

Perancangan dan Analisis Kekuatan Rangka *Chassis* Mobil Listrik Tipe *Tubular Space Frame* Menggunakan Metode Simulasi Komputasi

Shinta Tri Kismanti^{1*}, Muh. Firdan Nurdin², Eris Santoso³, Andi Ard Maidhah⁴, Dwi Lesmidayarti⁵

^{1*,2,3,4}Universitas Borneo Tarakan

⁵Politeknik Negeri Balikpapan

*Email: shintatri@borneo.ac.id

Abstract

The chassis is the main component of an electric vehicle, serving as a supporting structure for all vehicle components and receiving loads during operation. Therefore, a structural strength analysis is required to ensure the safety of the frame design before the manufacturing process commences. This study aims to design and analyze the strength of a tubular space frame for an electric car using a finite element method-based computational simulation approach. The frame model is made in three-dimensional geometry and analyzed under static loading with varying rider loads of 46 kg, 56 kg, and 66 kg. The analysis parameters—specifically Von Mises stress, displacement, and the factor of safety—were used to evaluate the structure's response to these loads. Simulation results indicate that at a load of 46 kg, the maximum Von Mises stress was 18.09 MPa, with a displacement of 0.20 mm and a factor of safety of 11.44. At a load of 56 kg, the stress increased to 22.02 MPa, with a displacement of 0.24 mm and a factor of safety of 9.40. Meanwhile, at a load of 66 kg, the maximum stress reached 25.95 MPa, with a displacement of 0.29 mm and a factor of safety of 7.98. Increasing the driver's weight increased stress and displacement and reduced the factor of safety, with the lowest factor of safety (7.98) at the 66 kg load.

Keywords: electric car, tubular space frame, computational simulation, finite element method, Von Mises stress

Abstrak

Rangka (*chassis*) merupakan komponen utama pada kendaraan listrik yang berfungsi sebagai struktur utama yang menerima seluruh pembebanan. Oleh karena itu, diperlukan analisis kekuatan struktur untuk memastikan keamanan desain rangka sebelum proses manufaktur dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang serta menganalisis kekuatan rangka mobil listrik tipe *tubular space frame* menggunakan pendekatan simulasi komputasi berbasis metode elemen hingga. Model rangka dibuat dalam bentuk geometri tiga dimensi dan dianalisis terhadap pembebanan statik dengan variasi beban pengendara sebesar 46 kg, 56 kg, dan 66 kg. Parameter analisis yang digunakan meliputi tegangan von mises, *displacement*, dan safety factor untuk mengevaluasi respons struktur terhadap pembebanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada beban 46 kg diperoleh tegangan *von mises* maksimum sebesar 18,09 MPa dengan *displacement* 0,20 mm dan Safety Factor sebesar 11,44. Pada beban 56 kg, tegangan meningkat menjadi 22,02 MPa dengan *displacement* 0,24 mm dan Safety Factor sebesar 9,40. Sementara pada beban 66 kg diperoleh tegangan maksimum sebesar 25,95 MPa dengan *displacement* 0,29 mm dan Safety Factor sebesar 7,98. Peningkatan beban pengendara menyebabkan peningkatan tegangan dan *displacement* serta penurunan Safety Factor, dengan nilai Safety Factor terendah sebesar 7,98 pada pembebanan 66 kg.

Kata kunci: Mobil listrik, tubular space frame, simulasi komputasi, metode elemen hingga, tegangan Von Mises

1. Pendahuluan

Upaya pengurangan emisi pada sektor transportasi mendorong pengembangan kendaraan listrik sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar fosil. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kendaraan listrik berpotensi menurunkan emisi sepanjang siklus hidup kendaraan, terutama apabila desain struktur kendaraan dioptimalkan sejak tahap perancangan[1], [2]. Salah satu pendekatan yang banyak diterapkan adalah pengurangan massa kendaraan melalui penerapan desain struktur ringan (*lightweight structure*), karena penurunan massa dapat meningkatkan efisiensi energi serta mengurangi kebutuhan kapasitas baterai [3][4]. Namun demikian, upaya pengurangan massa tersebut harus tetap mempertimbangkan integritas struktural, keselamatan, serta perlindungan komponen penting seperti baterai sehingga diperlukan analisis struktur yang tepat dalam proses perancangan kendaraan listrik [5], [6], [7].

