



**ANALISIS TEGANGAN UTAMA RANGKA *PROTOTYPE* MOBIL
LISTRIK TITEN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

Oleh

Ghafar Amru Nawawi

NIM 181910101023

**PROGRAM STUDI STRATA 1
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2022**



**ANALISIS TEGANGAN UTAMA RANGKA *PROTOTYPE* MOBIL
LISTRIK TITEN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

Diajukan guna memenuhi salah satu syarat menyelesaikan
Program Sarjana pada Program Studi Teknik Mesin (S1)
Fakultas Teknik Universitas Jember

Oleh

Ghafar Amru Nawawi

NIM 181910101023

**PROGRAM STUDI STRATA 1
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2022**

PERSEMBAHAN

Dengan puji syukur kehadirat Allah SWT, skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Ayahanda Bapak Nurhadi dan Ibu Siti Muawanah tersayang beserta kakakku tercinta Gumelar Aulian Nafi' dan adikku Gufron Ahmad Noor serta keluarga besar yang selalu mendoakan dan mendukung saya selama menempuh Pendidikan S1;
2. Dosen pembimbing utama skripsi Bapak Ir. Santoso Mulyadi S.T.,M.T dan dosen pembimbing anggota skripsi Dr. Ir. Robertoes Koekoeh Koentjoro Wibowo S.T.,M.Eng yang telah sabar memberikan bimbingan dan ilmunya selama proses penyusunan Tugas Akhir;
3. Dosen pembimbing akademik Dr. Muh Nurkoyim Kustanto S.T.,M.T., segenap dosen, pegawai dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Jember, khususnya di Program Studi Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu, pengalaman dan fasilitas selama saya menempuh pendidikan S1
4. Pengasuh Pondok Pesantren AL Jauhar, Ibu Nyai Hj. Lilik Istiqomah S.H., M.H;
5. Semua Guru, Dosen, Ustadz serta orang – orang pemberi ilmu dalam perjalanan pembelajaran saya;
6. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember;
7. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

“Merasa ingin tahu itu lebih baik daripada menjadi orang cerdas. Termotivasi dan memiliki rasa ingin tahu lebih berperan daripada menjadi cerdas karena inilah yang membuat orang beraksi”

(James Clear)

“ Kita manusia bukanlah makhluk yang begitu ringkih sampai harus tunduk di bawah belas kasihan trauma dalam aetiologi (hubungan sebab dan akibat)”

(Ichiro Kishimi dan Fumitake Koga)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ghafar Amru Nawawi

NIM : 181910101023

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi berjudul “Analisis Tegangan Utama Rangka *Prototype* Mobil Listrik TITEN Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah benar – benar hasil karya penulis sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun serta bukan karya plagiasi. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapatkan sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 3 Oktober 2022

Ghafar Amru Nawawi
181910101023

SKRIPSI

**ANALISIS TEGANGAN UTAMA RANGKA *PROTOTYPE* MOBIL
LISTRIK TITEN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Disusun Oleh :

Ghafar Amru Nawawi

NIM 181910101023



Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Santoso Mulyadi S.T.,M.T

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Ir. Robertoes Koekoeh Koentjoro

Wibowo S.T.,M.Eng

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Tegangan Utama Rangka *Prototype* Mobil Listrik TITEN Menggunakan Metode Elemen Hingga” karya Ghafar Amru Nawawi telah diuji dan disahkan pada :

Hari, tanggal : Senin, 3 Oktober 2022

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

Ir. Santoso Mulyadi S.T.,M.T
NIP. 197002281997021001

Dr. Ir. Robertoes Koekoeh Koentjoro
Wibowo S.T.,M.Eng
NIP. 196707081994121001

Dosen Penguji Utama,

Dosen Penguji Anggota,

Dr. Ir. Gaguk Jatisukanto S.T.,M.T.,IPM
NIP. 196902091998021001

Dr. Muh Nurkoyim Kustanto S.T.,M.T.
NIP. 196911221997021001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik,

Dr.Ir.Triwahju,S.T.,M.T
NIP. 197008261997021001

RINGKASAN

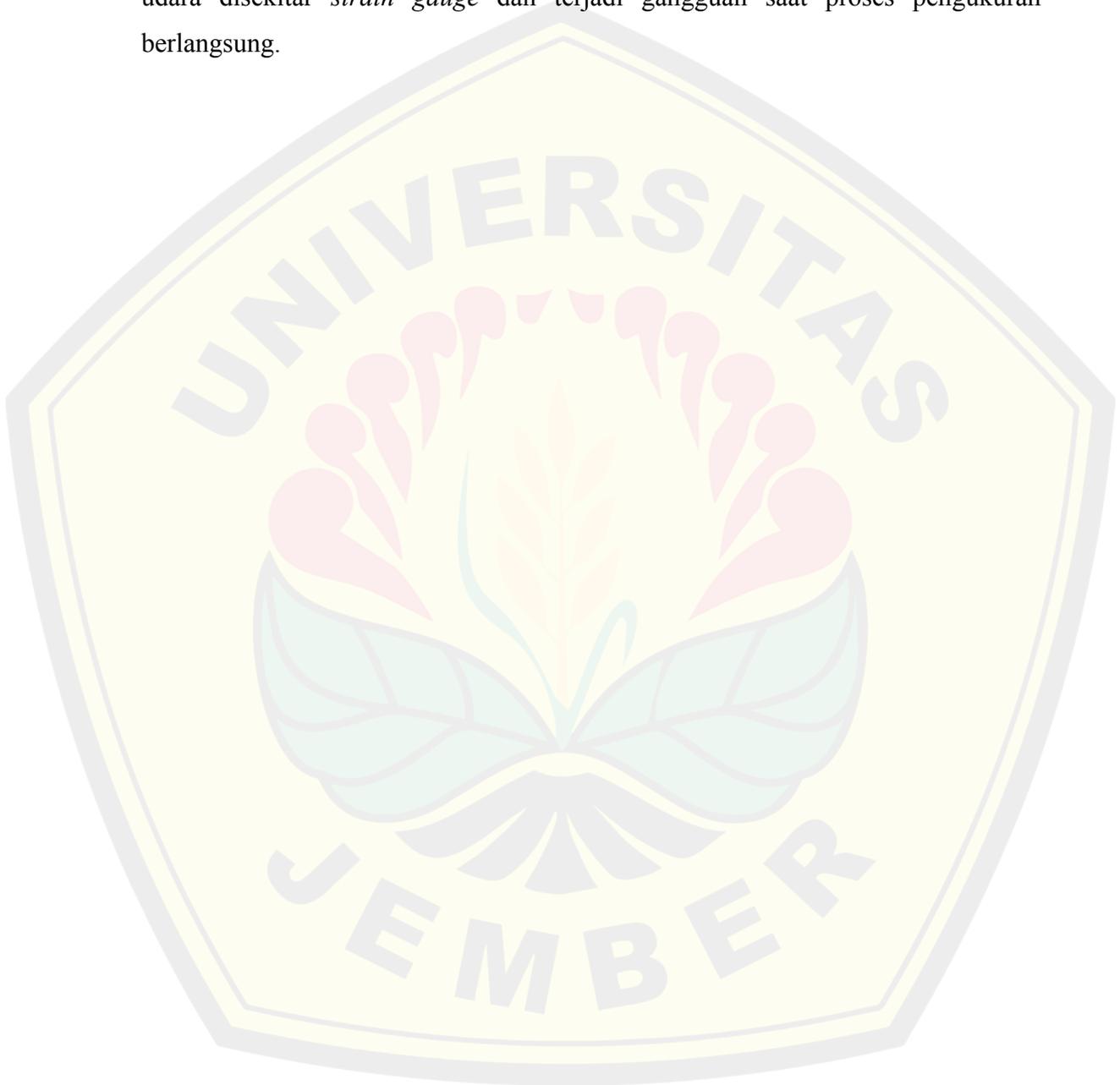
Analisis Tegangan Utama Rangka *Prototype* Mobil Listrik TITEN Menggunakan Metode Elemen Hingga; Ghafar Amru Nawawi; 181910101023; 2022; Program Studi Teknik Mesin; Fakultas Teknik; Universitas Jember.

Peningkatan jumlah transportasi dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap kondisi lingkungan seperti memperparah pencemaran udara yang diakibatkan emisi gas yang dihasilkan dan persediaan bahan bakar fosil semakin menipis dengan sumber daya alam yang terbatas. Dengan permasalahan diatas, Indonesia harus ikut serta dalam mengembangkan teknologi terbaru pada kendaraan yang hemat bahan bakar atau menggunakan energi alternatif yang ramah lingkungan. Mobil listrik merupakan kendaraan menggunakan energi alternatif yang ramah lingkungan. Dalam mengembangkan mobil listrik, salah satu komponen utama yang penting dalam perencanaan adalah rangka. Maka dari itu dilakukan analisis tegangan utama rangka tipe *prototype* mobil listrik TITEN menggunakan metode elemen hingga.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah simulasi metode elemen hingga menggunakan *software* ansys workbench. Pada proses pemodelan rangka *prototype* mobil listrik TITEN menggunakan *software* solidwork. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan utama pada rangka *prototype* mobil listrik TITEN menggunakan simulasi metode elemen hingga. Hasil simulasi menggunakan *software* ansys workbench adalah tegangan von mises, *safety factor*, tegangan geser, tegangan geser maksimum, tegangan utama maksimum, dan tegangan utama minimum. Setelah di dapatkan data hasil simulasi, kemudian dilanjutkan dengan membandingkan hasil penelitian sebelumnya menggunakan sensor *strain gauge* yang terhubung dengan rangka. Perbandingan tersebut dilakukan untuk mengetahui nilai simpangan yang terjadi.

Nilai tegangan utama maksimum dan minimum pada rangka *prototype* mobil listrik TITEN dengan pembebanan penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg yang dihasilkan dari simulasi metode elemen hingga menggunakan *software* ansys

workbench masing masing adalah 282,22 MPa, 37,87 MPa, 296,2 MPa, dan 47,08 MPa. Berat penumpang mempengaruhi hasil tegangan utama pada rangka. Semakin besar berat penumpang semakin besar juga nilai tegangan utama. Hasil perbandingan dari nilai simulasi dan penelitian sebelumnya adalah nilai simpangan masih relatif besar. Hal tersebut bisa terjadi karena mungkin *strain gauge* mengalami kerusakan pada saat proses pengukuran, muncul gelembung udara disekitar *strain gauge* dan terjadi gangguan saat proses pengukuran berlangsung.



SUMMARY

Principal Stress Analysis of TITEN Electric Car Prototype Frame Using Finite Element Method; Ghafar Amru Nawawi; 181910101023; 2022; *Mechanical Engineering Study Program; Faculty of Engineering; University of Jember.*

The increase in the number of transportation can have a significant impact on environmental conditions such as worsening the air caused by gas emissions produced and the supply of fossil fuels is running low with limited natural resources. With the above problems, Indonesia must participate in developing the latest technology in fuel-efficient vehicles or using alternative energy that is environmentally friendly. An electric car is a vehicle that uses alternative energy that is environmentally friendly. In developing an electric car, one of the main components that are important in planning is the frame. Therefore, the main stress analysis of the frame type of the TITEN electric car prototype was carried out using the finite element method.

The method used in this study is a simulation of the finite element method using ansys workbench software. In the process of modeling the frame of the TITEN electric car prototype using solidwork software. This study was conducted to determine the value of the principal stress on the frame of the TITEN electric car prototype using the finite element method simulation. The simulation results using ansys workbench software are von mises stress, safety factor, shear stress, maximum shear stress, maximum principal stress, and minimum principal stress. After getting the data from the simulation results, then proceed with the comparison of the results of previous studies using a strain gauge sensor connected to the frame. The comparison is carried out to determine the value of the deviation that occurs.

The maximum and minimum principal stress values in the TITEN electric car prototype frame with passenger loading of 45 kg and 56 kg resulting from the simulation of the finite element method using ansys workbench software are 282.22 MPa, 37.87 MPa, 296.2 MPa, respectively. and 47.08 MPa. The weight of the passenger affects the resultant stress on the frame. The greater the weight of

the passenger, the greater the value of the main stress. The result of the comparison of the simulation value and previous research is that the deviation value is still relatively large. This can happen because the strain gauge may be damaged during the measurement process, air bubbles appear around the strain gauge and disturbances occur during the measurement process.



PRAKATA

Puji syukur kehadirat ALLAH SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Tegangan Utama Rangka *Prototype* Mobil Listrik TITEN Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyelesaian penelitian dan penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan banyak terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Triwahju, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Hari Arbiantara, S.T., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Mesin Fakultas Pertanian Universitas Jember;
3. Ir. Santoso Mulyadi S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Ir. Robertoes Koekoeh Koentjoro S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, ilmu dan dukungan selama penelitian serta penulisan skripsi;
4. Dr. Ir. Gaguk Jatisukanto S.T., M.T., IPM selaku dosen penguji utama dan Dr. Muh Nurkoyim Kustanto S.T., M.T. selaku dosen penguji anggota yang telah memberikan ilmu, bimbingan, saran dan masukan dalam penelitian serta penulisan skripsi;
5. Semua dosen Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah senantiasa berbagi ilmu dan memberikan dorongan, semangat, serta do'a kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini;
6. Ayahanda Bapak Nurhadi dan Ibu Siti Muawanah tersayang beserta kakakku tercinta Gumelar Aulian Nafi' dan adikku Gufron Ahmad Noor serta keluarga besar yang selalu mendoakan dan mendukung saya selama menempuh Pendidikan S1;

7. Pengasuh Pondok Pesantren AL Jauhar, Ibu Nyai Hj. Lilik Istiqomah S.H., M.H.
8. Teman – teman satu angkatan program studi teknik mesin yang telah membantu proses penelitian, memberi masukan, dan saran dalam penulisan skripsi
9. Teman – teman Santri dan Pengurus Pondok Pesantren AL Jauhar yang telah memberi dukungan dan motivasi dalam proses penelitian dan penulisan skripsi;
10. Teman keluh kesah saya Fatur R, Joko Tingkir, Wedos, Reza, Daus, Avi, Fajar, Daffa, Jomblo, Asrof, Preman, oppa hanip yang telah menjadi support sistem tersendiri bagi saya;
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang memberikan bantuan dan dorongan selama mengikuti studi dan penulisan skripsi ini.

Penulis telah berusaha menyelesaikan tanggung jawabnya dalam penulisan skripsi ini dengan sebaik – baiknya. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis berharap adanya saran dan kritik yang bersifat membangun sehingga menjadikan penulisan skripsi ini lebih baik. Semoga segala sesuatu yang tertulis di dalam skripsi ini dapat memberikan informasi bagi para pembaca.

Jember,

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERSEMBAHAN	i
HALAMAN MOTTO	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	v
RINGKASAN	vi
<i>SUMMARY</i>	viii
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Mobil Listrik	5
2.2 Rangka	5
2.2.1 <i>Ladder Frame</i>	5
2.2.2 <i>Monocoque (Integral Structure)</i>	6
2.2.3 <i>Tubular Space Frames</i>	7
2.2.4 <i>Backbone</i>	8
2.3 Analisis Statik	8
2.4 Beban Statis	9
2.5 Gaya Vertikal Akibat Beban Statis	9
2.6 Tegangan Pada Struktur	10
2.7 Tegangan Bidang (<i>Plane Stress</i>)	11
2.8 Tegangan Von-Misses	11
2.9 <i>Stress Transformation</i>	12
2.9.1 Tegangan Normal	13

2.9.2	Tegangan Geser Maksimum.....	13
2.9.3	Tegangan Utama.....	14
2.9.4	Lingkaran Mohr.....	16
2.10	Teori Metode Elemen Hingga.....	16
2.10.1	Matrik Kekakuan.....	17
2.10.2	Teori Elastisitas.....	18
2.11	Software Solidwork.....	19
2.12	Software Ansys.....	19
2.12.1	<i>Combined Stress</i>	20
2.12.2	Kegagalan Tegangan Utama.....	21
2.13	Mesh Metric.....	21
2.13.1	<i>Skewness</i>	21
2.13.2	<i>Orthogonal Quality</i>	22
2.14	Hipotesis.....	24
BAB 3.	METODOLOGI.....	25
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.2	Alat dan Bahan.....	25
3.3	Prosedur Penelitian.....	25
3.3.1	Studi Literatur.....	25
3.3.2	Pemodelan Rangka dengan <i>Software Solidwork</i>	25
3.3.3	Simulasi Dengan <i>Software Ansys Workbench</i>	27
3.3.4	Analisis hasil penelitian.....	31
3.3.5	Kesimpulan.....	31
3.4	Diagram Alir.....	32
3.5	Varibel Pengujian.....	33
3.5.1	Variabel Bebas.....	33
3.5.2	Variabel Terikat.....	33
3.5.3	Variabel Kontrol.....	33
3.6	Pengambilan Data.....	38
3.7	Pengolahan Data.....	39
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1	Analisis Awal.....	41
4.2	Analisis Static Structural Pada Rangka.....	44

4.3 Analisis Perbandingan antara Hasil Simulasi dengan Penelitian Sebelumnya.....	51
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	56
5.1 Kesimpulan.....	56
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Ladder Frame</i>	6
Gambar 2.2 Rangka <i>Monocoque</i>	7
Gambar 2.3 <i>Tubular Space Frame</i>	7
Gambar 2.4 Rangka <i>Backbone</i>	8
Gambar 2.5 Gaya Vertikal Akibat Beban Statis.....	10
Gambar 2.6 Tegangan Pada Luas Penampang.....	11
Gambar 2.7 <i>Stress Transformation</i>	12
Gambar 2.8 Elemen Tegangan Dua Dimensi.....	13
Gambar 2.9 Elemen Tegangan Geser Maksimum.....	14
Gambar 2.10 Elemen Tegangan Utama.....	15
Gambar 2.11 Lingkaran Mohr.....	16
Gambar 2.12 Model Elemen Hingga.....	17
Gambar 2.13 Bentuk <i>Mesh Triangle</i> dan <i>Quadrilateral</i>	22
Gambar 2.14 Vektor <i>Orthogonal Quality</i>	23
Gambar 3.1 Garis Dasar Rangka.....	26
Gambar 3.2 Rangka Final.....	26
Gambar 3.3 Pemilihan Analisis Sistem.....	27
Gambar 3.4 Data Material.....	28
Gambar 3.5 <i>Import</i> Geometri Rangka.....	29
Gambar 3.6 Menentukan <i>Part Behavior</i>	29
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 3.8 Desain Rangka Mobil Listrik TITEN Tipe <i>Prototype</i>	34
Gambar 3.9 Geometri Penampang Rangka.....	35
Gambar 3.10 Lokasi Titik Tumpuan.....	36
Gambar 3.11 Lokasi Titik Pembebanan.....	37
Gambar 3.12 Lokasi Titik Penempelan <i>Strain Gauge</i>	39
Gambar 3.13 Penempelan <i>Strain Gauge</i> Pada Sumbu x dan y.....	39
Gambar 4.1 Dimensi Rangka <i>Prototype</i> Mobil Listrik TITEN.....	41
Gambar 4.2 Hasil <i>Mesh Default</i>	42
Gambar 4.3 Hasil <i>Meshing Dengan Element Mesh Size 10 Dan Jenis Element Mesh Hexa</i>	43
Gambar 4.4 hasil Tegangan <i>Von Misses</i>	45
Gambar 4.5 Hasil Deformasi.....	46
Gambar 4.6 Hasil <i>Safety Factor</i>	47
Gambar 4.7 Hasil Tegangan Utama Maksimum.....	48
Gambar 4.8 Hasil Tegangan Utama Minimum.....	49
Gambar 4.9 Hasil Tegangan Geser Maksimum.....	50
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Dengan Variasi Beban Penumpang.....	51
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Normal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya.....	53
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Geser Simulasi dan Penelitian Sebelumnya.....	53

Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Geser Maksimal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya	54
Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Utama Maksimal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya	54
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Utama Minimal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya	55



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Beban Statis Pada Rangka <i>Prototype</i> Mobil Listrik TITEN.....	9
Tabel 2.2 Nilai <i>Skewness</i>	22
Tabel 2.3 Nilai <i>Orthogonal Quality</i>	24
Tabel 3.1 Spesifikasi Material Alumunium 6061-T6	35
Tabel 3.2 Lokasi Titik Pembebanan Pada Rangka.....	37
Tabel 3.3 Parameter Data yang Ditentukan	40
Tabel 4.1 Kriteria <i>Mesh Default</i>	42
Tabel 4.2 Data <i>Mesh Metric Mesh Default</i>	42
Tabel 4.3 Kriteria <i>Mesh Element Mesh Size 10 Dan Jenis Element Mesh Hexa</i> ..	44
Tabel 4.4 Data <i>Mesh Metric Mesh Ulang</i>	44
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Simulasi dan Penelitian Sebelumnya.....	52



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia, sehingga kebutuhan akan transportasi semakin meningkat, terutama transportasi jenis jalur darat seperti sepeda motor, mobil, bus, dan truck. Peningkatan jumlah transportasi sangat dibutuhkan dalam mobilitas manusia untuk beraktifitas tetapi dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap kondisi lingkungan seperti memperparah pencemaran udara yang diakibatkan emisi gas yang dihasilkan dan persediaan bahan bakar fosil semakin menipis dengan sumber daya alam yang terbatas. Dengan permasalahan diatas, Indonesia harus ikut serta dalam mengembangkan teknologi terbaru pada kendaraan yang hemat bahan bakar atau menggunakan energi alternatif yang ramah lingkungan (Setiyana dkk., 2021). Pengembangan energi alternatif pada transportasi salah satunya menggunakan energi listrik. Salah satu karakteristik energi listrik adalah dapat menjadikan transportasi ramah lingkungan dikarenakan menghasilkan nol emisi karbon dioksida yang membuatnya menjadi alternatif yang baik untuk menggantikan mesin pembakaran (Budiman dkk., 2021).

