbanyak percobaan dengan kondisi atau *load case* tertentu untuk simulasi ketahanan struktur *bogie frame* pada kereta api.

2. Untuk pengujian berikutnya dapat melakukan redesain pada bagian bogie yang terkena area critical yang mengalami tegangan principal dan deformasi yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- 13749, S. E. (2011). *BSI Standards Publication Railway applications — Wheelsets and bogies — Product requirements for cast wheels*.
- Abe, M. (2015). Vehicle Dynamics and Control. In *Vehicle Handling Dynamics*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100390-9.00001-4>
- Bian, X., Jiang, H., Chang, C., Hu, J., & Chen, Y. (2015). Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 76, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.02.009>
- Dižo, J., Blatnický, M., Harušinec, J., & Falendysh, A. (2019). Modification and analyses of structural properties of a goods wagon bogie frame. *Diagnostyka*, 20(1), 41–48. <https://doi.org/10.29354/diag/99853>
- Dizo, J., Blatnický, M., Harusinec, J., Pavlik, A., & Smetanka, L. (2018). Strength analysis of a freight bogie frame under the defined load cases. *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, 20(4), 58–62. <https://doi.org/10.26552/com.c.2018.4.58-62>
- Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201713400010>
- Hutagalung, S. H., Wibowo, D. B., Haryanto, I., Jurusan, M., Mesin, T., Teknik, F., Diponegoro, U., Jurusan, D., Mesin, T., Teknik, F., & Diponegoro, U. (2021). Perencanaan Awal Software Untuk Menghasilkan Gradasi Warna Validasi Dengan Software Meh Studi Kasus Pelat Datar Tipis. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(1), 115–132.
- Kondo, O., & Yamazaki, Y. (2013). Simulation Technology for Railway Vehicle Dynamics. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 105, 77–83.
- Prasojo, A. B., & Kaelani, Y. (2016). Analisa Beban Kerja Dan Gaya Dinamis Pada Round Roller Dan Sliding Roller Untuk Sistem CVT (Continuously Variable Transmission) Sepeda Motor Matic. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.20781>
- R.C.Hibbeler. (2016). Engineering Mechanics: Dynamics 14th Edition. In *Pearson*.
- Salimi, A. A. (2023). Simulasi Finite Element Analysis (FEA) dan Fabrikasi Implan Untuk Perbandingan Kinerja Implan Kovensional dan Custom Cruciate Retaining (CR) untuk Penderita Osteoaryhristis berdasarkan Rekonstruksi data MRI/CT Scan Tulang Lutut.

Mesin, Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Indonesia, Universitas Islam.

- Slavchev, S., Maznichki, V., Stoilov, V., & Purgic, S. (2017). Comparative analysis of the results from static strength calculations and strength tests of an Y25Ls-K bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 133, 4–7. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201713303004>
- Supriyana, N., & Kholidin, A. (2016). Analisa Tegangan Poros Roda Gerbong Kereta Api Dengan Metode Elemen Hingga. *Simetris : Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, 7(2), 681. <https://doi.org/10.24176/simet.v7i2.781>
- Zhai, W., Han, Z., Chen, Z., Ling, L., & Zhu, S. (2019). Train–track–bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *Vehicle System Dynamics*, 57(7), 984–1027. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1605085>

LAMPIRAN

A. Standar yang dipakai

BS EN 13749:2011



Railway applications — Wheelsets and bogies — Method of specifying the structural requirements of bogie frames

NO COPYING WITHOUT BSI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW

raising standards worldwide[™]
Copyright British Standards Institution
Provided by IHS under license with BSI - Uncontrolled Copy
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale



3.5

quasi-static force

force, which changes with time at a rate which does not cause dynamic excitation

NOTE Quasi-static force might remain constant for limited periods.

3.6

dynamic force

transient, impulsive or continuous force, uniform or random, that changes with time at a rate that causes dynamic excitation

3.7

load case

set of loads or combinations of loads that represents a loading condition to which the structure or component is subjected.