Rangka *chassis* merupakan struktur utama kendaraan yang berfungsi menopang seluruh komponen kendaraan serta menjaga stabilitas dan keselamatan selama kendaraan beroperasi[8]. Dalam kondisi operasional, *chassis* menerima berbagai jenis pembebanan, baik beban statis seperti berat pengemudi, baterai, dan motor, maupun beban dinamis akibat akselerasi, pengereman, dan benturan yang dapat menimbulkan tegangan dan deformasi pada struktur rangka[9]. Salah satu konsep rangka yang banyak digunakan pada kendaraan listrik skala kecil dan prototipe adalah tubular space frame, yaitu struktur rangka tiga dimensi yang tersusun dari elemen pipa yang membentuk kerangka ruang sehingga mampu memberikan kombinasi kekuatan struktur, fleksibilitas desain, serta efisiensi massa yang baik [10].

Untuk memastikan kekuatan dan keamanan struktur rangka, analisis struktur menjadi tahap penting dalam proses perancangan kendaraan. Berbagai penelitian di Indonesia telah menerapkan *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengevaluasi kinerja

struktur *chassis* kendaraan dengan parameter utama berupa tegangan *Von Mises*, perpindahan (*displacement*), dan faktor keamanan (*factor of safety*) [11]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi rangka dan pemilihan material berpengaruh terhadap distribusi tegangan, deformasi, serta tingkat keamanan struktur, sehingga metode FEA banyak digunakan sebagai alat evaluasi desain sebelum pembuatan prototipe dilakukan [6], [11], [12].

Selain digunakan sebagai alat analisis desain, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa hasil simulasi FEA memiliki kesesuaian yang baik dengan hasil pengujian aktual terhadap respons struktur rangka terhadap pembebanan [7], [13], [14]. Hal ini menunjukkan bahwa metode elemen hingga mampu memprediksi perilaku mekanik struktur secara cukup akurat, sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi kekuatan dan keamanan desain rangka kendaraan sebelum tahap pengujian fisik dilakukan [8], [13].

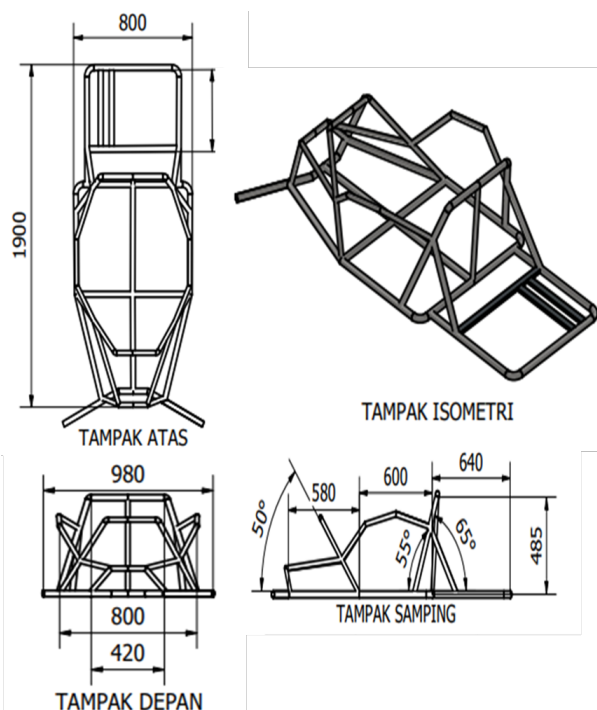
Sejalan dengan perkembangan tersebut, beberapa penelitian di Indonesia telah menganalisis kinerja rangka tubular *space frame* pada kendaraan listrik maupun kendaraan kompetisi menggunakan pendekatan simulasi komputasi dengan mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan struktur[11], [15]. Meskipun demikian, analisis kekuatan rangka *tubular space frame* pada desain rangka mobil listrik tertentu masih perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan kemampuan struktur dalam menahan pembebanan operasional kendaraan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk merancang serta menganalisis kekuatan rangka mobil listrik tipe *tubular space frame* menggunakan pendekatan simulasi komputasi guna mengetahui distribusi tegangan, deformasi struktur, serta tingkat keamanan rangka terhadap pembebanan yang diberikan.