Salah satu implementasi dalam mengembangkan mobil listrik di Indonesia adalah diadakannya kompetisi Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE). Kompetisi ini merupakan salah satu kompetisi mobil irit tingkat nasional dengan peserta mahasiswa berasal dari perguruan tinggi di Indonesia yang diselenggarakan oleh Kementrian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi (KEMDIKBUDRISTEK). Dengan adanya kompetisi ini diharapkan dapat mendorong generasi muda bangsa untuk melahirkan teknologi otomotif yang hemat energi (Reksowardojo dkk., 2021).

Dalam mengembangkan mobil listrik, salah satu komponen yang penting dalam perancangan adalah rangka. Rangka merupakan salah satu komponen utama dari suatu kendaraan yang berfungsi sebagai tempat meletakkan semua beban yang ada seperti beban kendaraan, mesin dan penumpang. Berdasarkan

kontruksinya sebagai tempat menempelnya bodi pada rangka dibagi menjadi 2 yaitu kontruksi menyatu dan terpisah. Dalam perencanaan rangka yang disajikan pada mobil harus kokoh, kuat, ringan, dan tahan terhadap guncangan yang diterima dari kondisi jalan (Isworo dkk., 2019).

Hidayat dkk (2017) melakukan penelitian tentang perancangan dan analisis rangka statis kendaraan *shell eco marathon tipe urban concept*. Penelitian ini membuat rancangan bentuk rangka yang cocok untuk kompetisi *shell eco marathon tipe urban concept* serta melakukan perhitungan dan mensimulasikan rangka dengan pembebanan statis. Kesimpulan dari penelitian ini adalah hasil perhitungan secara manual diperoleh nilai tegangan utama maksimum sebesar 18,3 MPa dengan nilai defleksi sebesar 3,35 mm dan simulasi pembebanan statis menggunakan *software Autodesk Inventor* diperoleh nilai tegangan utama maksimum sebesar 19,36 MPa dengan nilai defleksi sebesar 3,542 mm.

Durgam dkk (2021) memvalidasi nilai *stress strain* pada rangka kendaraan listrik yang dikenai pembebanan sebesar 4000 kg menggunakan hasil simulasi dengan hasil dari *experiment* menggunakan alat *strain gauge*. Penelitian ini melakukan simulasi di *software Ansys* untuk mencari nilai tegangan, regangan, dan deformasi dengan pembebanan yang berbeda. Setelah itu, penelitian ini melakukan pengukuran nilai tegangan pada rangka secara *experiment* menggunakan alat *strain gauge*. Kesimpulan dari penelitian ini adalah nilai *stress strain* yang dihasilkan dari simulasi dan *experiment* dalam kesepakatan baik yang ditampilkan dalam bentuk grafik.

Deulgaonkar (2018) membandingkan nilai tegangan hasil analisis elemen hingga dengan hasil pengujian *experiment* untuk membantu dalam memvalidasi konfigurasi desain pada rangka *mounted*. Hasil analisis elemen hingga berupa nilai tegangan pada lokasi beban yang sudah ditentukan. Alat ukur *strain gauge* di tempelkan di daerah kritis menurut analisis elemen hingga. Kesimpulan dari penelitian ini adalah terdapat hubungan yang erat pada nilai tegangan antara hasil analisis elemen hingga dengan hasil *experiment* menggunakan alat ukur *strain gauge*.

Berdasarkan kajian di atas, peneliti akan melakukan analisis tegangan utama rangka tipe *prototype* mobil listrik TITEN menggunakan metode elemen hingga. *Software* Ansys Workbench merupakan *software* berbasis metode elemen hingga untuk menganalisis suatu komponen dalam dua dimensi maupun tiga dimensi. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan utama pada *rangka* mobil listrik TITEN tipe *prototype* yang dipengaruhi oleh variasi beban pengemudi dan membandingkan hasil simulasi metode elemen hingga dengan hasil penelitian sebelumnya. Pemodelan rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype* menggunakan *software* Solidwork.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dari penelitian tersebut, maka dapat diambil perumusan masalah adalah sebagai berikut :

1. Berapa besar nilai tegangan utama pada rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype* menggunakan metode elemen hingga pada *software* Ansys Workbench ?
2. Bagaimana perbandingan nilai tegangan utama hasil simulasi metode elemen hingga dengan penelitian sebelumnya ?

1.3 Batasan Masalah

Penentuan batasan masalah bertujuan agar penelitian dapat berjalan secara fokus, terarah, dan mencapai tujuan yang diinginkan. Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menggunakan desain rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype*,
2. Menggunakan *Software* Solidwork dan Ansys Workbench,
3. Kecepatan mobil listrik TITEN sama dengan nol,
4. Menggunakan analisis static dengan pembebanan statis,
5. Pengambilan besar nilai tegangan utama hanya di beberapa titik tertentu sesuai dengan penelitian sebelumnya.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang berdasarkan pada rumusan masalah adalah :

1. Mengetahui besar nilai tegangan utama pada rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype* menggunakan metode elemen hingga pada *software* Ansys Workbench,
2. Membandingkan hasil metode elemen hingga dengan hasil penelitian sebelumnya.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui besar nilai tegangan utama pada rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype*,
2. Sebagai bahan masukan dan validasi dalam mendesain rangka mobil listrik TITEN generasi berikutnya,
3. Hasil yang diperoleh dapat dijadikan acuan bagi pihak lain yang mendesain dan mengadakan penelitian dalam bidang yang sama.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mobil Listrik

Mobil listrik adalah suatu mobil yang digerakkan oleh tenaga listrik yang disimpan di tempat penyimpanan energi listrik seperti baterai, accu, dan lain lain. Karakteristik energi listrik di dalam mobil menjadikan kendaraan ramah lingkungan. Dikarenakan mobil listrik tidak menimbulkan polusi udara dan dapat mengurangi efek rumah kaca yang biasa ditimbulkan oleh kendaraan dengan bahan bakar minyak (Mulyadi dkk., 2019).

Akhir akhir ini pemerintah sangat serius dalam mendorong berkembangnya industri teknologi mobil listrik. Terbitnya Perpres No. 55/2019 tentang Percepatan Program Berbasis Baterai untuk Transportasi Jalan membuktikan komitmen pemerintah terhadap pengembangan system energi transportasi yang condong pada kebijakan kendaraan berbasis listrik (KBL). Hal yang mendasari komitmen pemerintah dalam peralihan kendaraan konvensional ke KBL dikarenakan antisipasi proyeksi permintaan bahan bakar minyak yang semakin besar (Aziz dkk., 2020).

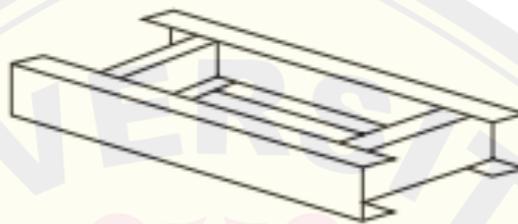
2.2 Rangka

Rangka adalah bagian dari kendaraan atau dengan kata lain adalah bagian yang tinggal bila bodi mobil dilepaskan keseluruhannya untuk bagian rangka itu sendiri terdiri dari rangka, mesin, pemindah tenaga, sistem kemudi, sistem suspensi sistem rem, dan kelengkapan lainnya (Hidayat dkk., 2017). Berikut macam macam *rangka* yaitu :

2.2.1 Ladder Frame

Ladder Frame memiliki bentuk struktur seperti tangga yaitu terdapat dua batang utama yang membujur dan beberapa batang melintang untuk menghubungkan kedua batang utama. Batang utama yang membujur menjadi tempat pusat distribusi tegangan yang bekerja pada *rangka*. Pada batang melintang digunakan sebagai tempat penahan tegangan lateral dan tegangan akibat gaya torsi yang terjadi.

Jenis rangka ini sangat bagus untuk kendaraan dengan muatan besar karena mampu menahan tegangan yang terjadi akibat gerak akselerasi dan pengereman, namun sangat rentan terhadap *rollover* yang diakibatkan oleh tegangan dari gaya lateral dan gaya torsi. Beban lentur maksimum terjadi pada bagian sambungan sehingga menjadi daerah kritis. Pada penelitian ini, rangka tipe *prototype* pada mobil listrik TITEN menggunakan jenis rangka ini. Desain rangka *prototype* mobil listrik TITEN dapat dilihat pada Gambar 3.7

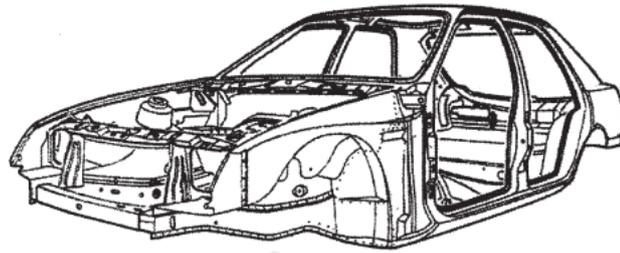


Gambar 2.1 *Ladder Frame*
Sumber : (Happian dan Smith, 2002)

2.2.2 *Monocoque (Integral Structure)*

Monocoque merupakan jenis rangka dengan satu kesatuan struktur dari bentuk kendaraan sehingga memiliki bentuk yang beragam sesuai dengan bodi mobil. Sebenarnya rangka ini menggunakan pengelasan yang sudah di otomasi yang hasilnya sempurna sehingga rangka *monocoque* terlihat satu kesatuan.

Keunggulan dari rangka jenis ini adalah meningkatnya proteksi keselamatan dari kecelakaan karena zona *crumple* bisa dibentuk di dalam rangka. Selain itu efisiensi ruang karena rangka ini termasuk struktur lapisan luar. Kalau rangka jenis lain membutuhkan *transmission tunnel* yang lebar, tingginya akses pintu masuk ke dalam kabin, perlunya penambahan *rollover bar*, dan lain sebagainya. Kelemahan dari rangka *monocoque* adalah massa rangka lebih berat di banding rangka yang lain karena penggunaan material yang lebih banyak dari jenis rangka lainnya. Selain itu dari segi performa kekuatan mekanika. Kekuatan dari *pressed shet metal* tidak sekuat *metal tube* ataupun *extruded metal*.

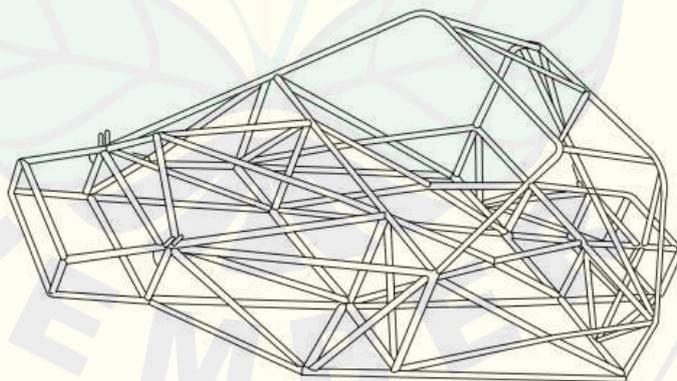


Gambar 2.2 Rangka *Monocoque*
Sumber : (Happian dan Smith, 2002)

2.2.3 *Tubular Space Frames*

Tubular space frame memiliki spesifikasi kekuatan luluh sangat bagus dengan kekakuan torsional, ketahanan terhadap beban berat dan impact. Geometri dari material penyusun rangka ini juga bermacam-macam mulai dari bentuk lingkaran, segi enam, segi empat, dan lain sebagainya. Beragam jenis material penyusun rangka ini dapat memudahkan pemasangan komponen komponen yang nantinya menempel pada rangka.

Kemudahan dalam segi desain tetapi cukup lumayan sulit dalam proses pembuatannya. Kelemahan dari rangka *tubular space frame* adalah susahnya akses untuk masuk ke dalam kabin kendaraan, membutuhkan waktu yang produksi yang cukup lama karena bentuk struktur yang kompleks dan biaya produksi yang tinggi.

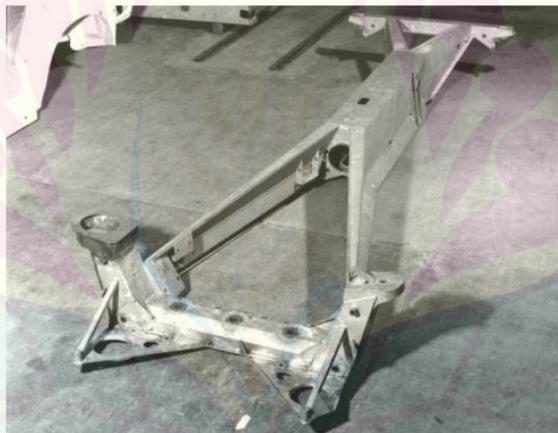


Gambar 2.3 *Tubular Space Frame*
Sumber : (Happian dan Smith, 2002)

2.2.4 Backbone

Rangka *backbone* terdiri dari tubular yang kokoh seperti tulang punggung (*backbone*) dan menyatu dengan poros depan dan belakang. Sehingga bentuk rangka *backbone* menjadi struktur yang kaku dan menahan semua beban. Rangka ini memiliki kekauan dari luas area bagian *backbone* itu sendiri. Dalam penambahan kekauan dalam rangka *backbone* ini dilakukan pemberian struktur tambahan.

Kenggulan dari rangka ini adalah bisa di buat dengan berbagai bentuk struktur seperti *space frame triangular*, *monocoque angular* dan lain lain. Hampir semua kendaraan dengan penggerak belakang dan depan menggunakan *rangka* jenis ini dikarenakan untuk penutup sistem transmisi dan ruang poros penggerak. Kelemahan pada rangka *backbone* adalah lebih berat untuk menghasilkan kekakuan torsional dan tidak adanya pelindung saat terjadi tabrakan dari samping



Gambar 2.4 Rangka *Backbone*
Sumber : (Happian dan Smith, 2002)

2.3 Analisis Statik

Menurut (Rodrigues dkk., 2015) analisis statik dilakukan di struktur untuk mencari nilai perpindahan, tegangan, dan regangan dengan mengabaikan efek gaya inersia dan redaman. Tujuan utama analisis ini adalah sebagai parameter memeriksa ketahanan material struktur dan mengevaluasi perubahan geometri. Analisis ini dilakukan pada kendaraan dalam keadaan statis. Benda dikatakan statis apabila benda dalam keadaan diam dan mencapai keseimbangan gaya dan

momen. Syarat persamaan untuk memenuhi terjadinya keseimbangan gaya dan momen (Hibbeler, 2012) adalah :

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma M = 0$$

Keterangan :

ΣF_x = Jumlah Gaya Arah Sumbu x (N)

ΣF_y = Jumlah Gaya Arah Sumbu y (N)

ΣM = Jumlah Momen (N)

2.4 Beban Statis

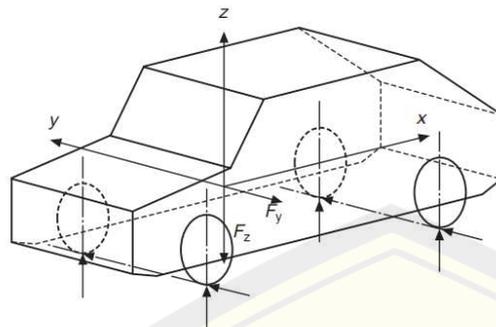
Beban statis merupakan suatu pembebanan dalam keadaan diam dan mencapai keseimbangan gaya. Beban statis pada kendaraan terjadi secara murni karena akibat gaya berat dari komponen komponen tersebut. Komponen yang ada pada rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype* pada saat dilakukan pengujian di penelitian sebelumnya adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1 Beban Statis Pada Rangka *Prototype* Mobil Listrik TITEN

No	Jenis Beban	Massa
1	Rangka	2 kg
2	Pengemudi 1	45 kg
3	Pengemudi 2	56 kg

2.5 Gaya Vertikal Akibat Beban Statis

Gaya vertikal adalah gaya yang diakibatkan oleh beban statis pada setiap komponen di dalam kendaraan. Komponen tersebut akan memberikan gaya vertikal ke arah pusat gravitasi bumi. Lokasi dari gaya vertikal ini terdistribusi sesuai dengan letak komponen yang menempel pada rangka seperti Gambar 2.5



Keterangan Gambar :

x = Sumbu x

y = Sumbu y

z = Sumbu z

F_y = Gaya dari arah y (N)

F_z = Gaya dari arah z atau

Gaya Vertikal (N)

Gambar 2.5 Gaya Vertikal Akibat Beban Statis
Sumber : (Happian dan Smith, 2002)

Persamaan gaya vertikal akibat beban statis sebagai berikut :

$$F_{\text{vertikal}} = m_{\text{beban}} \times g \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

F_{vertikal} = Gaya vertikal (N)

m_{beban} = Massa beban (kg)

g = Nilai kecepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

2.6 Tegangan Sederhana Pada Struktur

Tegangan adalah intensitas gaya yang didistribusikan atas luasan bagian tertentu atau secara formula gaya per satuan luas dan dilambangkan dengan huruf Yunani, σ (*sigma*).