3.8

exceptional load case

extreme load case representing the maximum load at which full serviceability is to be maintained and used for assessment against static material properties

3.9

fatigue load case

repetitive load case used for assessment against fatigue strength

3.10

safety factor

factor applied during the strength assessment which makes an allowance for a combination of the uncertainties and the safety criticality

3.11

sideframe

longitudinal structural member of the bogie frame

3.12

primary suspension

suspension system consisting of the resilient elements (and associated connecting and locating parts) generally located between the axlebox and bogie frame

A.6 Bogie classification

This European Standard covers a wide variety of different bogie types. For reference purposes it is convenient to categorise them in the following informative annexes. Although identified generally in terms of vehicle types, the selection of the category for a bogie should also take into account the structural requirements of the bogie frame.

The structural requirements for bogies in a particular category are not unique and should always be defined according to the operating requirements. There will be differences in choice between applications. This is to be expected and should not be considered as conflicting with this European Standard. Some bogies may not fit into any of the defined categories.

category B-I bogies for main line and inter-city passenger carrying rolling stock including high speed and very high speed vehicles, powered and un-powered;

category B-II bogies for inner and outer suburban passenger carrying vehicles, powered and un-powered;

category B-III bogies for metro and rapid transit rolling stock, powered and un-powered;

category B-IV bogies for light rail vehicles and trams;

category B-V bogies for freight rolling stock with single-stage suspensions;

category B-VI bogies for freight rolling stock with two-stage suspensions;

category B-VII bogies for locomotives.

C.3 Examples of loads for freight bogies with a central pivot and two sidebearers - category B-V

C.3.1 Bogie types

The load cases below are specified for 2-axle bogies. For a 3-axle bogies the same global loads generally apply. Traditionally the vertical loads have been distributed equally on all three axles and the transverse and longitudinal loads distributed with 37,5 % on the outer axles and 25 % on the central axle. Where it is necessary to change the global loads for a 3-axle bogie this is indicated in the text. However, it should be noted that for modern bogie designs these loads and distributions may not be appropriate.

C.3.2 Relationship of vertical forces

F_z is the total vertical load supported by the bogie;

F_{zp} is the vertical force applied to the pivot;

F_{z1} , F_{z2} is the vertical forces applied to each sidebearer.

where F_{z1} and F_{z2} are obtained by the multiplication of F_z by a coefficient α , representing the effect of roll. When a force $F_z \alpha$ is applied to one sidebearer, the applied force to the pivot is reduced to $F_z (1 - \alpha)$.

C.3.3 Exceptional loads

Vertical forces (two main cases are considered):

Case 1 - The case where the force is applied only to the pivot:

$$F_{zp\max} = 2F_z \quad (\text{using load factor} = 2) \quad (\text{C.7})$$

Case 2 - The (roll) case where the force is applied to both the pivot and one sidebearer:

$$F_{z1\max} \text{ (or } F_{z2\max}) = 1,5 \times F_z \alpha \quad (\text{C.8})$$

$$F_{zp\max} = 1,5 \times F_z (1 - \alpha) \quad (\text{using load factor} = 1,5) \quad (\text{C.9})$$

where α depends on the service and the distance between the centrelines of the sidebearers. For UIC service with a distance between the sidebearers of 1,7m, α is taken as 0,3. If the spacing between sidebearers ($2b_g$) differs from 1,7m then $\alpha = 0,3 \times \left(\frac{1,7}{2b_g} \right)$.

Transverse forces (applied to each axle):

$$F_{y1\max} = F_{y2\max} = \frac{F_{y\max}}{2} = 10^4 + \frac{F_z + m^*g}{6} \quad (\text{i.e. Prud'homme limit}) \quad (\text{C.10})$$

The total force $F_{y\max}$ should be increased to $\frac{8}{3} \left(10^4 + \frac{F_z + m^*g}{6} \right)$ for 3-axle bogies (based on running trials of Type 714 freight bogies). For other types of bogie the load distribution recorded during running trials of a similar type should be used or loads determined from simulations,

Longitudinal lozenging forces (applied to each wheel and in the opposite sense on the opposite sides of the bogie frame):

$$F_{x1\max} = 0,1 \times (F_z + m^*g) \quad (\text{C.11})$$

3.11**full size test**

test on the structure of interest with the test specimen formed from all relevant full size components

3.12**locomotive**

self-propelled vehicle with an operational driving cab at both ends (or single cab for operation in both directions), the function of which is only to provide motive power for a rake of vehicles, and which is designed to operate in general traffic and not as a permanent part of a fixed configuration train unit