2. Metoda Penelitian

2.1. Perancangan Model 3D

Tahap awal dalam penelitian ini berfokus pada transformasi konsep kendaraan ke dalam

representasi digital menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2021. Proses perancangan ini sangat krusial karena berfungsi sebagai fondasi utama untuk menentukan volume, massa, dan integritas struktur sebelum masuk ke tahap pengujian numerik. Penekanan utama pada fase ini adalah menciptakan geometri yang mampu mengakomodasi seluruh komponen sistem penggerak listrik dengan tetap menjaga efisiensi desain. Visualisasi dari hasil pemodelan struktur yang akan dianalisis dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 1. Desain Geometri 3D Rangka Mobil Listrik Tipe Tubular Space Frame

Gambar 1 menunjukkan model geometri 3D dari rangka mobil listrik yang dirancang menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2021. Struktur rangka ini mengadopsi tipe *Tubular Space Frame* dengan dimensi utama panjang 190 cm dan lebar 80 cm. Desain ini menggunakan profil pipa sirkular dengan dua spesifikasi berbeda, yaitu $\varnothing 30 \times 2$ mm untuk kerangka utama (*main frame*) dan $\varnothing 25 \times 2$ mm untuk bagian pendukung (*sub-frame*), dengan ketebalan dinding pipa sebesar 2 mm.

Tabel 1. Parameter Geometri Chassis

Parameter	Spesifikasi
Material	Galvanized Steel
Diameter pipa utama	30 mm
Ketebalan pipa utama	2 mm
Diameter pipa pendukung	25 mm
Ketebalan pipa pendukung	2 mm
Ukuran besi hollow	2×4 cm
Panjang chassis	190 cm
Lebar chassis	80 cm

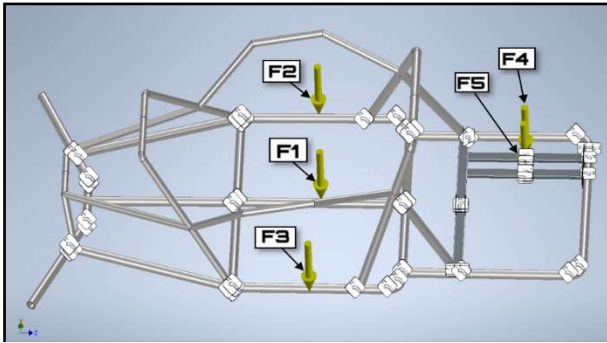
Material yang digunakan dalam simulasi ini adalah *Galvanized Steel* dengan sifat fisis dan mekanis yang disajikan pada Tabel 2. Parameter kunci yang digunakan meliputi massa jenis $7,85 \text{ g/cm}^3$, modulus Young 210 GPa, dan rasio Poisson 0,3. Untuk analisis kekuatan struktur, ditetapkan nilai *Yield Strength* sebesar 207 MPa dan *Tensile Strength* sebesar 345 MPa sebagai indikator batas elastisitas dan kegagalan material.

Tabel 2. Sifat Fisis Material Galvanized Steel

Properties	Metric
Density (g/cm^3)	7,80
Elastic Modulus (GPa)	200
Bulk Modulus (GPa)	160
Poissons Ratio	0,29
Shear Modulus (GPa)	80,0
Electrical Resistivity (ohm-cm)	0,0000170
Coefficient of Thermal Expansion	12,0
Linear ($\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$)	
Specific Heat Capacity ($\text{J/g-}^\circ\text{C}$)	0,470
Thermal Conductivity (W/m-K)	52,0