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

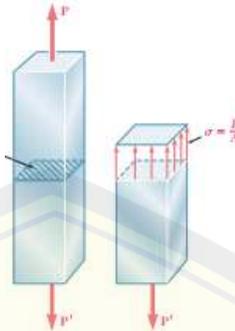
σ : Tegangan (MPa)

P : Beban atau Gaya (N)

A : Luas Penampang (m^2)

Satuan SI yang digunakan pada persamaan 2.2, dengan beban dinyatakan dalam newton (N) dan luas penampang dinyatakan dalam meter persegi (m^2), maka tegangan dinyatakan dalam $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ (pascal). Dalam prakteknya pascal adalah satuan dengan kuantitas yang sangat kecil, sehingga kelipatan dari satuan pascal harus digunakan seperti kilopascal (KPa), Megapascal (MPa), dan gigapascal

(GPa) (Beer dkk., 2012). Gambar 2.6 menunjukkan tegangan yang terjadi di luasan penampang akibat dikenai beban.



Gambar 2.6 Tegangan Pada Luas Penampang
Sumber : (Beer dkk., 2012)

2.7 Tegangan Bidang (Plane Stress)

Plane stress adalah kondisi tegangan bidang yang terjadi ketika semua tegangan yang bekerja pada komponen berada pada bidang yang sama. Tegangan bidang ini diasumsikan apabila dua permukaan elemen kubik bebas dari tegangan apa pun. Jika sumbu z dipilih dan tegak lurus terhadap permukaan ini, maka nilai dari $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$. Sehingga komponen yang tersisa dalam tegangan bidang tersebut adalah $\sigma_x, \sigma_y, dan \tau_{xy}$. Kondisi ini terjadi di plat tipis yang dikenai gaya yang bekerja pada bidang tengah plat (Beer dkk., 2012).

2.8 Tegangan Von-Misses

Teori energi distorsi maksimum digunakan untuk memprediksi kegagalan suatu material ulet. Terjadinya kegagalan pada material ulet ini apabila tegangan von mises atau tegangan ekuivalen atau tegangan efektif mencapai nilai yield strength, S_y pada material tersebut. Persamaan tegangan von mises dapat diturunkan dengan ketentuan tiga tegangan utama

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Tegangan Utama (MPa)

Atau menggunakan ketentuan pada komponen tegangan x-y-z

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan :

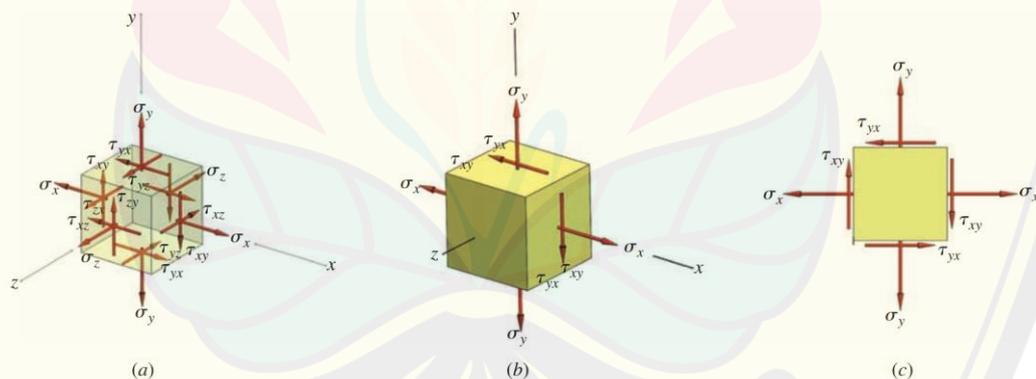
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = Tegangan normal (MPa)

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ = Tegangan geser (MPa)

Seperti persamaan tegangan von mises adalah besaran scalar yang mengukur intensitas seluruh keadaan tegangan karena mencakup tiga tegangan utama atau tiga tegangan normal dalam arah x,y, dan z bersama dengan tegangan geser pada bidang x,y, dan z.

2.9 Stress Transformation

Dalam perencanaan desain mekanik perlu diketahui besar tegangan yang diberikan agar tidak melebihi kemampuan material. Pada kenyataanya elemen tegangan selalu dalam bentuk tiga dimensi dan memiliki enam komponen tegangan. Terdapat metodologi mengurangi kompleksitas tegangan untuk melakukan perbandingan. Langkah pertama adalah tranformasi tegangan untuk mencari tegangan utama. Langkah kedua adalah menentukan tegangan efektif, sebuah nilai tunggal dari tiga tegangan utama untuk nilai perbandingan terhadap kekuatan material (Mott dkk., 2018).



Gambar 2.7 Stress Transformation
Sumber : (Beer dkk., 2012)

Proses pengurangan enam komponen tegangan yang terdiri dari tegangan normal ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) dan tegangan geser ($\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$) yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 bagian (a) menjadi tiga tegangan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \text{ dan } \sigma_3$) yang ditunjukkan pada bagian (b). Untuk kondisi tegangan bidang dua dimensi pada Gambar 2.11 bagian (c) terdapat tiga komponen tegangan ($\sigma_x, \sigma_y, \text{ dan } \tau_{xy}$).

Komponen tegangan pada sistem koordinat baru dapat diperoleh dari komponen tegangan pada sistem koordinat asli dengan memutar kerangka koordinat asli. Menggunakan θ sebagai sudut rotasi sistem koordinat.

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \dots \dots \dots (2.6)$$

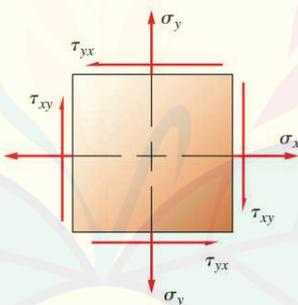
$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :

- $\sigma_{x'}$ = Tegangan Normal arah sumbu x (MPa)
- $\sigma_{y'}$ = Tegangan Normal arah sumbu y (MPa)
- $\tau_{x'y'}$ = Tegangan Geser arah bidang xy (MPa)
- θ = Sudut Rotasi (Derajat)

2.9.1 Tegangan Normal

Tegangan normal adalah tegangan yang terjadi pada bidang dengan arah tegak lurus terhadap permukaan potongan. Tegangan ini timbul saat gaya aksial berupa gaya tarik atau gaya tekan yang bekerja di luas penampang bidang.

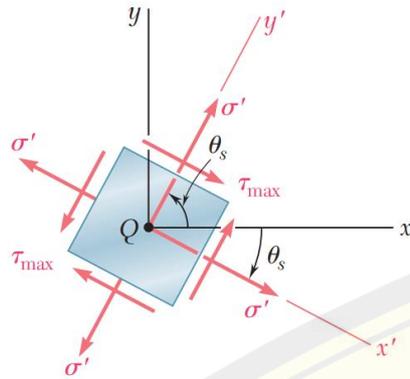


Gambar 2.8 Elemen Tegangan Dua Dimensi
Sumber : (Mott dkk., 2018)

Pada elemen tegangan dua dimensi yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 terdapat komponen tegangan normal, σ_x dan σ_y dan tegangan geser, τ_{xy} dan τ_{yx} (Mott dkk., 2018).

2.9.2 Tegangan Geser Maksimum

Tegangan geser adalah suatu tegangan terjadi saat gaya transversal bekerja di suatu bidang. Nilai tegangan geser rata-rata dapat diperoleh dari membagi nilai gaya geser, P dengan luas penampang, A.



Keterangan gambar :

σ' = Tegangan Utama

τ_{max} = Tegangan Geser Maksimum

θ_s = Sudut Rotasi

Gambar 2.9 Elemen Tegangan Geser Maksimum
 Sumber : (Beer dkk., 2012)

Gambar 2.9 menunjukkan terjadinya tegangan geser maksimum apabila saat $\theta_s = 45^\circ$ dari elemen tegangan utama. Pada elemen tegangan geser maksimum terdapat tegangan normal dengan nilai sama yang bekerja tegak lurus terhadap elemen (Mott dkk., 2018).

2.9.3 Tegangan Utama

Tegangan normal maksimum dan minimum dapat diperoleh dari persamaan diferensial sehubungan dengan θ dan menetapkan hasil sama dengan 0. Menggunakan θ_σ sebagai sudut rotasi yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan normal maksimum dan minimum, sehingga muncul persamaan:

$$\tan 2\theta_\sigma = \frac{\tau_{xy}}{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

σ_x = Tegangan Normal arah sumbu x (MPa)

σ_y = Tegangan Normal arah sumbu y (MPa)

τ_{xy} = Tegangan Geser arah bidang xy (MPa)

θ_σ = Sudut Rotasi (Derajat)

Memecahkan θ_σ dan mensubstitusikan hasilnya ke persamaan sehingga menghasilkan persamaan berikut :

Tegangan normal maksimum

$$\sigma_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\right]^2 + \tau_{xy}^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

σ_{max} = Tegangan Utama Maksimal (MPa)

σ_x = Tegangan Normal arah sumbu x (MPa)

σ_y = Tegangan Normal arah sumbu y (MPa)

τ_{xy} = Tegangan Geser arah bidang xy (MPa)

Tegangan normal minimum

$$\sigma_{min} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\right]^2 + \tau_{xy}^2} \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan :

σ_{min} = Tegangan Utama Minimum (MPa)

σ_x = Tegangan Normal arah sumbu x (MPa)

σ_y = Tegangan Normal arah sumbu y (MPa)

τ_{xy} = Tegangan Geser arah bidang xy (MPa)

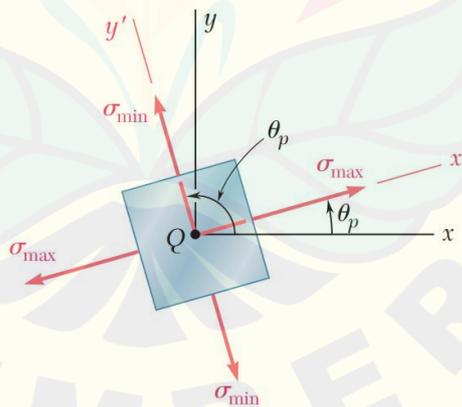
Kedua tegangan normal tersebut juga disebut tegangan utama maksimum dan minimum, sehingga :

$$\sigma_1 > \sigma_2 \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan :

σ_1 = Tegangan Utama Maksimal (MPa)

σ_2 = Tegangan Utama Minimum (MPa)



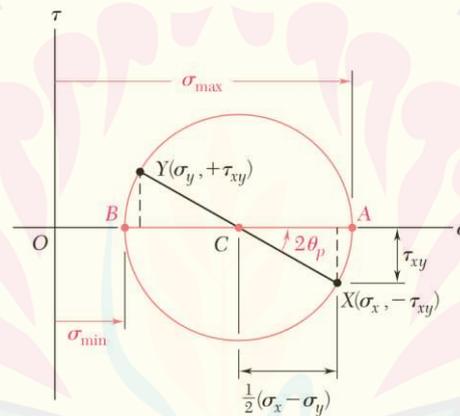
Gambar 2.10 Elemen Tegangan Utama
Sumber : (Beer dkk., 2012)

Sudut θ_p diukur dari sumbu x positif dari elemen tegangan asli ke tegangan utama maksimum, σ_{max} . Maka tegangan utama minimum, σ_{min} berada

pada 90° dari σ_1 . Gambar 2.9 menunjukkan terjadinya tegangan utama maksimum dan minimum saat nilai tegangan geser, τ_{xy} sama dengan 0 (Mott dkk., 2018).

2.9.4 Lingkaran Mohr

Lingkaran Mohr adalah plot kombinasi antara tegangan geser dan tegangan normal yang ada pada elemen tegangan yang mungkin untuk semua sudut orientasi elemen tegangan. Metode ini menggunakan kombinasi bantuan grafik dan perhitungan sederhana. Menggunakan bantuan grafik lingkaran Mohr dapat meminimalkan kesalahan perhitungan tegangan pada suatu elemen tegangan. Karena pada perhitungan elemen tegangan terdapat banyak istilah dan perhitungan yang kemungkinan menimbulkan kesalahan tinggi



Gambar 2.11 Lingkaran Mohr
Sumber : (Mott dkk., 2018)

Seperti Gambar 2.10 (b) menunjukkan titik X di koordinat σ_x dan $-\tau_{xy}$ dan titik Y di koordinat σ_y dan τ_{xy} . Titik A mewakili tegangan utama maksimum, σ_{max} dan titik B mewakili tegangan utama minimum, σ_{min} . Titik C merupakan tegangan rata rata, $\sigma_{ave} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)$ (Beer dkk., 2012).

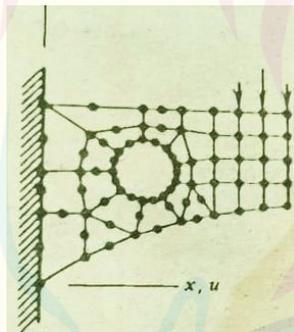
2.10 Teori Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik untuk menyelesaikan masalah mekanika kontinum dengan ketelitian yang dapat diterima oleh peneliti. Metode ini dapat dimanfaatkan untuk menyelesaikan berbagai masalah keteknikan. Permasalahan yang akan dianalisis harus mempunyai bentuk,

pembeban, dan kondisi batas yang sembarang. *Mesh* terdiri atas elemen elemen yang berbeda bentuk, besaran dan jenis.

Kelebihan dari metode ini adalah terdapat arti fisik yang dekat antara elemen *mesh* dengan struktur aslinya. *Mesh* yang dimaksud bukan merupakan persamaan abstrak matematis yang sulit untuk divisualkan. Kelamahan metode ini adalah hasil di suatu permasalahan berupa hasil persamaan numerik dimana persamaan tersebut bersifat tertutup yang tidak dapat digunakan lagi pada permasalahan sama walaupun hanya berbeda parameternya.

Pada Gambar 2.12 diperlihatkan model elemen hingga. Daerah yang berupa segitiga dan kuadrilateral adalah elemen elemen hingga. Titik titik hitam adalah titik simpul (*node*) dimana elemen yang satu berhubungan dengan lainnya. Suatu jaring (*mesh*) adalah susunan titik simpul dan elemen. Pada dasarnya elemen hingga adalah bagian bagian kecil dari struktur aktual.



Gambar 2.12 Model Elemen Hingga
Sumber : (Cook, 1990)

2.10.1 Matrik Kekakuan

Didefinisikan derajat kebebasan (*degree of freedom, d.o.f.*) sebagai peralihan atau rotasi suatu titik kumpul (*node*). Dengan demikian untuk sebuah elemen dengan n dof dapat dituliskan persamaan :

$$\begin{aligned}
 k_{11}d_1 + k_{12}d_2 + \dots + k_{1n}d_n &= r_1 \\
 k_{21}d_1 + k_{22}d_2 + \dots + k_{2n}d_n &= r_2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 k_{n1}d_1 + k_{n2}d_2 + \dots + k_{nn}d_n &= r_n \dots \dots \dots (2.12)
 \end{aligned}$$

Keterangan :

d_i = Degree Of Freedom ke i

r_i = Gaya atau momen

k_{ij} = Koefisien Kekakuan

Apabila diringkas menjadi bentuk matriks, maka persamaan dapat ditulis :

$$[k] \{d\} = \{r\} \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan :

$[k]$ = matriks kekakuan elemen,

$\{d\}$ = vektor peralihan titik simpul elemen

$\{r\}$ = vektor beban titik simpul elemen.

2.10.2 Teori Elastisitas

Teori elastisitas telah banyak membantu dalam memahami metode elemen hingga. Gaya gaya benda F_x dan F_y mempunyai dimensi gaya persatuan volume dan berasal dari gravitasi, percepatan, medan magnetik, dan lain lain. Pada umumnya tegangan merupakan fungsi dari koordinat. Keseimbangan gaya gaya dalam arah x harus terpenuhi

$$\sigma_x t - \tau_{xy} dx + (\sigma_x + \sigma_{x,x} dx) t dy + (\tau_{xy} + \tau_{xy,y} dy) t dx + F_x t dx dy = 0 \dots \dots \dots (2.14)$$

Keterangan :

σ_x = Tegangan Normal arah sumbu x (MPa)

τ_{xy} = Tegangan Geser arah bidang xy (MPa)

F_x = Gaya (N)

Dalam arah y pun harus terpenuhi persamaan keseimbangannya. Keduanya diperlihatkan dalam bentuk yang lebih sederhana. Dalam tiga dimensi vektor gaya badan adalah :

$$\{F\} = \{F_x F_y F_z\} \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan :

$\{F\}$ = vektor gaya (N)

$\{F_x\}$ = vektor gaya sumbu x (N)

$\{F_y\}$ = vektor gaya sumbu y (N)

$\{F_z\}$ = vektor gaya sumbu z (N)

Dan persamaan differensial kesetimbangannya adalah :

$$\sigma_{x,x} + \tau_{xy,y} + \tau_{zx,z} + F_x = 0 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\tau_{xy,x} + \sigma_{y,y} + \tau_{yz,z} + F_y = 0 \dots\dots\dots (2.17)$$

$$\tau_{zx,x} + \tau_{yz,y} + \sigma_{z,z} + F_z = 0 \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan :

σ_x = Tegangan Normal arah sumbu x (MPa)

σ_y = Tegangan Normal arah sumbu y (MPa)

σ_z = Tegangan Normal arah sumbu z (MPa)

τ_{xy} = Tegangan Geser arah bidang xy (MPa)

τ_{zx} = Tegangan Geser arah bidang zx (MPa)

τ_{yz} = Tegangan Geser arah bidang yz (MPa)

F_x = Gaya sumbu x (MPa)

F_y = Gaya sumbu y (MPa)

F_z = Gaya sumbu z (MPa)

Jika elemen diadakan berdasarkan medan peralihan, yang berarti peralihan titik kumpul merupakan anu utama, maka kondisi keserasian akan terpenuhi di dalam elemen. Jika medan yang dipilih sesuai, akan berarti juga ada keserasian antara elemen, juga memenuhi kondisi batas peralihan. Persamaan keseimbangan dan kondisi batas mengenai tegangan yang diperoleh hanya merupakan pendekatan.

2.11 *Software Solidwork*

Solidwork adalah paket perangkat lunak pemodelan 3D yang cocok untuk sistem operasi *windows*. Karena penggunaan dan kinerjanya menjadi semakin populer di kalangan pengguna. Kelebihan dari *software solidwork* adalah bahasa komunikasi yang sederhana dan presentasi yang jelas tentang langkah-langkah dalam perencanaan serta dalam transformasi (Duhovnik dkk., 2015).

2.12 *Software Ansys*

Ansys adalah suatu program komputer yang bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan keteknikan menggunakan metode elemen hingga. Tahun 1971, *software* ini baru pertama kali dirilis. *Software* ini dapat memecahkan berbagai permasalahan seperti analisis *static* dan *dynamic*, perpindahan panas, aliran fluida dan elektromagnetisme. Sampai saat ini *Software*

Ansysis sudah banyak digunakan di bidang teknik seperti kedirgantaraan, otomotif, elektronik, dan nuklir.

Software Ansys memiliki dua level dasar yaitu level *begin* dan *processor*. Pertama kali masuk program ansys akan berada di level *begin*. Pada level *begin* dapat memasukkan salah satu *processor*. *Processor* adalah kumpulan fungsi dan routine untuk melakukan tujuan tertentu. Terdapat tiga *processor* yang sering digunakan yaitu *preprocessor*, *processor*, dan *general postprocessor*.