3.13**net contact force**

difference between the longitudinal forces acting on opposite ends of the vehicle (i.e. the algebraic sum of the longitudinal force) at any instant of time

3.14**normal European operating conditions**

operating conditions comparable to those described by the documents listed in the bibliography

3.15**operator**

organisation which has responsibility for defining the technical requirements for the railway vehicle in order that it will perform the intended operation and meet the acceptance criteria

3.16**passive safety**

systems which reduce the consequences of an accident should it occur

3.17**plastic deformation/permanent deformation**

deformation associated with stresses above the material yield or proof stress and which is not recoverable when the load is removed

3.18**power head**

self-propelled vehicle with an operational driving cab at one end only, the function of which is only to provide motive power for a rake of vehicles, and which is designed to operate in general traffic and not as a permanent part of a fixed configuration train unit

3.19**reference train**

train configuration that is used for the assessment and validation of vehicles (including locomotives, power heads and driving trailers) that do not form part of a fixed rake

B. Material

Grade S355J2+N



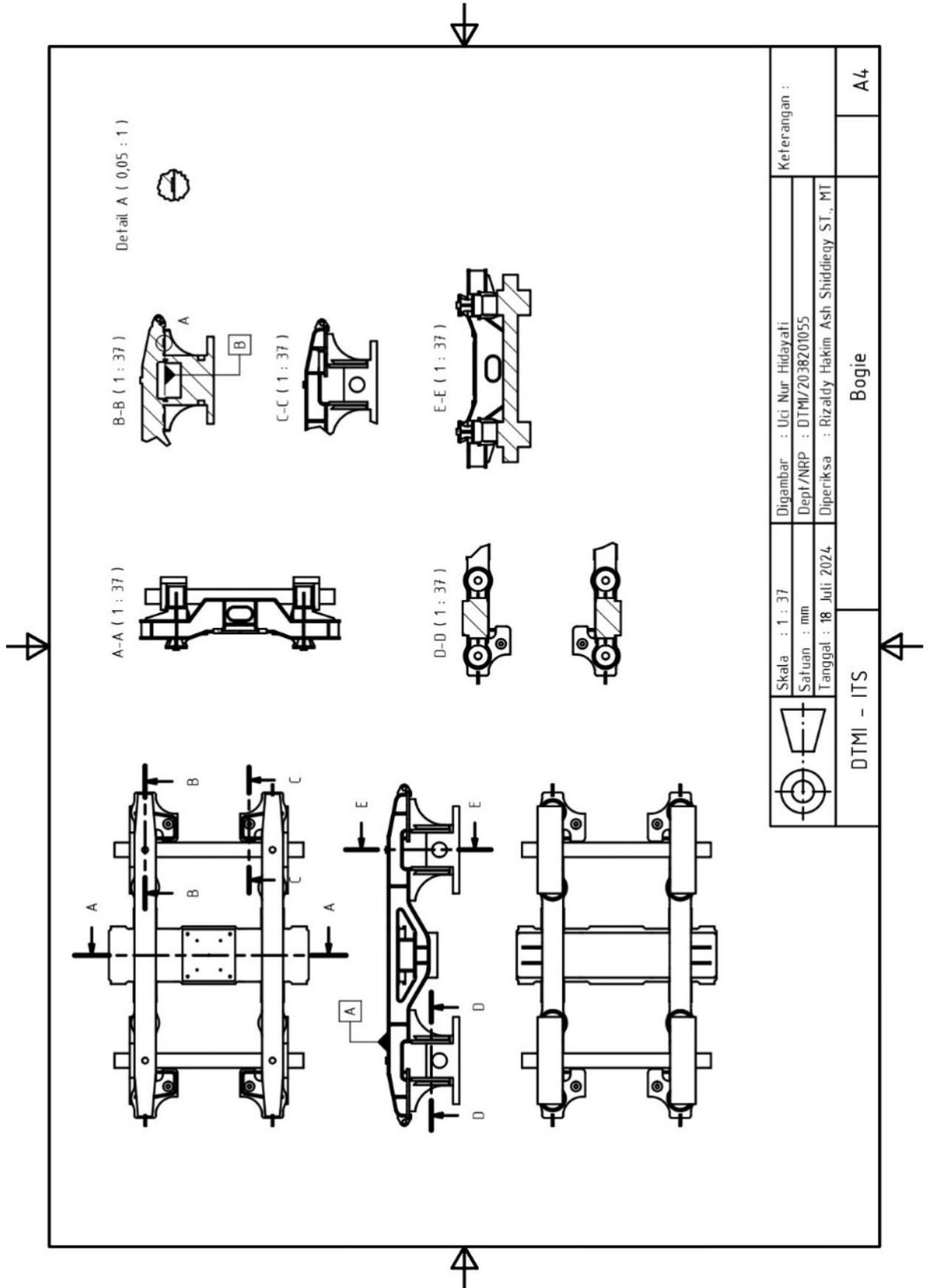
Malthouse Engineering Co. Ltd

Grade	Size range (MM)	NOTES	Carbon Content	Strength at to 16mm (MPa)	Longitudinal Charpy V-notch	Mechanical Properties	Chemical Composition												
							Min Yield (Reh)	Tensile (Rm)	Temp	Energy (J) T= 16mm	Plate Thickness (mm)	Minimum yield strength Reh MPa	Tensile Strength Rm (min/ max) N/ mm ²	Yield strength Re (min) N/ mm ²	Elongation A (Min)	Carbon Max	Manganese	Silicon	Phosphorus
S355J2+N (S30)	6-400	High Yield Steel with impact tests to -20 degrees Celsius	0.20% max up to ≤16mm	355	470/630	-20	27	≤16	355	490/640	355	20	0.18	/1.50	0.10 /0.50	0.040	0.040	0.00 /0.10	0.003/0.10
								>16-40	345		345								