2.2. Simulasi Numerik

Tahap selanjutnya adalah melakukan analisis kekuatan struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*). Proses ini diawali dengan menentukan kondisi batas (*boundary conditions*) pada model rangka untuk mensimulasikan kondisi operasional kendaraan secara nyata. Pengaturan ini meliputi penentuan titik tumpuan tetap (*fixed constraint*) dan titik aplikasi beban statis, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kondisi Batas dan Distribusi Beban Statis pada Rangka

Gambar 2 menunjukkan penempatan tumpuan tetap yang diletakkan pada area poros roda depan dan belakang untuk menyimulasikan tumpuan rangka terhadap permukaan jalan. Pembebanan statis diaplikasikan secara vertikal ke bawah pada lima titik utama (F1 hingga F5) yang merepresentasikan distribusi berat komponen kendaraan. Rincian skenario pembebanan yang diinput ke dalam perangkat lunak simulasi disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Skenario Pembebanan Statis Rangka Mobil Listrik

Kode	Deskripsi Beban	Massa (kg)	Gaya (N)
F1	Pengendara dan Kursi	46 – 66	451,11 – 647,24
F2	Controllor	1.8	17.65
F3	Baterai	10	98.07
F4 & F5	Motor BLDC	4.2	41.19

Pada komponen motor penggerak, beban didistribusikan pada dua titik (F4 dan F5) untuk merepresentasikan tumpuan ganda pada dudukan motor (*motor mount*). Sebelum kalkulasi dijalankan, dilakukan proses diskretisasi model melalui tahapan *meshing*. Proses *meshing* ini membagi geometri rangka menjadi elemen-elemen kecil agar distribusi tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dapat dihitung secara akurat pada setiap bagian struktur. Berdasarkan parameter ini, simulasi dijalankan untuk memperoleh data *von Mises stress*, *displacement*, dan *safety factor*

2.3. Persamaan Analisis Struktur

Analisis kekuatan rangka pada penelitian ini didasarkan pada prinsip-prinsip mekanika statis untuk mengevaluasi respons material terhadap beban yang diberikan. Perhitungan numerik yang dilakukan oleh perangkat lunak simulasi menggunakan serangkaian persamaan dasar untuk menentukan interaksi antara gaya luar, karakteristik material, dan integritas struktur. Persamaan-persamaan berikut digunakan sebagai acuan teoritis dalam menghitung distribusi tegangan, deformasi, dan tingkat keamanan pada rancangan rangka mobil listrik.

Untuk mengevaluasi kekuatan struktur rangka secara akurat, digunakan beberapa persamaan dasar mekanika teknik yang menjadi algoritma perhitungan dalam perangkat lunak *Autodesk Inventor*. Gaya gravitasi yang dihasilkan oleh massa komponen dihitung menggunakan persamaan:

$$F = m \times g$$

Di mana F adalah gaya (N), m adalah massa (kg), dan g adalah percepatan gravitasi ($9,806 \text{ m/s}^2$). Analisis struktur dilakukan menggunakan pendekatan *Finite Element Method* (FEM) untuk mengetahui respons struktur *sasis* terhadap pembebanan yang diberikan. Dalam metode ini, struktur direpresentasikan sebagai kumpulan elemen yang saling terhubung pada node. Hubungan antara gaya, kekakuan struktur, dan perpindahan dinyatakan sebagai:

$$[F] = [K][u]$$

dengan $[F]$ merupakan vektor gaya atau beban, $[K]$ merupakan matriks kekakuan struktur, dan $[u]$ merupakan vektor perpindahan nodal.

$$[u] = [K]^{-1}[F]$$

Persamaan tersebut digunakan untuk memperoleh perpindahan nodal akibat pembebanan yang diberikan. Hasil perpindahan selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi respons deformasi struktur.