2.12.1 Combined Stress

Tegangan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) dapat dihitung dari beberapa komponen tegangan dengan cara persamaan kubik sebagai berikut :

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots (2.19)$$

Keterangan :
 $\sigma_0, \sigma_x, \sigma_y, \text{ dan } \sigma_z$ = Tegangan Utama (MPa)

Tiga tegangan utama diberi simbol $\sigma_1, \sigma_2, \text{ dan } \sigma_3$. Tegangan utama tersebut dapat diurutkan apabila σ_1 , tegangan utama bernilai positif yang mengalami tarikan dan σ_3 , tegangan utama bernilai negatif yang mengalami tekanan. Intensitas tegangan, σ_1 adalah nilai yang terbesar dari nilai absolut ($\sigma_1 - \sigma_2, \sigma_2 - \sigma_3, \sigma_3 - \sigma_1$) maka

$$\sigma_1 = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \dots\dots\dots (2.20)$$

Persamaan tegangan von mises atau *Equivalent Stress*

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.21)$$

Keterangan :
 $\sigma_1, \sigma_2, \text{ dan } \sigma_3$ = Tegangan Utama (MPa)
 Atau

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)] \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.22)$$

Keterangan :
 $\sigma_x, \sigma_y, \text{ dan } \sigma_z$ = Tegangan Normal (MPa)
 $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \text{ dan } \sigma_{xz}$ = Tegangan Geser (MPa)

2.12.2 Kegagalan Tegangan Utama

Kegagalan tegangan utama dapat digunakan untuk menggambarkan kegagalan getas pada material. Inisiasi kegagalan didasarkan pada salah satu dari dua kriteria :

- a. Tegangan tarik utama maksimum
- b. Tegangan geser maksimum (berasal dari perbedaan maksimum tegangan utama)

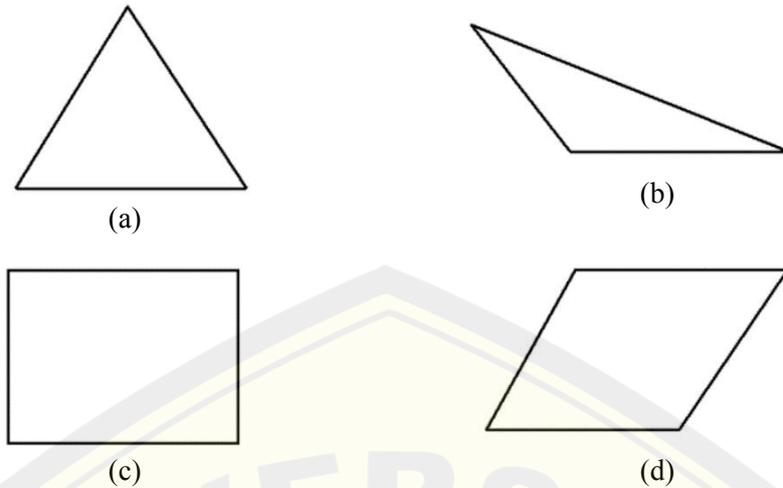
Kegagalan dimulai ketika salah satu dari kriteria di atas terpenuhi. Apabila model ini digunakan bersama dengan model plastisitas, sering disarankan untuk menonaktifkan kriteria tegangan geser maksimum dengan menetapkan nilai yang besar. Dalam hal ini respon geser akan ditangani oleh model plastisitas.

2.13 *Mesh Metric*

Pada ansys workbench terdapat juga *mesh metric* yang digunakan untuk melihat informasi *mesh* dan mengevaluasi kualitas *mesh*. *Mesh metric* terdiri dari : *Element Quality, Aspect Ratio for triangles or quadrilaterals, Jacobian Ratio, Warping Factor, Parallel Deviation, Maximum Corner Angle, Skewness, Orthogonal Quality, Characteristic Length, Minimum Tri Angle, Maximum Tri Angle, Minimum Quad Angle, Maximum Quad Angle, Warping Angle, Tet Collapse, Aspect Ratio, Minimum Element Edge Length, Maximum Element Edge Length* dan *Characteristic Length*. Saat memilih *Mesh Metric*, muncul nilai *Min, Max, Average*, dan *Standard Deviation* yang ditampilkan di *view detail* dan grafik batang. Pada penelitian ini jenis *mesh metric* yang dipilih yaitu *orthogonal quality* dan *skewness*

2.13.1 *Skewness*

Skewness adalah perbedaan antara bentuk *cell* dan bentuk *cell* sama sisi dengan volume yang setara. *Mesh metric* jenis *skewness* ini digunakan untuk menentukan seberapa dekat dengan bentuk ideal. *Cell* yang sangat miring dapat menurunkan akurasi dan mengacaukan solusi.



(a) *Ideal Triangle*; (b) *High Skewed Triangle*; (c) *Ideal Quadrilateral*; dan (f) *High Skewed Quadrilateral*

Gambar 2.13 Bentuk *Mesh Triangle* dan *Quadrilateral*

Tabel 2.2 Nilai *Skewness*

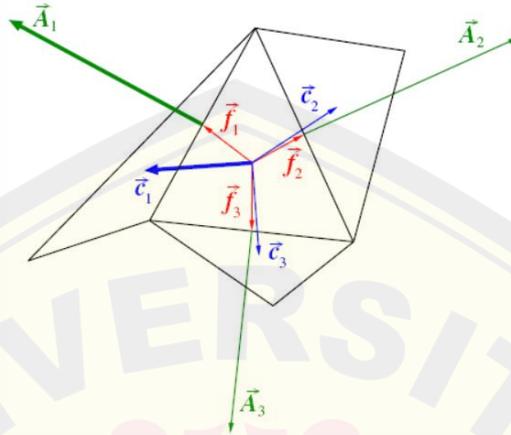
Nilai <i>Skewness</i>	Kualitas <i>Cell</i>
1	<i>Degenerate</i>
0,9 - 1	<i>Bad (silver)</i>
0,75 - 0,9	<i>Poor</i>
0,5 - 0,75	<i>Fair</i>
0,25 - 0,5	<i>Good</i>
0 - 0,25	<i>Excellent</i>
0	<i>Equilateral</i>

Pada tabel 2.2 menunjukkan bahwa nilai *skewness* sebesar 0 menghasilkan kualitas *cell* yang terbaik (*equilateral*) dan nilai *skewness* sebesar 1 menghasilkan kualitas *cell* yang terburuk (*degenerate*). *Face* dan *cell* yang sangat miring tidak dapat diterima karena persamaan yang diselesaikan mengasumsikan bahwa *cell* relatif sama. Ada dua metode untuk mengukur *skewness*, yaitu : berdasarkan volume sama sisi (hanya berlaku untuk mesh segitiga dan tetrahedral) dan deviasi dari sudut sama sisi yang dinormalisasi.

2.13.2 *Orthogonal Quality*

Orthogonal Quality untuk *cell* dihitung menggunakan vektor normal *face*, \vec{A}_i untuk setiap *face*; \vec{C}_i vektor dari *centroid cell* ke *centroid* dari masing-masing

cell yang berdekatan, \vec{f}_i dan vektor dari *centroid cell* ke masing-masing *face*. Gambar 2.14 mengilustrasikan vektor-vektor yang digunakan untuk menentukan kualitas ortogonal sebuah sel.



Gambar 2.14 Vektor *Orthogonal Quality*

Untuk setiap *face*, kosinus dari sudut antara \vec{A}_i dan \vec{c}_i , dan antara \vec{A}_i dan \vec{f}_i , dihitung. Nilai kosinus yang terkecil adalah ortogonalitas *cell*. Jadi *orthogonal quality* tergantung pada jenis *cell*:

- a. Untuk sel tetrahedral, prisma, dan piramida, *orthogonal quality* adalah minimum dari ortogonalitas dan (1 - kemiringan sel)
- b. Untuk sel heksahedral dan polihedral, *orthogonal quality* sama dengan ortogonalitas.

Tabel 2.3 Nilai *Orthogonal Quality*

Nilai <i>Orthogonal Quality</i>	Kualitas <i>Cell</i>
1	<i>Equilateral</i>
0,9 - 1	<i>Excellent</i>
0,75 – 0,9	<i>Good</i>
0,5 – 0,75	<i>Fair</i>
0,25 – 0,5	<i>Poor</i>
0 – 0,25	<i>Bad (silver)</i>
0	<i>Degenerate</i>

Pada tabel 2.3 menunjukkan bahwa nilai *orthogonal quality* sebesar 1 menghasilkan kualitas *cell* yang terbaik (*equilateral*) dan nilai *orthogonal quality* sebesar 0 maka kualitas *cell* yang terburuk (*degenerate*). Nilai minimum *orthogonal quality* untuk semua jenis *cell* harus lebih dari 0,01 dengan nilai rata rata yang jauh lebih tinggi.

2.14 Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka diperoleh hipotesis bahwa rangka *prototype* mobil listrik TITEN masih dalam kondisi aman. Karena nilai tegangan utama maksimum dan minimum masih di bawah nilai *tensile ultimate strength* dan *compressive ultimate strength* pada material alumunium 6061. Terdapat hubungan antara hasil simulasi metode elemen hingga pada *software* Ansys Workbench dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan alat ukur *strain gauge*.

BAB 3. METODOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Rekayasa Mekanik dan Laboratorium Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Jember. Waktu penelitian dilaksanakan dalam jangka waktu 3 bulan yaitu dimulai dari April sampai Juni 2022.

3.2 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan alat dan *software* pendukung dengan spesifikasi sebagai berikut :

- a. Komputer untuk pemodelan 3 dimensi dan menjalankan simulasi elemen hingga dengan spesifikasi sebagai berikut :
 - 1) Prosesor : *Intel Core i3*
 - 2) RAM : 4 GB
 - 3) Tipe Sistem : *64-bit*
 - 4) HDD : 1 TB
- b. *Software* Solidwork 2017 untuk pemodelan 3 dimensi,
- c. *Software* Ansys Workbench 2021 untuk menjalankan simulasi metode elemen hingga.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yang diuraikan sebagai berikut :

3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dari berbagai buku, jurnal ilmiah dan hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan perancangan dan simulasi rangka kendaraan listrik.

3.3.2 Pemodelan Rangka dengan *Software* Solidwork

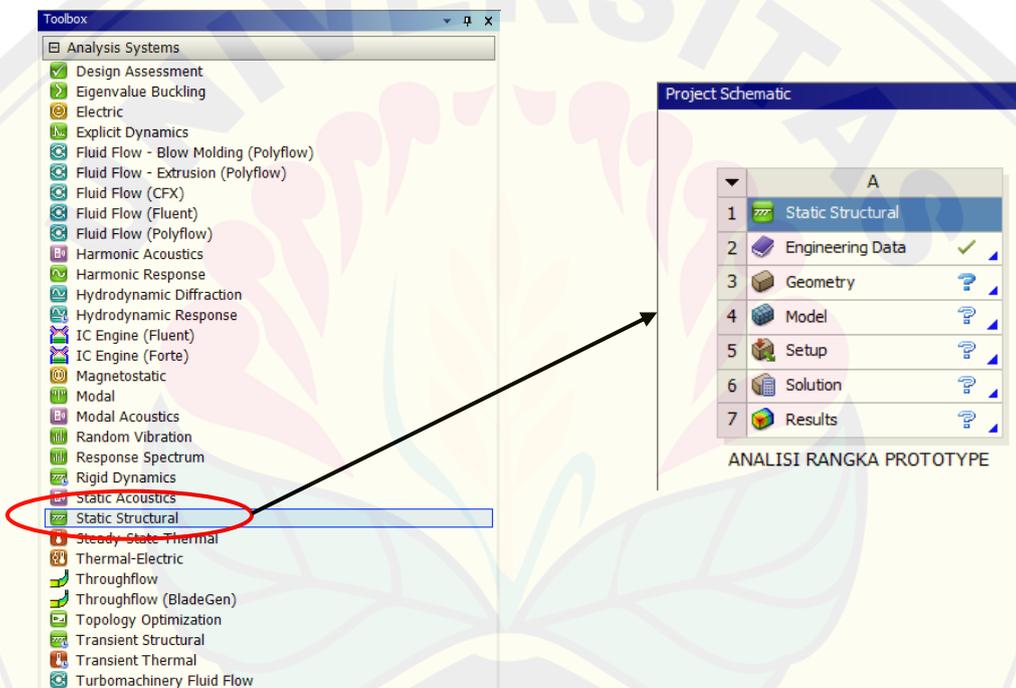
Pemodelan 3 dimensi menggunakan *software* Solidwork 2017 melalui tahapan sebagai berikut :

3.3.3 Simulasi Dengan *Software* Ansys Workbench

Simulasi metode elemen hingga menggunakan *software* Ansys Workbench 2021 dapat dilakukan melalui tahapan sebagai berikut (ANSYS, 2021) :

1) Membuat *system analysis*

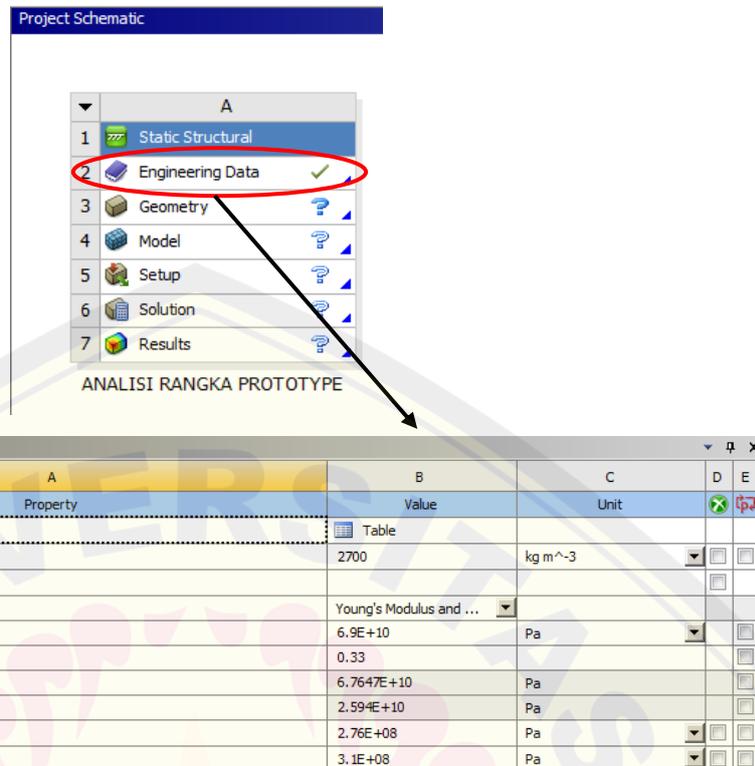
Penelitian ini melakukan analisis tegangan utama pada rangka. Maka analisis sistem yang dipilih adalah analisis *Static Structural*. *Static Structural System* menentukan *displacement*, tegangan, regangan dan gaya pada struktur atau komponen yang disebabkan oleh beban. Beban dan respon struktur diasumsikan berubah secara perlahan terhadap waktu (Canonsburg, 2022).



Gambar 3.3 Pemilihan Analisis Sistem

2) Menentukan *engineering system*

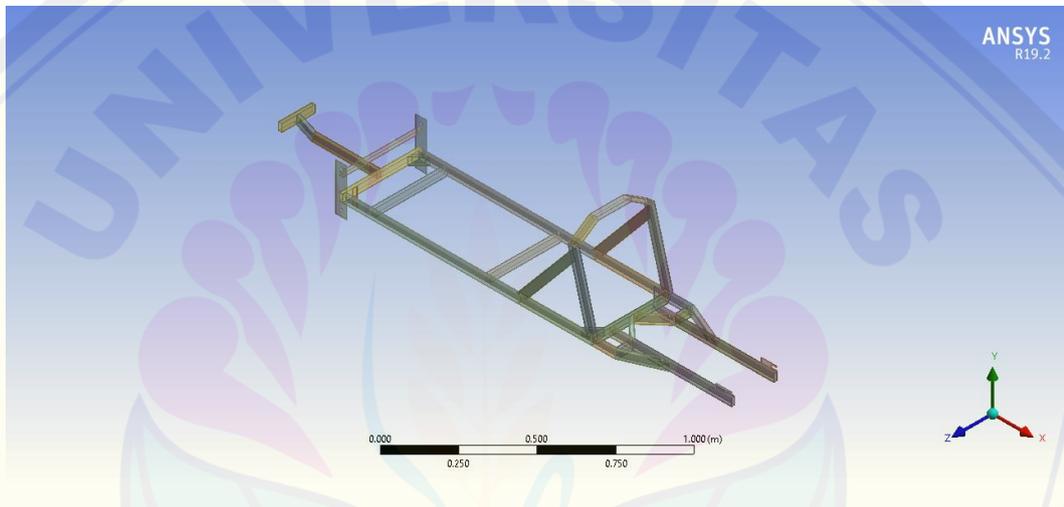
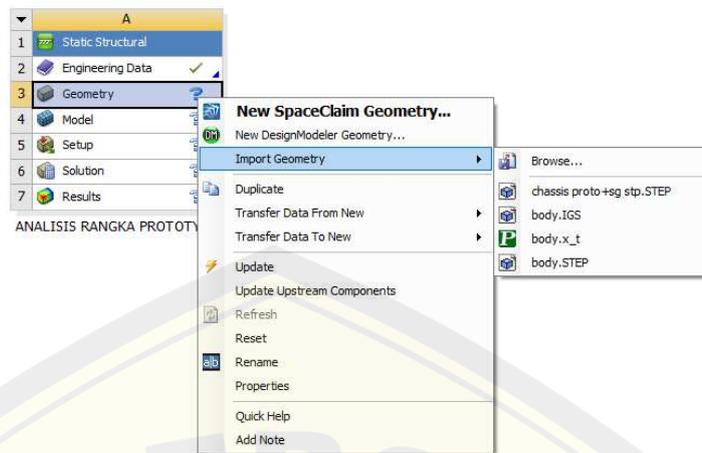
Tahap selanjutnya adalah memasukkan data spesifikasi material yang akan digunakan dalam simulasi. Material yang digunakan disesuaikan dengan material rangka pada kenyataannya yaitu aluminium 6061-T6. Di dalam *software* ini tidak terdapat data material aluminium 6061-T6. Maka dapat di masukkan secara manual spesifikasi material dalam *software*.



Gambar 3.4 engineering system

3) Attach Geometry

Melampirkan geometri di dalam *software* ini dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu pembuatan geometri langsung di dalam *software* dan import geometri dari *software* lain. Pada penelitian ini melakukan *import* geometri rangka dari *software* solidwork 2017.



Gambar 3.5 *Import* geometri rangka

4) Menentukan *Part Behavior*



Gambar 3.6 Menentukan Part Behavior

Tahap selanjutnya adalah mengakses pengaturan yang terkait dengan part behavior dengan mengklik kanan pada sel Model dalam skema sistem analisis dan memilih Edit. Aplikasi Mekanik terbuka dengan lingkungan yang mewakili sistem analisis yang ditampilkan di bawah objek Model di pohon seperti Gambar 3.6. di dalam sel model ini dapat mengatur jenis material yang akan dipakai dan mengatur *coordinate system*.

5) Menentukan *Connection*

Tahap selanjutnya adalah menerapkan koneksi ke bodi dalam model sehingga mereka terhubung sebagai satu unit dalam menopang beban yang diterapkan untuk analisis. Pada simulasi ini fitur koneksi yang digunakan adalah *contact*.

6) *Apply Mesh Control* dan *preview mesh*

Meshing adalah proses di mana geometri akan didiskritisasi secara spasial menjadi elemen dan node. *Mesh* ini bersama dengan sifat material yang digunakan secara matematis mewakili kekakuan dan distribusi massa struktur. Model secara otomatis menyatu pada waktu penyelesaian. Ukuran elemen *default* ditentukan berdasarkan sejumlah faktor termasuk ukuran model keseluruhan, kedekatan topologi lain, kelengkungan bodi, dan kompleksitas fitur.