								>40-63	335		340								
								>63-100	325		325								

Source: British Standards Institute.

For more information visit www.MalthouseEngineering.com or for a quote on Steel Profiling, Lumsden Grinding or Fabrication call 0121 557 8455

C. Drawing 2D Bogie Kereta



	Skala : 1 : 37	Digambar : Uci Nur Hidayati	Keterangan :
	Satuan : mm	Dept/NRP : DTMI/2038201055	
	Tanggal : 18 Juli 2024	Diperiksa : Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy ST., MT	
DTMI - ITS		Bogie	A4

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis, Uci Nur Hidayati merupakan anak keempat dari lima bersaudara. Lahir pada tanggal 12 Desember 2001 di Gresik, Jawa Timur. Penulis memulai pendidikannya di MI Masyhudiyah (2008-2014). Kemudian melanjutkan Pendidikan di MTs Masyhudiyah (2014-2017), dan SMKN 1 Cerme Gresik (2017-2020). Setelah menyelesaikan Pendidikan SMK pada tahun 2020, penulis melanjutkan Pendidikan ke tahap perguruan tinggi di D4 Teknik Mesin Industri ITS pada tahun 2020. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2038201055 mengikuti Prodi Teknik Rekayasa Manufaktur.

Selama kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan akademik maupun non-akademik. Penulis aktif dan bergabung dalam organisasi kemahasiswaan seperti Himpunan Mahasiswa Departemen Teknik Mesin Industri (HMDM) pada tahun 2021 dan 2023 dan Organisasi UKM Robotic ITS 2022. Selain itu penulis juga aktif di beberapa kepanitiaan seperti Lomba DTMI Cup 2021, SEC 3.0 2021, OKKBK 2021, PKTI TD 2021, LKMM Pra TD 2021, Kampus Pulang Kampung 2022, Gerigi ITS 2022, SEC 4.0 2022, Welpar UKM Robotic 2022, ITS EXPO 2023.

Beberapa pelatihan yang pernah diikuti penulis selama kuliah, antara lain seperti Pelatihan Spiritual dan Kebangsaan ITS 2020, OKKBK HMDM 2020, LKMM-Pra TD BEM FV-ITS 2020, PKTI TD HMDM 2020, LKMW TD HMDM 2020, Pelatihan Manajerial Organisasi, Pelatihan 3D Expert 2022, Sertifikasi CAD 2022. Penulis pernah melaksanakan kegiatan Magang Industri selama 4 bulan di PT. Industri Kereta Api (Persero) pada tahun 2023.