Respon material terhadap beban tersebut dianalisis melalui hubungan tegangan (σ) dan

regangan (ε), yang dinyatakan dalam persamaan:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Karakteristik elastisitas material didefinisikan melalui Modulus Young (E), yang merupakan rasio antara tegangan dan regangan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Analisis keamanan struktur ditentukan berdasarkan nilai tegangan kerja yang terjadi dibandingkan dengan kekuatan luluh (*yield strength*) material. Faktor keamanan (*Safety Factor*) dihitung dengan persamaan:

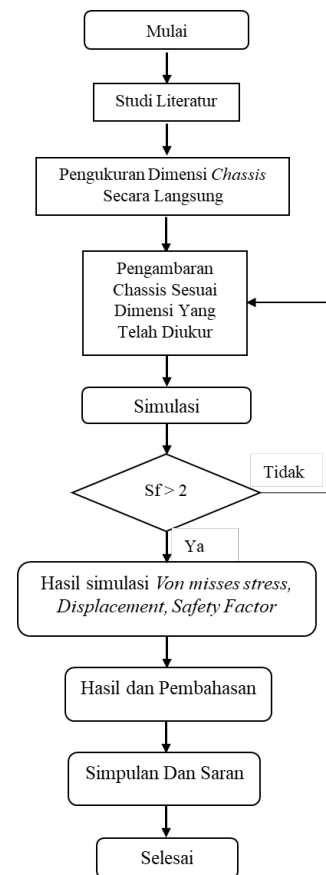
$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{working}}$$

Dengan SF adalah *Safety Factor*, σ_{yield} adalah tegangan luluh (*yield strength*) material, dan $\sigma_{working}$ adalah tegangan kerja yang direpresentasikan oleh tegangan *Von Mises* maksimum. Struktur dinyatakan aman jika nilai $SF > 1$. Seluruh perhitungan ini dilakukan dalam kondisi kesetimbangan statis di mana total gaya yang bekerja pada sistem adalah nol ($\sum F = 0$) [16].

2.4. Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*) untuk menganalisis kekuatan struktur rangka mobil listrik tipe *Tubular Space Frame*. Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur mengenai karakteristik material *Galvanized Steel* dan perancangan model geometri 3D rangka. Material yang digunakan memiliki *yield strength* sebesar 207 MPa sebagai acuan batas kekuatan struktur. Selanjutnya dilakukan tahap *preprocessing* dengan menentukan tumpuan tetap (*fixed constraint*) dan memberikan variasi beban pengendara sebesar 46 kg, 56 kg, dan 66

kg. Tahap berikutnya adalah simulasi untuk memperoleh nilai *von Mises stress*, *displacement*, dan *safety factor*. Hasil simulasi kemudian dievaluasi untuk menentukan apakah struktur rangka memenuhi kriteria keamanan. Apabila hasil analisis belum memenuhi batas yang ditentukan, maka dilakukan revisi desain. Sebaliknya, jika struktur mampu menahan beban dengan deformasi kecil dan faktor keamanan yang memadai, maka desain rangka dinyatakan valid dan siap untuk tahap pengembangan selanjutnya.



Gambar 1. Tahapan Metodologi Analisis Kekuatan Rangka Mobil Listrik

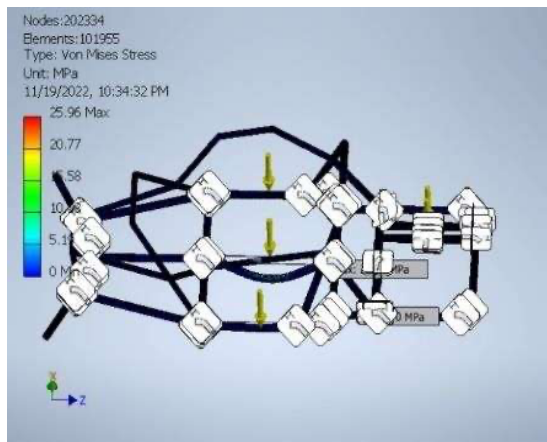
3. Hasil Penelitian

Bagian ini menyajikan hasil analisis numerik terhadap struktur rangka mobil listrik tipe *Tubular Space Frame* yang telah dirancang sebelumnya. Fokus utama dari pemaparan hasil ini adalah untuk mengevaluasi respon mekanis rangka saat menerima beban statis, yang mencakup distribusi tegangan (*von Mises*

stress), tingkat deformasi atau pergeseran struktur (*displacement*), serta penentuan faktor keamanan (*safety factor*). Data yang diperoleh dari simulasi menggunakan Autodesk Inventor Professional 2021 ini akan divalidasi dengan batasan kekuatan luluh (*yield strength*) material *Galvanized Steel* guna memastikan bahwa desain yang diusulkan memenuhi standar keamanan teknis untuk operasional kendaraan.