7) Menetapkan *Analysis Settings*

Setiap jenis analisis mencakup sekelompok pengaturan analisis yang memungkinkan untuk menentukan berbagai opsi solusi yang disesuaikan dengan jenis analisis tertentu, seperti defleksi besar untuk analisis tegangan. Nilai *default* disertakan untuk semua pengaturan. Sehingga dapat menerima nilai *default* ini atau mengubahnya sebagaimana berlaku.

8) *Apply Loads* dan *Support*

Tahap selanjutnya adalah menerapkan pembebanan dan tumpuan berdasarkan jenis analisis. Misalnya, analisis tegangan mungkin melibatkan tekanan dan gaya untuk beban, dan perpindahan untuk tumpuan.

9) *Solve*

Mechanical menggunakan *solver kernels* yang sama yang digunakan Ansys Mechanical APDL (MAPDL). Pada langkah *solve, mechanical* meneruskan

datanya ke *solver kernels* MAPDL yang sesuai, berdasarkan jenis analisis yang akan dilakukan. Kernel itu kemudian meneruskan data solusi kembali ke *mechanical*. Karena *solver kernels* yang sama digunakan, akan mendapatkan hasil yang sama dari *mechanical* yang dilakukan jika melakukan analisis yang sama di MAPDL.

3.3.4 Analisis hasil penelitian

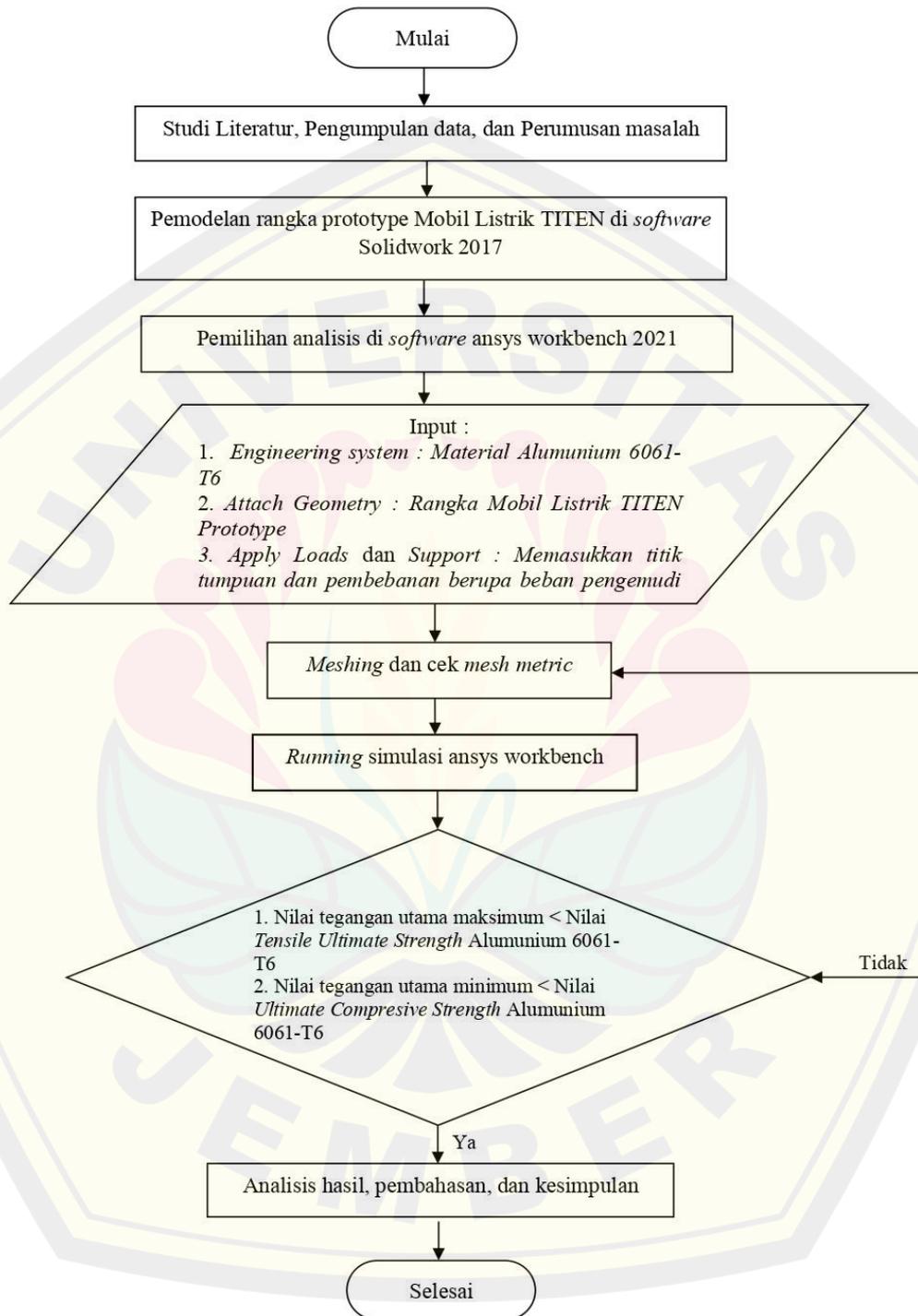
Data yang dihasilkan dari simulasi berupa besar nilai tegangan utama dan perbandingan nilai tegangan utama dari hasil simulasi metode elemen hingga menggunakan *software* Ansys Workbench dan penelitian sebelumnya yang menggunakan alat ukur *strain gauge*.

3.3.5 Kesimpulan

Kesimpulan penelitian diperoleh berdasarkan studi literatur, kajian teori dan hasil simulasi.

3.4 Diagram Alir

Berikut adalah diagram alir penelitian :



Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian

3.5 Variabel Pengujian

3.5.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi atau menjadi penyebab terjadinya variabel lain. Variabel bebas pada penelitian ini sesuai dengan variabel bebas yang digunakan pada penelitian sebelumnya adalah beban pengemudi sebesar 45 kg dan 56 kg.

3.5.2 Variabel Terikat

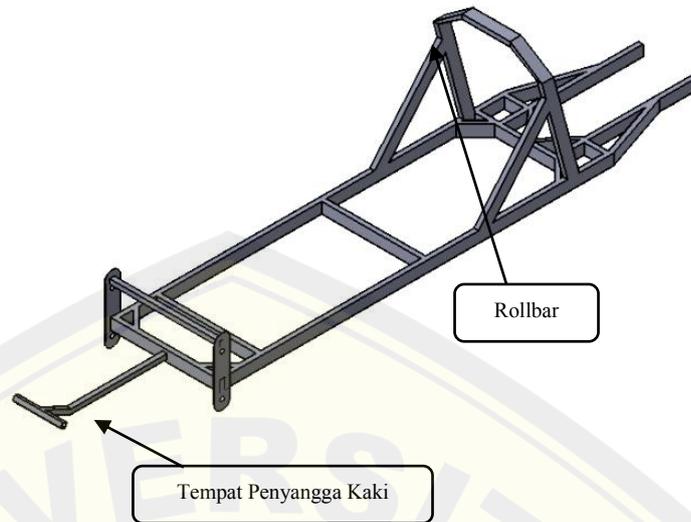
Variabel terikat adalah variabel yang menjadi akibat adanya variabel bebas. Variabel terikat yang berhubungan dengan penelitian ini adalah tegangan utama maksimum dan minimum.

3.5.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang dibuat konstan, sehingga hubungan variabel terikat dan variabel bebas tidak terpengaruh. Variabel kontrol pada penelitian ini yaitu :

1) Desain Rangka

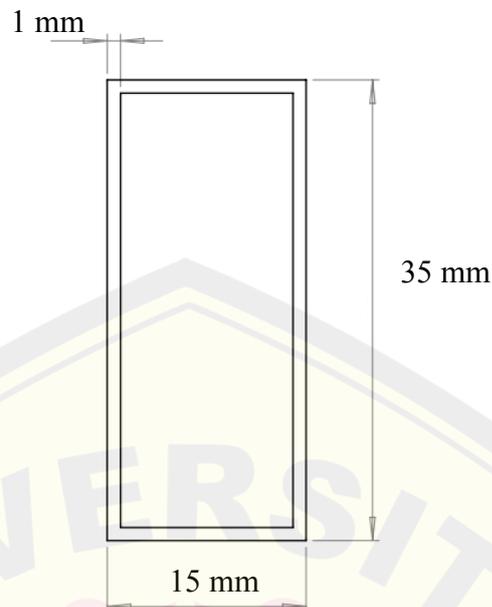
Desain rangka yang digunakan sesuai dengan rangka mobil listrik tipe *prototype* pada kenyataannya. Seperti Gambar 3.8 ,rangka yang digunakan jenis rangka *ladder frame*. Selain itu terdapat komponen tambahan pada rangka seperti tempat penyangga kaki dan rollbar.



Gambar 3.8 Desain Rangka Mobil Listrik TITEN Tipe *Prototype*

2) Geometri Penampang Rangka

Penampang rangka yang digunakan pada rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype* adalah *rectangular hollow*. Dimensi *rectangular hollow* sebesar 15 mm x 35 mm dengan ketebalan sebesar 1 mm. Pada kenyataannya seluruh bagian rangka tidak menggunakan dimensi seperti Gambar 3.8. Tetapi pada pengujian ini seluruh rangka menggunakan dimensi *rectangular hollow*.



Gambar 3.9 Geometri Penampang Rangka

3) Material Rangka

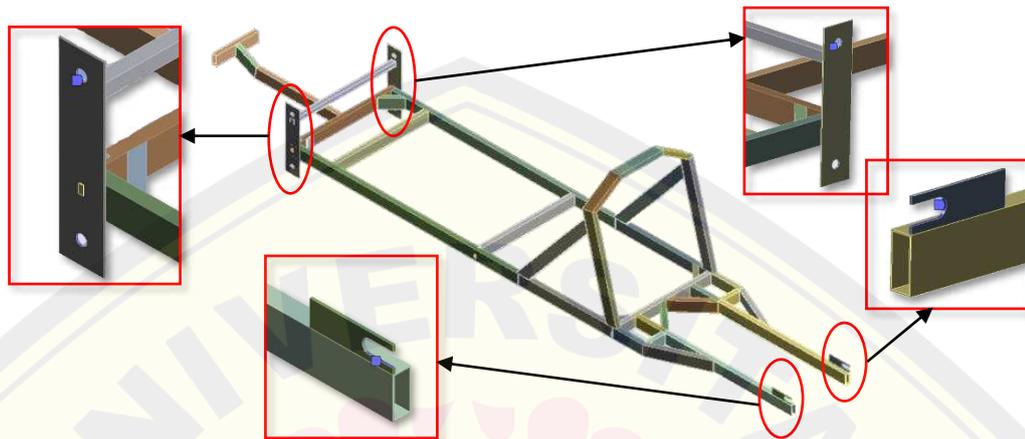
Pada rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype* pada pengujian ini menggunakan pipa *rectangular hollow* dengan jenis aluminium 6061. Pipa aluminium 6061 mempunyai sifat mampu las yang baik dan kepekaan terhadap las. Berikut Tabel 3.1 yang menunjukkan karakteristik dari pipa aluminium 6061

Tabel 3.1 Spesifikasi Material Aluminium 6061

No	Parameter	Nilai
1	<i>Tensile Ultimate Strength</i>	310 MPa
2	<i>Compressive Ultimate Strength</i>	142 MPa
3	<i>Shear Strength</i>	207 MPa
4	<i>Young's Modulus</i>	$6,9 \times 10^{10}$ Pa
5	<i>Yield Strength</i>	276 MPa
6	<i>Poisson's ratio</i>	0,33
7	<i>Mass density</i>	2700 kg/m ³

4) Titik Tumpuan

Titik tumpuan pada penelitian ini disesuaikan dengan penelitian sebelumnya oleh. Pada tahap menentukan titik tumpuan, menggunakan jenis *fix support* yang di letakkan di bagian bawah rangka.

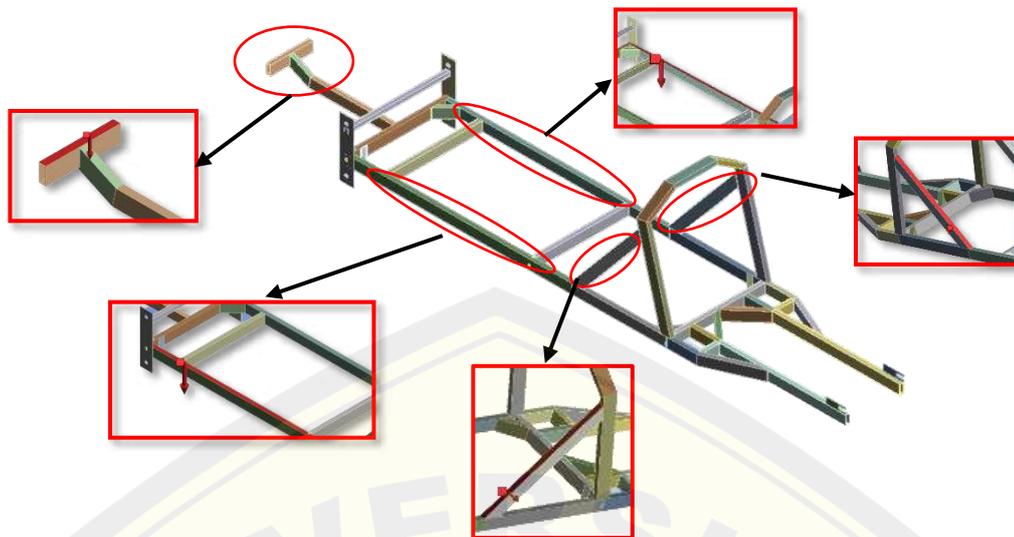


Gambar 3.10 Lokasi Titik Tumpuan

5) Titik Pembebanan

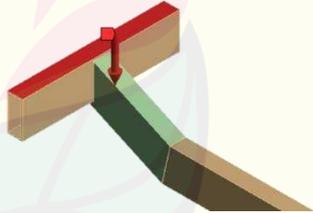
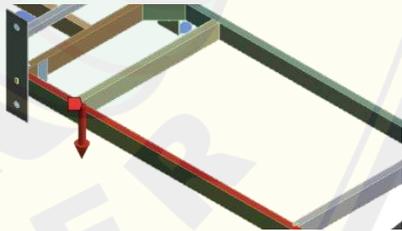
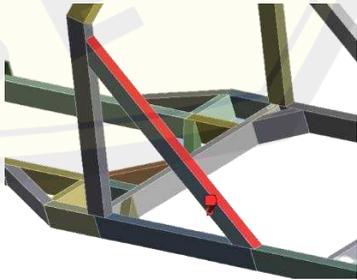
Titik pembebanan di simulasi ini menggunakan pembebanan distribusi merata. Maka menggunakan jenis *force* dengan sumbu -y untuk mengarahkan beban ke bawah. Pemilihan titik pembebanan sesuai dengan tempat pengemudi saat melakukan uji eksperimen.

Berikut Tabel 3.2 lokasi titik pembebanan pada rangka mobil listrik TITEN tipe *prototype* pada saat dilakukan pengujian di penelitian sebelumnya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.11 Lokasi Titik Pembebanan

Tabel 3.2 Lokasi Titik Pembebanan Pada Rangka

No	Jenis Beban	Massa (kg)	Gaya vertikal (N)	Titik Lokasi
Pengemudi 1				
1	Kaki	7	72	
2	Pinggang	21	206	
3	Bahu dan Kepala	17	164	

Total	45	441
-------	----	-----

Pengemudi 2

4	Kaki	9	89
---	------	---	----

5	Pinggang	26	256
---	----------	----	-----

6	Bahu dan Kepala	21	204
---	--------------------	----	-----

Total	56	549
-------	----	-----



3.6 Pengambilan Data

Pengambilan data dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Jember. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1) Dimensi rangka

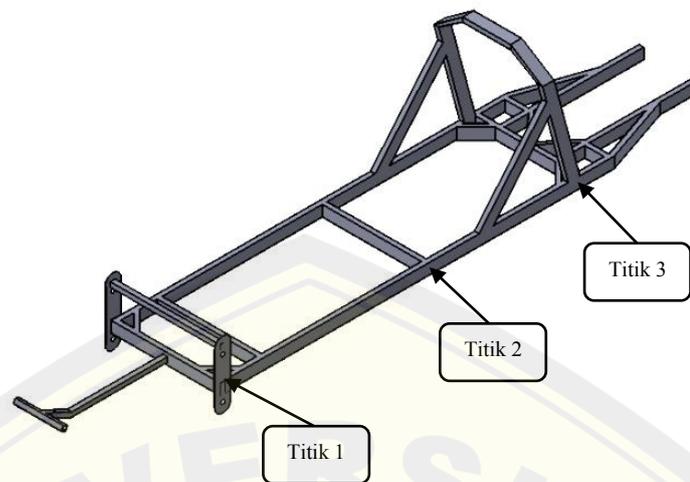
Pengambilan dimensi rangka dilakukan dengan cara diukur langsung menggunakan alat ukur.

2) Beban pada rangka

Beban yang digunakan pada penelitian ini adalah beban pengemudi saja. Karena pada penelitian sebelumnya cuma menggunakan variasi beban pengemudi.

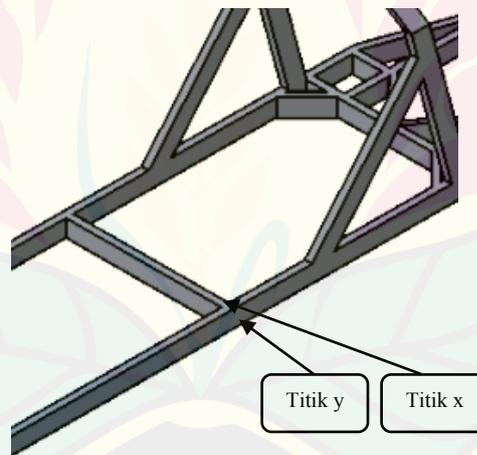
3) Lokasi Titik Penempelan *Strain Gauge*

Pada penelitian sebelumnya menganalisis tegangan utama menggunakan alat ukur *strain gauge*. *Strain gauge* ditempelkan pada *rangka* di 3 titik yang dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.12 Lokasi Titik Penempelan Strain Gauge

Setiap titik terdapat 2 titik lagi tempat penempelan *strain gauge* seperti Gambar 3.11. Titik tersebut untuk mengukur tegangan normal pada sumbu x dan sumbu y. Maka total titik penempelan alat ukur *strain gauge* sebanyak 6 titik.



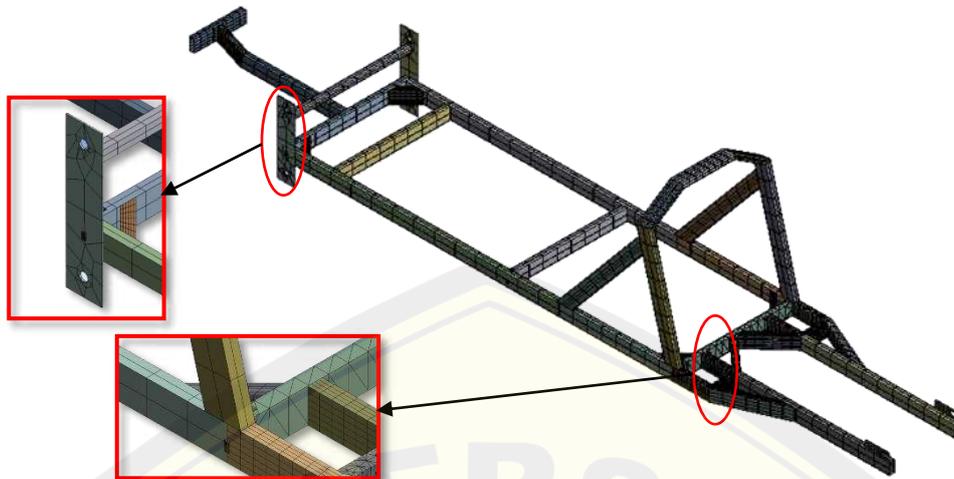
Gambar 3.13 Penempelan *Strain Gauge* Pada Sumbu x dan y

3.7 Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari hasil simulasi pada *software* Ansys Workbench 2021. Data tersebut akan dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya dan dihitung nilai simpangan. Selain disajikan angka, akan disajikan grafik perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil experiment untuk dapat ditarik kesimpulan.

Tabel 3.3 Parameter Data yang Ditentukan

		Simulasi		Penelitian Sebelumnya		Simpangan ($\Delta\%$)	
		45 Kg	56 Kg	45 Kg	56 Kg	45 kg	56 kg
	x_1						
	y_1						
Tegangan Normal (MPa)	x_2						
	y_2						
	x_3						
	y_3						
Tegangan	Titik 1						
Geser (MPa)	Titik 2						
	Titik 3						
	Titik 1						
Tegangan Geser Maksimum (MPa)	Titik 2						
	Titik 3						
	Titik 1						
Tegangan Prinsipal Maksimum (MPa)	Titik 2						
	Titik 3						
	Titik 1						
Tegangan Prinsipal Minimum (MPa)	Titik 2						
	Titik 3						
	Titik 1						



Gambar 4.2 Hasil *mesh default*

Tabel 4.1 Kriteria *mesh default*

No	Kriteria	Keterangan
1	<i>Avg. Element Size (% of model size)</i>	<i>Default</i>
2	<i>Span angle center</i>	<i>Coarse</i>
3	<i>Bouding Box Diagonal</i>	2080,2 mm ²
4	<i>Avg Surface Area</i>	4,25E-003 m ²
5	<i>Minimum Edge Length</i>	1E-003 m
6	<i>Nodes</i>	34551
7	<i>Element</i>	9555

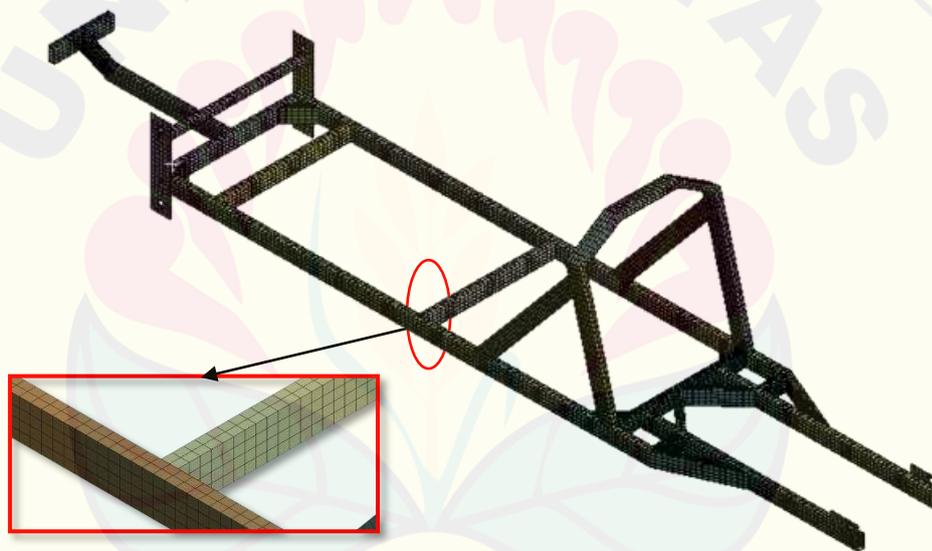
Tabel 4.2 Data *mesh metric mesh default*

No	<i>Mesh Metric</i>	Jenis	Keterangan
1	<i>Skewness</i>	<i>Min</i>	1,30E-010
		<i>Max</i>	0,99
		<i>Avg</i>	0,82
2	<i>Orthogonal Quality</i>	<i>Min</i>	6,17E-005
		<i>Max</i>	1
		<i>Avg</i>	0,25

Tabel 4.2 menunjukkan nilai *mesh metric* dari *mesh default*. Data yang didapatkan adalah nilai rata rata *skewness* dan *orthogonal quality* berturut turut sebesar 0,82 dan 0,25. Menurut Klyuyev dkk., (2021) bahwa rekomendasi nilai

skewness sebesar $< 0,80$ dan nilai *orthogonal quality* sebesar $> 0,20$. Sesuai dengan Tabel 2.2 nilai *skewness* dan *orthogonal quality* berada direntang *poor*. Maka dari data yang diperoleh adalah nilai *mesh metric default* masih kurang baik karena nilai *skewness* dan *orthogonal quality* berada di rentang *poor*.

Untuk memperbaiki nilai *mesh metric* maka dilakukan pengaturan ulang dengan cara mengubah ukuran *element mesh* dan bentuk *element mesh*. Menurut Sutisna dan Akbar (2019) bahwa ukuran *mesh* yang optimal untuk rangka mobil listrik sebesar 0,01 m. Maka dari itu ukuran *element mesh* diatur menjadi 10 mm dan bentuk *element mesh* diubah menjadi *hexagonal*. Hasil meshing ulang dapat dilihat pada Gambar 4.3 dengan kriteria *mesh* yang ditunjukkan pada Tabel 4.3



Gambar 4.3 Hasil *meshing* dengan *element mesh size* 10 mm dan jenis *element mesh hexagonal*

Tabel 4.3 Kriteria *mesh element mesh size* 10 mm dan jenis *element mesh hexagonal*

No	Kriteria	Keterangan
1	<i>Avg. Element Size (% of model size)</i>	10 mm
2	<i>Span angle center</i>	<i>Coarse</i>
3	<i>Bouding Box Diagonal</i>	2080,2 mm ²
4	<i>Avg Surface Area</i>	4,25E-003 m ²
5	<i>Minimum Edge Length</i>	1E-003 m
6	<i>Nodes</i>	81884
7	<i>Element</i>	15776

Tabel 4.4 Data *mesh metric mesh element mesh size* 10 mm dan jenis *element mesh hexagonal*

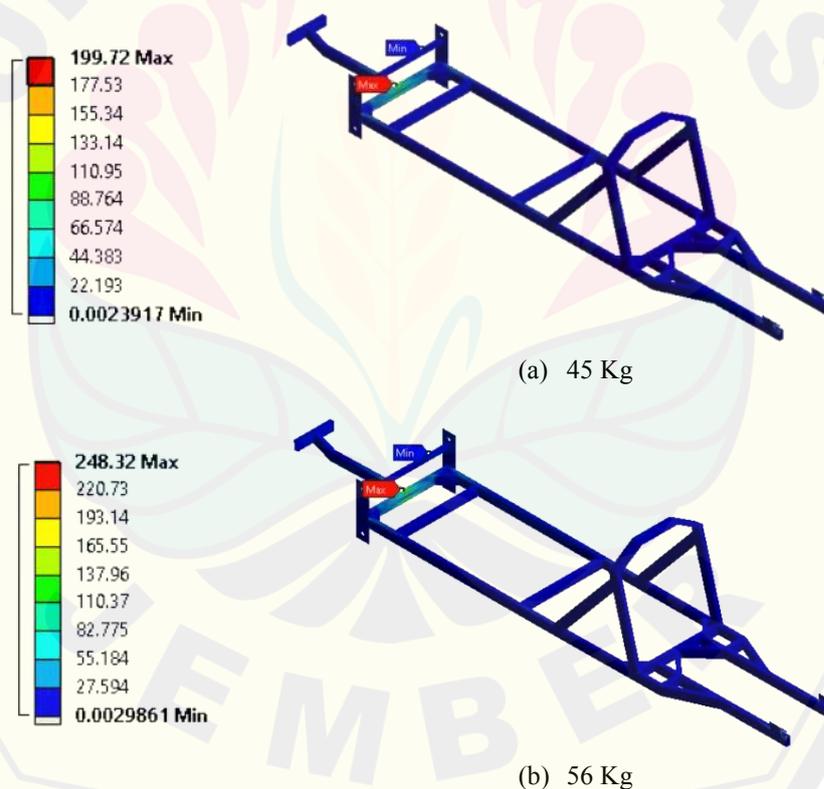
No	Mesh Metric	Jenis	Keterangan
1	<i>Skewness</i>	<i>Min</i>	1,30E-010
		<i>Max</i>	1
		<i>Avg</i>	0,66
2	<i>Orthogonal Quality</i>	<i>Min</i>	2,07E-008
		<i>Max</i>	1
		<i>Avg</i>	0,55

Tabel 4.4 menunjukkan nilai *mesh metric* dari proses *meshing* ulang. Data yang didapatkan adalah nilai rata rata *skewness* dan *orthogonal quality* berturut turut sebesar 0,66 dan 0,55. Nilai *orthogonal quality* dan *skewness* tidak melebihi melebihi batas yang sudah ditentukan. Sesuai dengan Tabel 2.2 dan 2.3 *orthogonal quality* dan *skewness* berada direntang *fair*. Kesimpulan dari perbaikan nilai *quality mesh* adalah ukuran *element mesh* sebesar 10 mm dan bentuk *element mesh hexagonal* dapat menghasilkan nilai *mesh metric* yang baik. Sehingga dapat digunakan dalam proses *meshing* pada penelitian ini.

4.2 Analisis Static Structural Pada Rangka

Pada analisis *static structural* ini dilakukan simulasi metode elemen hingga pada rangka prototipe mobil listrik TITEN dengan jenis pembebanan statis untuk mencari nilai tegangan von mises, deformasi, *safety factor*, tegangan utama maksimal, tegangan utama minimal, dan tegangan geser maksimal. Variasi pembebanan statis berupa beban penumpang yaitu 45 kg dan 56 kg.

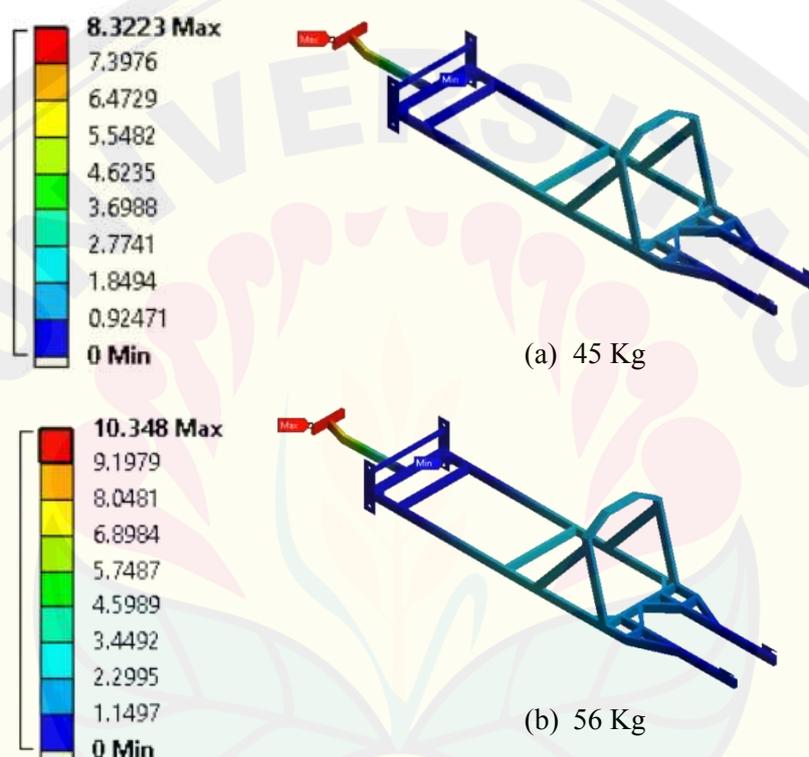
Gambar 4.3 menunjukkan hasil tegangan *von mises* pada rangka dengan variasi beban penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg. Pada beban penumpang 45 kg seperti Gambar 4.3 (a) nilai tegangan *von mises* maksimal sebesar 199,72 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Pada beban penumpang 56 kg seperti Gambar 4.3 (b) nilai tegangan *von mises* maksimal sebesar 248,32 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Berdasarkan konsep dasar tegangan *von mises* adalah kemampuan struktur untuk menahan beban yang diberikan (Ary dkk., 2020). Hasil tegangan *von mises* maksimal yang dihasilkan masih di bawah kekuatan luluh atau *yield strength* material aluminium 6061-T6 yang ditampilkan pada Tabel 3.1. Kesimpulan dari data ini adalah rangka tidak mengalami kegagalan struktur pada simulasi ini.



Gambar 4.4 hasil tegangan *von mises*

Gambar 4.4 menunjukkan hasil total deformasi pada rangka dengan variasi beban penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg. Pada beban penumpang 45 kg seperti

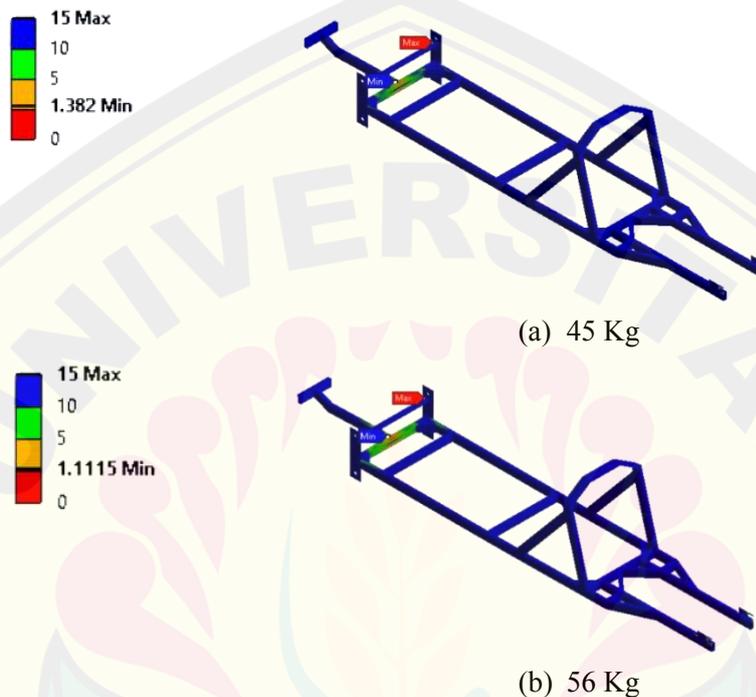
Gambar 4.4 (a) nilai deformasi maksimal sebesar 8,32 mm yang terletak di bagian batang penyangga kaki. Pada beban penumpang 56 kg seperti Gambar 4.4 (b) nilai deformasi maksimal sebesar 10,34 mm yang terletak di bagian batang penyangga kaki. Kesimpulan dari simulasi ini adalah total deformasi pada rangka prototipe mobil listrik TITEN yang diakibatkan dari beban penumpang 45 kg dan 56 kg masih dalam kondisi aman. Karena hasil total deformasi pada rangka masih relative kecil.



Gambar 4.5 Hasil Deformasi

Gambar 4.5 menunjukkan hasil *safety factor* pada rangka dengan variasi beban penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg. Pada beban penumpang 45 kg seperti Gambar 4.5 (a) nilai *safety factor* minimum sebesar 1,38 yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Pada beban penumpang 56 kg seperti Gambar 4.5 (b) nilai *safety factor* minimum sebesar 1,11 yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Menurut Wibawa (2019) faktor keamanan digunakan untuk

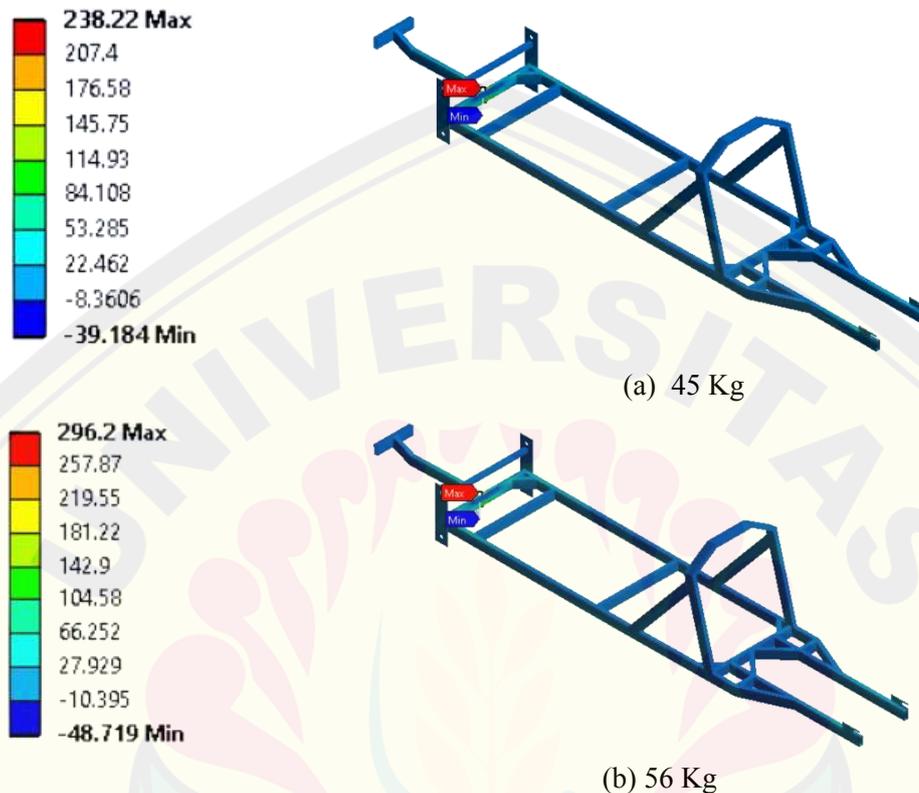
mengevaluasi keamanan komponen atau struktur. Nilai faktor keamanan menunjukkan kegagalan permanen apabila kurang dari 1. Hasil nilai *safety factor* yang dihasilkan dari simulasi ini masih di atas 1. Kesimpulan dari analisis *safety factor* ini adalah rangka *prototype* mobil listrik TITEN masih dikatakan aman pada saat menerima beban penumpang 45 kg dan 56 kg



Gambar 4.6 Hasil *Safety Factor*

Gambar 4.6 menunjukkan hasil tegangan utama maksimum pada rangka dengan variasi beban penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg. Pada beban penumpang 45 kg seperti Gambar 4.6 (a) nilai tegangan utama maksimum sebesar 238,22 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Pada beban penumpang 56 kg seperti Gambar 4.6 (b) nilai tegangan utama maksimum sebesar 296,2 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Menurut Denny dkk. (2018) bahwa analisis tegangan utama perlu dilibatkan di lokasi pemasangan. Karena memastikan tidak terjadi kegagalan *fracture* apabila tegangan utama maksimum tidak melebihi tegangan tarik. Dari data yang sudah disajikan nilai tegangan utama maksimal tidak melebihi nilai *tensile ultimate strength* pada material