3.1. Distribusi Tegangan Von Mises

Analisis tegangan *von mises* dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan struktur rangka terhadap beban statis yang diberikan dan mengidentifikasi titik-titik kritis yang mengalami konsentrasi tegangan. Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 2, model dihitung menggunakan metode elemen hingga dengan tingkat kerapatan *mesh* sebesar 202.334 *nodes* dan 101.955 *elements* untuk menjamin akurasi hasil perhitungan.



Gambar 2. Distribusi Tegangan *Von Mises Stress* pada Struktur Rangka

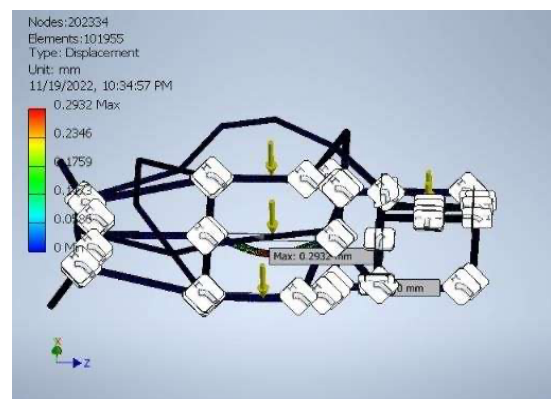
Visualisasi kontur warna pada Gambar 2 menunjukkan bahwa tegangan maksimum (*maximum stress*) yang terjadi pada seluruh struktur rangka adalah sebesar 25,96 MPa. Titik tegangan tertinggi ini terlokalisasi pada area sambungan pipa yang menjadi tumpuan beban utama, yang ditandai dengan kontur berwarna merah. Sebagian besar struktur lainnya didominasi oleh warna biru, yang mengindikasikan bahwa distribusi tegangan di

area tersebut sangat rendah atau mendekati 0 MPa.

Jika dibandingkan dengan sifat mekanis material *Galvanized Steel* yang memiliki nilai *yield strength* sebesar 207 MPa, maka nilai tegangan kerja maksimal (25,96 MPa) masih berada jauh di bawah batas elastisitas material. Hal ini menunjukkan bahwa struktur rangka memiliki margin keamanan yang sangat luas dan tidak akan mengalami deformasi permanen atau kegagalan struktur saat menerima beban operasional yang telah direncanakan. Distribusi tegangan yang merata ini membuktikan bahwa desain geometri *Tubular Space Frame* yang dirancang mampu menyalurkan beban dengan baik ke seluruh sambungan rangka.

3.2. Analisis *Displacement* Struktur

Analisis *displacement* dilakukan untuk mengetahui besarnya deformasi atau perubahan posisi pada struktur rangka akibat beban statis yang diberikan. Parameter ini sangat penting untuk memastikan bahwa rangka tidak hanya kuat secara material, tetapi juga memiliki kekakuan (*rigidity*) yang cukup agar tidak terjadi lendutan berlebih yang dapat mengganggu fungsi komponen kendaraan lainnya. Hasil simulasi pergeseran struktur ini disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kontur *Displacement* pada Struktur Rangka

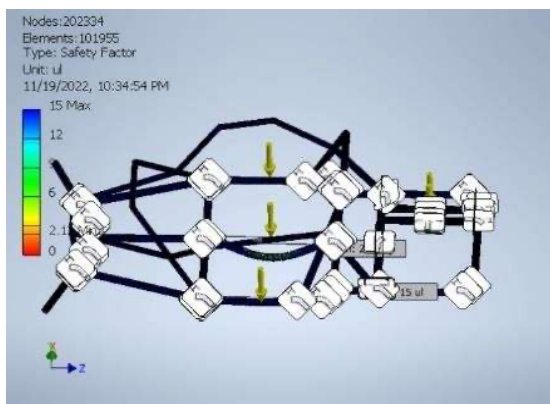
Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 3, nilai pergeseran maksimum (*maximum displacement*) yang terjadi pada rangka adalah sebesar 0,2932 mm. Titik deformasi tertinggi ini terletak pada area tengah rangka, tepatnya pada pipa yang

menopang beban pengendara, yang ditandai dengan kontur berwarna merah. Nilai ini menunjukkan tingkat kekakuan yang sangat tinggi, mengingat lendutan yang terjadi tidak mencapai 1 mm meskipun telah menerima beban operasional penuh.