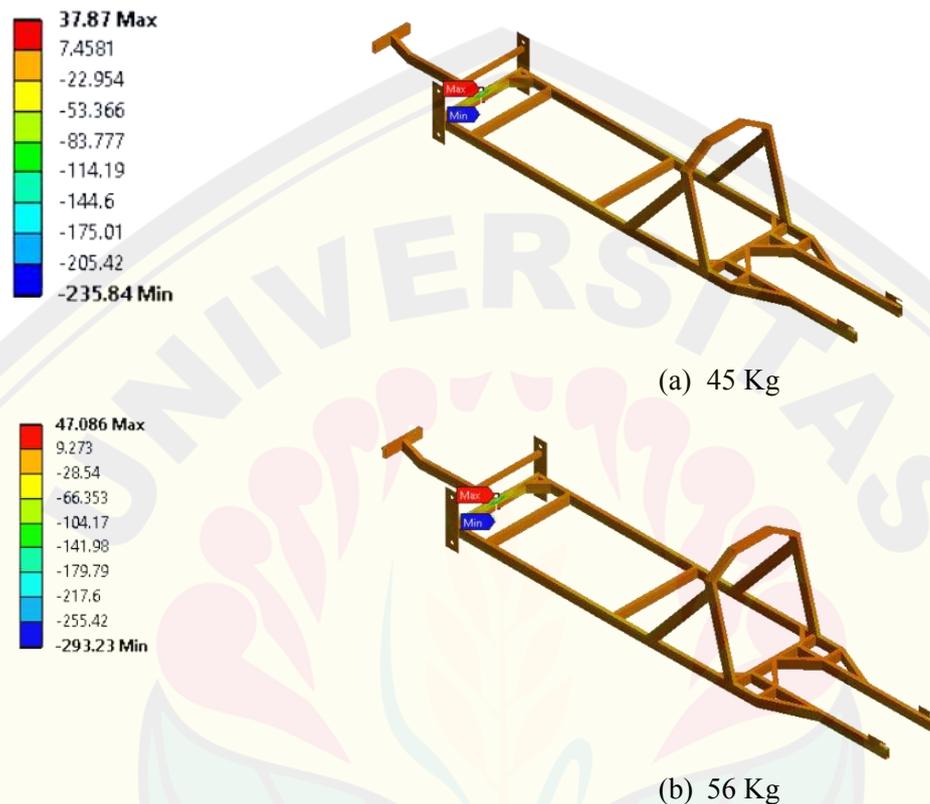
aluminium 6061-T6 yang ditampilkan di Tabel 3.1. Kesimpulan dari analisis tegangan utama maksimum ini adalah rangka prototipe mobil listrik TITEN masih dikatakan aman pada saat menerima beban penumpang 45 kg dan 56 kg



Gambar 4.7 Hasil Tegangan Utama Maksimum

Gambar 4.7 menunjukkan hasil tegangan utama minimum pada rangka dengan variasi beban penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg. Pada beban penumpang 45 kg seperti Gambar 4.7 (a) nilai tegangan utama minimum sebesar 37,87 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Pada beban penumpang 56 kg seperti Gambar 4.7 (b) nilai tegangan utama minimum sebesar 47,08 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Menurut Wibawa (2020) bahwa teori Mohr-Coulomb memprediksi kegagalan material getas dengan membandingkan tegangan utama maksimum dengan kekuatan tarik maksimum dan tegangan utama minimum dengan kekuatan tekan. Dari data yang sudah disajikan nilai tegangan utama minimum tidak melebihi nilai *compressive ultimate*

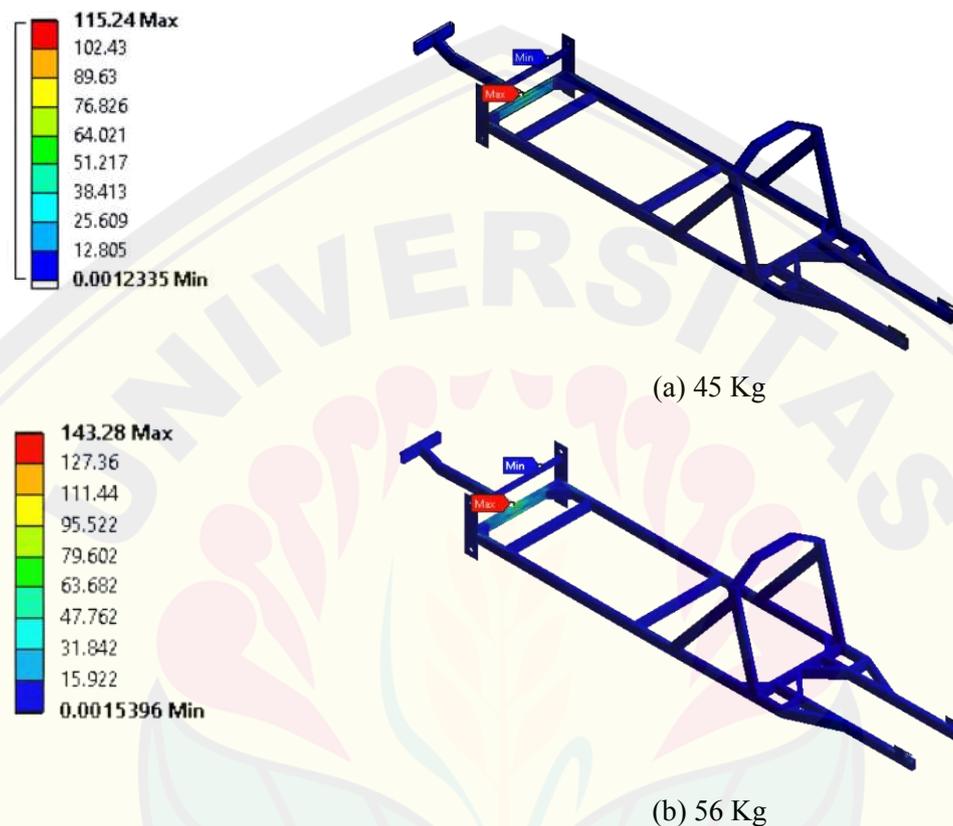
strength pada material aluminium 6061-T6 yang ditampilkan di Tabel 3.1. Kesimpulan dari analisis tegangan utama minimum ini adalah rangka prototipe mobil listrik TITEN masih dikatakan aman pada saat menerima beban penumpang 45 kg dan 56 kg



Gambar 4.8 Hasil Tegangan Utama Minimum

Gambar 4.8 menunjukkan hasil tegangan geser maksimum pada rangka dengan variasi beban penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg. Pada beban penumpang 45 kg seperti Gambar 4.8 (a) nilai tegangan geser maksimum sebesar 115,24 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Pada beban penumpang 56 kg seperti Gambar 4.8 (b) nilai tegangan geser maksimum sebesar 143,28 MPa yang terletak di bagian sambungan antara batang rangka dengan batang penyangga kaki. Menurut HPS dan Setiadi (2009) bahwa untuk mengetahui kekuatan tabung roket dengan membandingkan nilai tegangan geser maksimum dengan sifat mekanik material *Stainless Steel A-304*. Dari data yang sudah disajikan nilai tegangan geser

maksimum tidak melebihi nilai tegangan geser pada material alumunium 6061-T6 yang ditampilkan di Tabel 3.1. Kesimpulan dari analisis tegangan geser maksimum ini adalah rangka prototipe mobil listrik TITEN masih dikatakan aman pada saat menerima beban penumpang 45 kg dan 56 kg

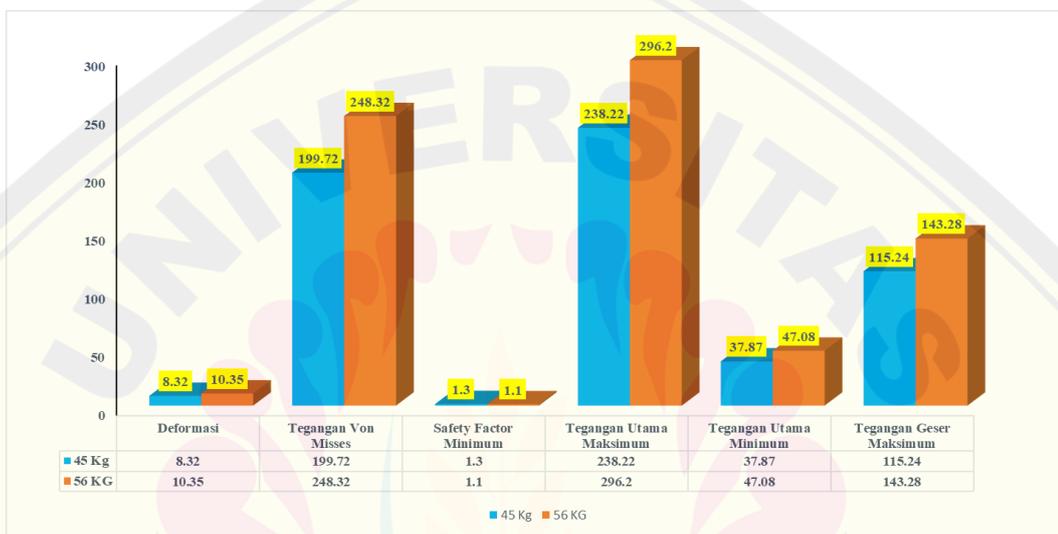


Gambar 4.9 Hasil Tegangan Geser Maksimum

Data yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3 sampai 4.8 merupakan perbandingan nilai hasil simulasi dengan sifat mekanik dari material alumunium 6061-T6. Perbandingan tersebut untuk mencari kekuatan pada rangka prototipe mobil listrik TITEN menggunakan metode elemen hingga. Kesimpulan dari data tersebut adalah kekuatan dari rangka prototipe masih dalam kondisi aman. Karena hasil nilai simulasi masih dibawah batas sifat mekanik dari material alumunium 6061-T6 yang digunakan pada rangka prototipe.

Pada kasus simulasi ini, rangka prototipe dengan beban penumpang 45 kg dan 56 kg mempunyai distribusi warna hasil simulasi yang seragam dan letak nilai

maksimum yang sama juga. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa Nilai Deformasi, tegangan von misses, safety factor minimum, tegangan utama maksimal, tegangan utama minimum, dan tegangan geser maksimum pada rangka dengan beban penumpang 56 Kg lebih besar dari pada nilai yang dihasilkan dari simulasi rangka prototipe dengan beban penumpang 45 Kg. Kesimpulan dari data simulasi ini adalah beban penumpang sangat mempengaruhi nilai hasil simulasi. Semakin besar beban penumpang maka semakin besar juga nilai hasil simulasi



Gambar 4.10 hasil simulasi dengan variasi beban penumpang

4.3 Analisis Perbandingan antara Hasil Simulasi dengan Penelitian Sebelumnya

Pada analisis ini dilakukan perbandingan hasil simulasi dengan penelitian sebelumnya yang sudah dilakukan. Persamaan persentase deviasi digunakan untuk menilai keakuratan model matematika yang digunakan. Berikut persamaan persentase deviasi sebagai berikut (Okokpujie dkk., 2017)

$$\Phi_i = \left(\frac{E_{a(p)} - E_{a(m)}}{E_{a(m)}} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (4.1)$$

Keterangan :

- Φ_i = Persentase deviasi
- $E_{a(p)}$ = Nilai hasil simulasi

$E_{a(m)}$ = Nilai hasil penelitian sebelumnya

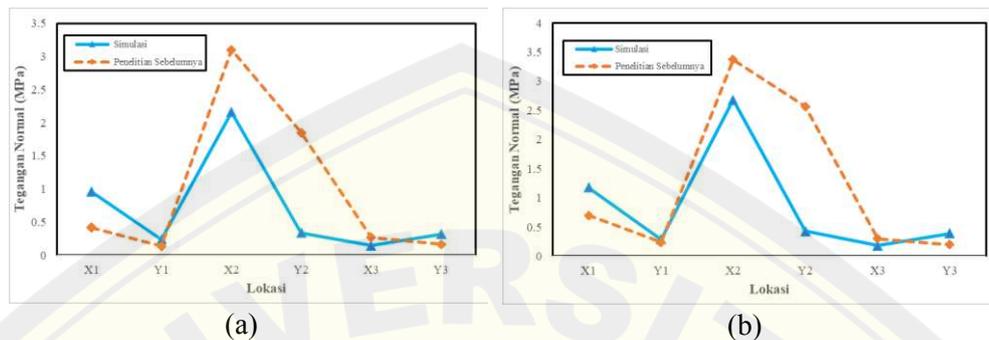
Pada penelitian ini, persamaan 4.1 digunakan untuk menghitung nilai simpangan antara hasil simulasi dan penelitian sebelumnya. $E_{a(p)}$ diasumsikan sebagai hasil simulasi dan $E_{a(m)}$ diasumsikan sebagai hasil penelitian sebelumnya. Perbandingan hasil simulasi dan penelitian sebelumnya ditunjukkan oleh Tabel 4.5

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Simulasi dan Penelitian Sebelumnya

		Simulasi		Penelitian Sebelumnya		Simpangan ($\Delta\%$)	
		45 Kg	56 Kg	45 Kg	56 Kg	45 kg	56 kg
Tegangan Normal (MPa)	x_1	0.960	1.180	0.42	0.7	129	69
	y_1	0.240	0.290	0.14	0.24	71	21
	x_2	2.160	2.680	3.1	3.37	30	20
	y_2	0.340	0.430	1.85	2.57	82	83
	x_3	0.150	0.180	0.27	0.3	44	40
	y_3	0.320	0.390	0.17	0.2	88	95
Tegangan Geser (MPa)	Titik 1	0.100	0.120	0.09	0.16	11	25
	Titik 2	0.003	0.004	0.68	0.76	100	99
	Titik 3	0.006	0.007	0.06	0.07	90	90
Tegangan Geser Maksimum (MPa)	Titik 1	4.900	6.100	0.17	0.28	2782	2079
	Titik 2	1.990	2.470	0.89	0.86	124	187
	Titik 3	0.510	0.630	0.08	0.09	538	600
Tegangan Prinsipal Maksimum (MPa)	Titik 1	17.720	22.000	0.45	0.75	3838	2833
	Titik 2	4.560	5.660	3.33	3.82	37	48
	Titik 3	1.560	1.940	0.3	0.33	420	488
Tegangan Prinsipal Minimum (MPa)	Titik 1	0.110	0.130	0.12	0.19	8	32
	Titik 2	0.200	0.240	1.54	2.11	87	89
	Titik 3	0.100	0.130	0.14	0.17	29	24

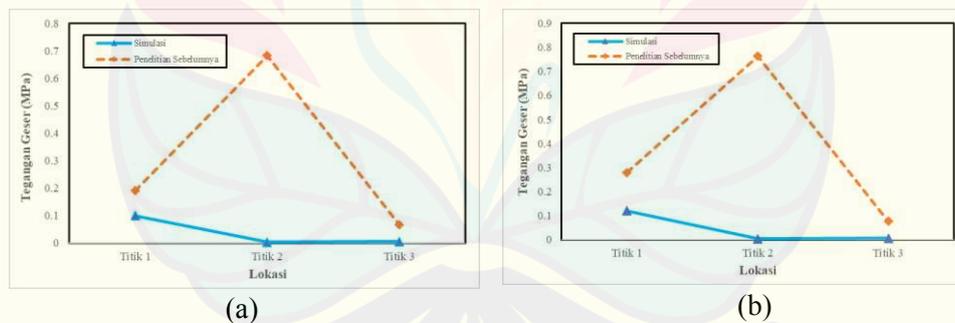
Gambar 4.10 menunjukkan grafik perbandingan nilai dari hasil simulasi dan penelitian sebelumnya oleh Mulyadi dkk (2022) pada rangka prototipe mobil listrik TITEN dengan variasi beban penumpang 45 kg dan 56 kg. Grafik yang disajikan dalam Gambar 4.11 berupa perbandingan beberapa nilai yang terjadi di lokasi berbeda seperti nilai tegangan normal, nilai tegangan geser, nilai tegangan

geser maksimum, nilai tegangan utama maksimum, dan nilai tegangan utama minimum. Pada grafik perbandingan, garis *continuous* dan warna biru menunjukkan nilai dari simulasi. Garis putus putus dan warna orange menunjukkan nilai dari penelitian sebelumnya.



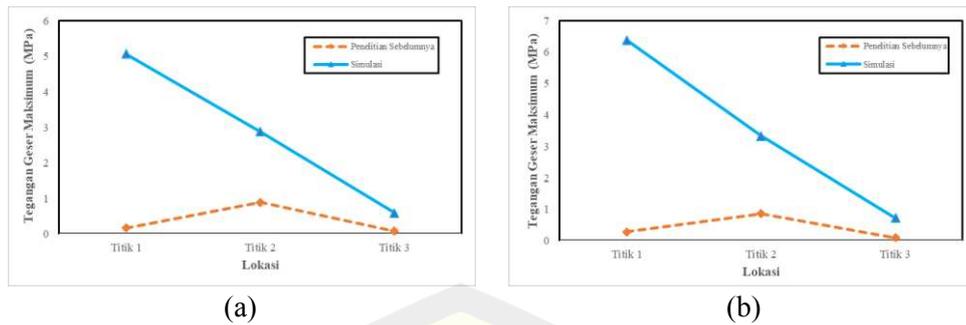
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Normal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya

Gambar 4.11 menunjukkan grafik perbandingan nilai hasil tegangan normal dari simulasi metode elemen hingga dan penelitian sebelumnya. Pada gambar 4.11 (a) nilai simpangan terbesar adalah 129% yang terletak di x_1 dan (b) nilai simpangan terbesar adalah 95% yang terletak di y_3 .



Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Geser Simulasi dan Penelitian Sebelumnya

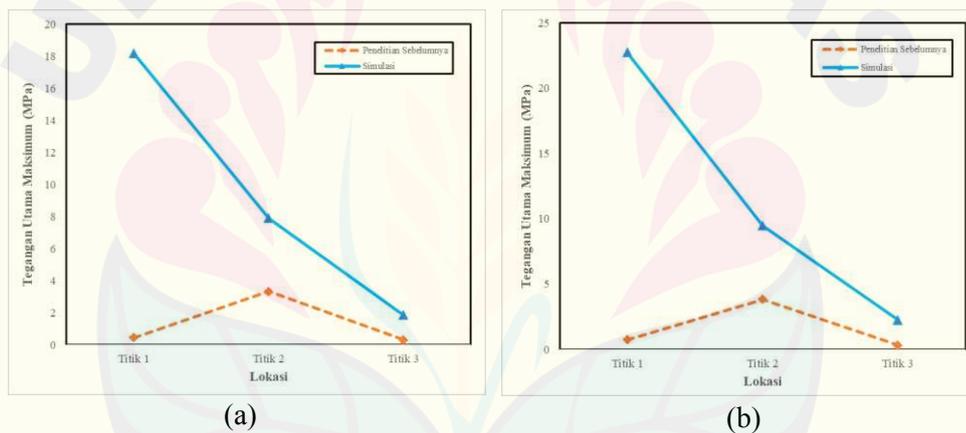
Gambar 4.12 menunjukkan grafik perbandingan nilai hasil tegangan geser dari simulasi metode elemen hingga dan penelitian sebelumnya. Pada gambar 4.12 (a) nilai simpangan terbesar adalah 100% yang terletak di titik 2 dan (b) nilai simpangan terbesar adalah 99% yang terletak di titik 2.



(a) dan (b) Tegangan Geser Maksimal 45 kg dan 56 kg

Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Geser Maksimal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya

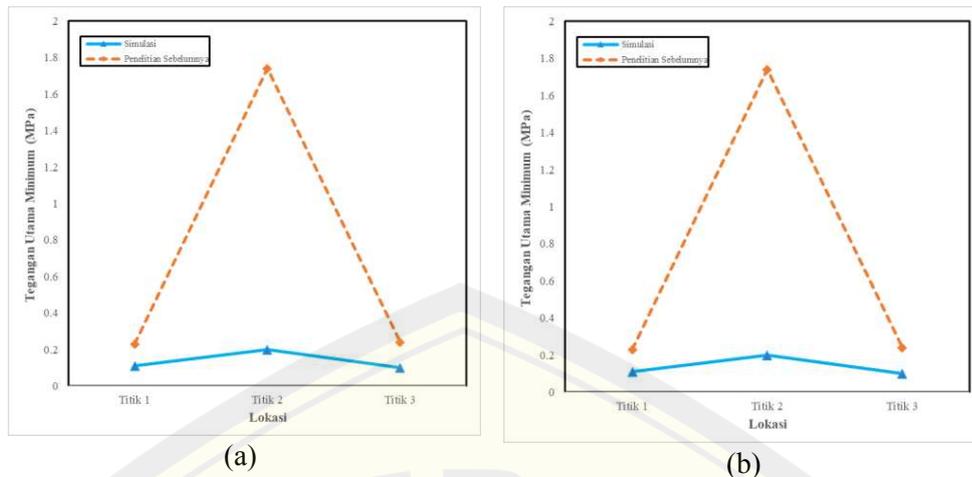
Gambar 4.13 menunjukkan grafik perbandingan nilai hasil tegangan geser maksimal dari simulasi metode elemen hingga dan penelitian sebelumnya. Pada gambar 4.13 (a) nilai simpangan terbesar adalah 2872% yang terletak di titik 1 dan (b) nilai simpangan terbesar adalah 2079% yang terletak di titik 1.



(a) dan (b) Tegangan Utama Maksimal 45 kg dan 56 kg

Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Utama Maksimal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya

Gambar 4.14 menunjukkan grafik perbandingan nilai hasil tegangan utama maksimal dari simulasi metode elemen hingga dan penelitian sebelumnya. Pada gambar 4.14 (a) nilai simpangan terbesar adalah 2838% yang terletak di titik 1 dan (b) nilai simpangan terbesar adalah 2833% yang terletak di titik 1.



(a) dan (b) Tegangan Utama Minimum 45 kg dan 56 kg

Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Hasil Tegangan Utama Minimal Simulasi dan Penelitian Sebelumnya

Gambar 4.15 menunjukkan grafik perbandingan nilai hasil tegangan utama minimal dari simulasi metode elemen hingga dan penelitian sebelumnya. Pada gambar 4.15 (a) nilai simpangan terbesar adalah 87% yang terletak di titik 2 dan (b) nilai simpangan terbesar 89% yang terletak di titik 2.

Seperti Gambar 4.5 dan Grafik 4.10 sampai 4.14 bahwa nilai simpangan dari perbandingan hasil simulasi dan penelitian sebelumnya masih relatif besar. Hal tersebut bisa terjadi karena mungkin *strain gauge* mengalami kerusakan pada saat proses pengukuran, muncul gelembung udara disekitar *strain gauge* dan terjadi gangguan saat proses pengukuran berlangsung (Zhuang dkk., 2019).

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai tegangan utama maksimum rangka *prototype* mobil listrik TITEN dengan pembebanan penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg yang dihasilkan dari metode elemen hingga menggunakan *software* ansys workbench masing masing adalah 282,22 MPa dan 296,2 MPa. Nilai tegangan utama minimum rangka *prototype* mobil listrik TITEN dengan pembebanan penumpang sebesar 45 kg dan 56 kg yang dihasilkan dari metode elemen hingga menggunakan *software* ansys workbench masing masing adalah 37,87 MPa dan 47,08 MPa. Rangka *prototype* mobil listrik TITEN masih dalam kondisi aman. Karena nilai tegangan utama maksimum dan minimum masih di bawah nilai *tensile ultimate strength* dan *compressive ultimate strength* pada material aluminium 6061.
2. Hasil perbandingan dari nilai simulasi dan penelitian sebelumnya adalah nilai simpangan masih relative besar. Hal tersebut bisa terjadi karena mungkin *strain gauge* mengalami kerusakan pada saat proses pengukuran, muncul gelembung udara disekitar *strain gauge* dan terjadi gangguan saat proses pengukuran berlangsung.

5.2 Saran

Penelitian ini perlu dikembangkan lagi agar mendapat hasil lebih optimal, maka saran yang bisa dijadikan pertimbangan penelitian selanjutnya yaitu :

1. Perlu penelitian lebih lanjut dalam melakukan proses simulasi untuk menurunkan nilai simpangan pada perbandingan hasil simulasi dengan uji eksperimen
2. Perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh *meshing* terhadap hasil simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS, I. 2021. *Mechanical User ' s Guide*. Dalam Ansys. USA.
- Ary, A. K., A. R. Prabowo, dan F. Imaduddin. 2020. Structural assessment of alternative urban vehicle chassis subjected to loading and internal parameters using finite element analysis. *Journal of Engineering Science and Technology*. 15(3):1999–2022.
- Aziz, M., Y. Marcellino, I. A. Rizki, S. A. Ikhwanuddin, dan J. W. Simatupang. 2020. Studi analisis perkembangan teknologi dan dukungan pemerintah indonesia terkait mobil listrik. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*. 22(1):45.
- Beer, F. P., E. R. Johnston, J. T. DeWolf, dan D. F. Mazurek. 2012. *Mechanics of Material*. Edisi 6th. New York: McGraw-Hill.
- Budiman, F. A., A. Septiyanto, S. Sudiyono, A. D. N. I. Musyono, dan R. Setiadi. 2021. Analisis tegangan von mises dan safety factor pada chassis kendaraan listrik tipe in-wheel. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 16(1):100.
- Canonsburg, T. D. 2022. *ANSYS Workbench User ' s Guide*. USA: ANSYS, Inc.
- Chrysanidis, T. P. dan T. P. Mitkou. 2021. R/c column modeling using ansys and loading rate and mesh method influence studies. *8th ECCOMAS Thematic Conference*
- Cook, R. D. 1990. *Konsep Dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. Edisi 1. Bandung: PT ERESCO.
- Denny, J., K. Veale, S. Adali, dan F. Leverone. 2018. Conceptual design and numerical validation of a composite monocoque solar passenger vehicle chassis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 21(5):1067–1077.
- Deulgaonkar, V. R. R. 2018. Finite element analysis and experimental simulation of chassis mounted platform for off-road wheeled combat and transport utility vehicles. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*. 10(1):66–72.
- Duhovnik, J., I. Demsar, dan P. Dresar. 2015. *Space Modeling With Solidworks and NX*. New York: Springer International Publishing Switzerland.
- Durgam, S., V. M. Deshmukh, A. P. Jagtap, M. J. Sable, dan N. M. Gawai. 2021. Experimental and numerical studies on materials for electric vehicle chassis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1126
- Happian, J. dan Smith. 2002. *An Introduction to Modern Vehicle Design*. Edisi 1th. Oxford.
- Hibbeler. 2012. *Structural Analysis*. Edisi Eighth Edi. United States of America:

Pearson Pretice Hall.

Hidayat, T., Nazaruddin, dan Syafri. 2017. Perancangan dan analisis statik chassis kendaraan shell eco marathon tipe urban concept. *Jom FTEKNIK*. 4(2):1–6.

HPS, S. dan Setiadi. 2009. Analisis Defleksi Dan Tegangan Struktur Roket Rx-320 Pada Waktu Handling Dengan Metode Elemen Hingga (Fem). *Jurnal Teknologi Dirgantara*. 7(2). 2009. 112–119.

Isworo, H., A. Ghofur, G. R. Cahyono, dan J. R. S. 2019. Analisis displacement pada chassis mobil listrik wasaka. *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*. 6(2):94–104.

Klyuyev, A. S., Y. I. Chernyshev, E. A. Ivanov, dan I. O. Borshchev. 2021. Comparison of jet pump numerical calculation results in ansys and openfoam cfd packages. *E3S Web of Conferences*. 320:04017.

Mott, R. L., E. M. Vavrek, dan J. Wang. 2018. *Machine Elements in Mechanical Design*. Edisi 6th. New York. *Pearson Education, Inc.*

Mulyadi, R., K. D. Artika, dan M. Khalil. 2019. Perancangan sistem kelistrikan perangkat elektronik pada mobil listrik. *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*. 6(1):07.

Mulyadi, S., M. N. Kustanto, C. A. Prasetyo, G. Jatisukanto, R. D. H. Qoryah, Y. Hermawan, dan M. Darsin. 2022. TEGANGAN prinsipal pada chassis mobil listrik prototype. *ELEMEN*. 9(1):24–30.

Okokpujie, I. P., O. M. Ikumapayi, U. C. Okonkwo, E. Y. Salawu, S. A. Afolalu, J. O. Dirisu, O. N. Nwoke, dan O. O. Ajayi. 2017. Experimental and mathematical modeling for prediction of tool wear on the machining of aluminium 6061 alloy by high speed steel tools. *Open Engineering*. 7(1):461–469.

Reksowardojo, I. K., E. Firmansyah, B. A. Dwiyanoro, D. Widhiyanuriyawan, A. S. Baskoro, dan Witantyo. 2021. *Pedoman Kontes Mobil Hemat Energi Tahun 2021*. Dalam Pedoman Kontes Mobil Hemat Energi. Editor F. Fitriani. Indonesia: Pusat Prestasi Nasional Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.

Rodrigues, A. F. A., L. C. Gertz, A. Cervieri, A. L. R. Poncio, A. B. Oliveira, dan M. S. Pereira. 2015. Static and dynamic analysis of a chassis of a prototype car. *SAE Technical Papers*

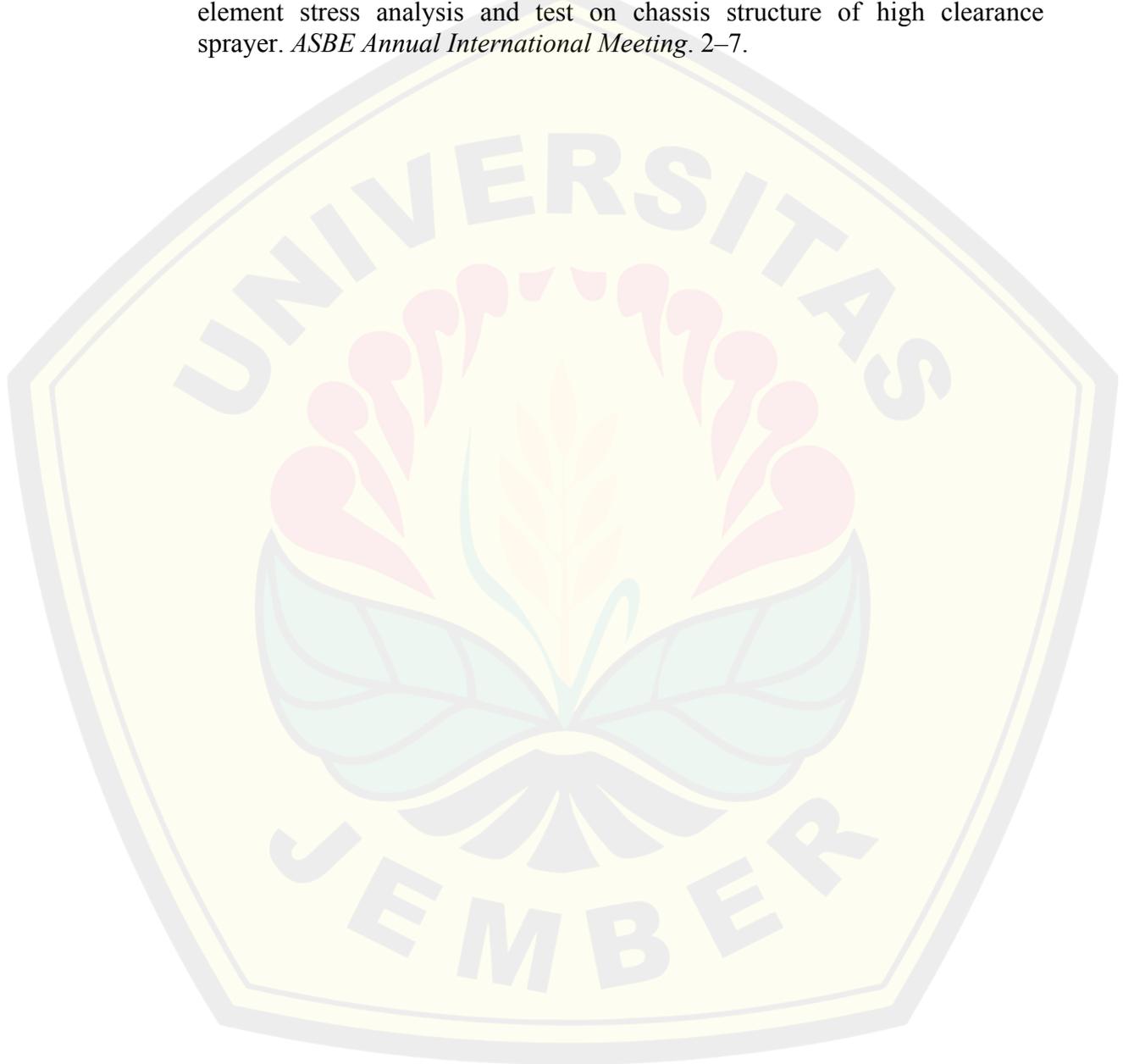
Setiyana, B., Sugiyanto, dan R. Kurniawan. 2021. Analisis dan modifikasi rangka mobil antawirya menggunakan metode elemen hingga. *Jurnal ROTASI*. 23(2):50–56.

Sutisna, N. A. dan M. F. A. A. Akbar. 2019. FEM simulation of electric car chassis design with torsional bar technology. *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*. 3(2):97.

Wibawa, L. A. N. 2019. Pengaruh kecepatan landing vertikal terhadap ketahanan beban impak rangka landing gear menggunakan metode elemen hingga. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*. 11(1):35.

Wibawa, L. A. N. 2020. Simulasi umur fatik rangka main landing gear menggunakan metode elemen hingga fatigue. *Dinamika Teknik Mesin*. 10(2):120–126.

Zhuang, T., X. Yang, X. Dong, H. Yan, T. Zhang, dan H. Wei. 2019. Finite element stress analysis and test on chassis structure of high clearance sprayer. *ASBE Annual International Meeting*. 2–7.



Lampiran 1

Perhitungan Gaya Vertikal

A. Chassis

$$m_{\text{beban}} \times g = F_{\text{vertikal}}$$
$$2 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 20 \text{ N}$$

B. Penumpang 45 Kg

1. Kaki

$$m_{\text{beban}} \times g = F_{\text{vertikal}}$$
$$7 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 72 \text{ N}$$

2. Pinggang

$$m_{\text{beban}} \times g = F_{\text{vertikal}}$$
$$21 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 206 \text{ N}$$

3. Bahu dan Kepala

$$m_{\text{beban}} \times g = F_{\text{vertikal}}$$
$$17 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 164 \text{ N}$$

C. Penumpang 56 Kg

1. Kaki

$$m_{\text{beban}} \times g = F_{\text{vertikal}}$$
$$9 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 89 \text{ N}$$

2. Pinggang

$$m_{\text{beban}} \times g = F_{\text{vertikal}}$$
$$26 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 256 \text{ N}$$

3. Bahu dan Kepala

$$m_{\text{beban}} \times g = F_{\text{vertikal}}$$
$$21 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 204 \text{ N}$$

Lampiran 2

Perhitungan Simpangan Pada Perbandingan Nilai Hasil Simulasi dan Penelitian Sebelumnya

A. Tegangan Normal

1. 45 Kg

$$x_1 \left(\frac{0.960 - 0.42}{0.42} \right) \times 100\% = 129\%$$

$$y_1 \left(\frac{0.240 - 0.14}{0.14} \right) \times 100\% = 71\%$$

$$x_2 \left(\frac{2.160 - 3.1}{3.1} \right) \times 100\% = 30\%$$

$$y_2 \left(\frac{0.340 - 1.85}{1.85} \right) \times 100\% = 82\%$$

$$x_3 \left(\frac{0.150 - 0.27}{0.27} \right) \times 100\% = 44\%$$

$$y_3 \left(\frac{0.320 - 0.17}{0.17} \right) \times 100\% = 88\%$$

2. 56 Kg

$$x_1 \left(\frac{1.180 - 0.7}{0.7} \right) \times 100\% = 69\%$$

$$y_1 \left(\frac{0.290 - 0.24}{0.24} \right) \times 100\% = 21\%$$

$$x_2 \left(\frac{2.680 - 3.37}{3.37} \right) \times 100\% = 20\%$$

$$y_2 \left(\frac{0.430 - 2.57}{2.57} \right) \times 100\% = 83\%$$

$$x_3 \left(\frac{0.180 - 0.3}{0.3} \right) \times 100\% = 40\%$$

$$y_3 \left(\frac{0.390 - 0.2}{0.2} \right) \times 100\% = 95\%$$

B. Tegangan Geser

1. 45 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{0.100 - 0.09}{0.09}\right) \times 100\% = 11\%$$

Titik 2

$$\left(\frac{0.003 - 0.68}{0.68}\right) \times 100\% = 100\%$$

Titik 3

$$\left(\frac{0.006 - 0.06}{0.06}\right) \times 100\% = 90\%$$

2. 56 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{0.120 - 0.16}{0.16}\right) \times 100\% = 25\%$$

Titik 2

$$\left(\frac{0.004 - 0.76}{0.76}\right) \times 100\% = 99\%$$

Titik 3

$$\left(\frac{0.007 - 0.07}{0.07}\right) \times 100\% = 90\%$$

C. Tegangan Geser Maksimum

1. 45 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{4.900 - 0.17}{0.17}\right) \times 100\% = 2782\%$$

Titik 2

$$\left(\frac{1.990 - 0.89}{0.89}\right) \times 100\% = 124\%$$

Titik 3

$$\left(\frac{0.510 - 0.08}{0.08}\right) \times 100\% = 538\%$$

2. 56 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{6.100 - 0.28}{0.28}\right) \times 100\% = 2079\%$$

Titik 2

$$\left(\frac{2.470 - 0.86}{0.86}\right) \times 100\% = 187\%$$

Titik 3

$$\left(\frac{0.630 - 0.09}{0.09}\right) \times 100\% = 600\%$$

D. Tegangan Utama Maksimum

1. 45 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{17.720 - 0.45}{0.45}\right) \times 100\% = 3838\%$$

Titik 2

$$\left(\frac{4.560 - 3.33}{3.33}\right) \times 100\% = 37\%$$

Titik 3

$$\left(\frac{1.560 - 0.3}{0.3}\right) \times 100\% = 420\%$$

2. 56 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{22.000 - 0.75}{0.75}\right) \times 100\% = 2833\%$$

Titik 2

$$\left(\frac{5.660 - 3.82}{3.82}\right) \times 100\% = 48\%$$

Titik 3

$$\left(\frac{1.940 - 0.33}{0.33}\right) \times 100\% = 488\%$$

E. Tegangan Utama Minimum

1. 45 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{0.110 - 0.12}{0.12}\right) \times 100\% = 8\%$$

Titik 2

$$\left(\frac{0.200 - 1.54}{1.54}\right) \times 100\% = 87\%$$

Titik 3

$$\left(\frac{0.100 - 0.14}{0.14}\right) \times 100\% = 29\%$$

2. 56 Kg

Titik 1

$$\left(\frac{0.130 - 0.19}{0.19}\right) \times 100\% = 32\%$$

Titik 2
$$\left(\frac{0.240 - 0.240}{0.240}\right) \times 100\% = 89\%$$

Titik 3
$$\left(\frac{0.130 - 0.17}{0.17}\right) \times 100\% = 24\%$$