Kecilnya nilai *displacement* ini mengonfirmasi bahwa geometri rangka *Tubular Space Frame* yang dirancang memiliki integritas struktural yang baik. Distribusi kontur warna yang didominasi oleh warna biru di sebagian besar tubuh rangka menunjukkan bahwa mayoritas struktur hampir tidak mengalami perubahan bentuk yang signifikan. Dengan nilai deformasi di bawah 0,3 mm, desain rangka ini dinyatakan memenuhi kriteria keamanan teknis dan fungsional, sehingga aman untuk diaplikasikan pada prototipe mobil listrik.

3.3. Analisis Safety Factor

Tahap akhir dari analisis numerik adalah penentuan *Safety Factor* (faktor keamanan) untuk menjamin bahwa seluruh bagian rangka berada dalam kondisi aman selama operasional. *Safety factor* merupakan rasio antara kekuatan luluh material (*yield strength*) terhadap tegangan kerja maksimum yang terjadi. Hasil simulasi faktor keamanan pada struktur rangka ini ditunjukkan oleh kontur warna pada Gambar 4.



Gambar 4. Kontur *Safety Factor* pada Struktur Rangka

Analisis *Safety Factor* (SF) dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan struktur chassis terhadap variasi pembebanan dari pengendara. Nilai SF dihitung berdasarkan

perbandingan antara tegangan luluh (*yield strength*) material dengan tegangan kerja (*working stress*) yang direpresentasikan oleh tegangan Von Mises maksimum. Berdasarkan material *Galvanized Steel* dengan *yield strength* sebesar 207 MPa, diperoleh nilai SF untuk setiap variasi pembebanan seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan *Safety Factor* Berdasarkan Variasi Pembebanan

Beban Pengendara	Von Mises (MPa)	Yield Strength (MPa)	Safety Factor
46 kg	18,09	207	11,44
56 kg	22,02	207	9,40
66 kg	25,96	207	7,98

Berdasarkan Tabel 4, nilai *Safety Factor* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya beban pengendara. Pada pembebanan 46 kg diperoleh nilai SF sebesar 11,44, kemudian menurun menjadi 9,40 pada pembebanan 56 kg dan 7,98 pada pembebanan 66 kg. Nilai SF terendah sebesar 7,98 terjadi pada pembebanan 66 kg, sehingga kondisi tersebut merupakan pembebanan paling kritis. Meskipun demikian, seluruh variasi pembebanan menghasilkan nilai SF lebih besar dari 1, sehingga struktur chassis masih memenuhi kriteria keamanan terhadap pembebanan statis yang diberikan.

3.4. Evaluasi Kinerja Struktur

Berdasarkan serangkaian simulasi numerik yang telah dilakukan, evaluasi kinerja struktur rangka mobil listrik tipe *Tubular Space Frame* menunjukkan hasil yang sangat memuaskan dari aspek kekuatan statis. Perbandingan antara tegangan kerja maksimum (*von Mises stress*) sebesar 25,96 MPa dengan kekuatan luluh (*yield strength*) material *Galvanized Steel* sebesar 207 MPa memberikan margin keamanan yang signifikan. Hal ini membuktikan bahwa rancangan rangka tidak hanya mampu menahan beban komponen (pengendara, baterai, motor, dan *controller*), tetapi juga memiliki ketahanan cadangan yang

besar terhadap potensi beban kejut atau beban tambahan di luar skenario statis.

Dari aspek kekakuan (*rigidity*), nilai pergeseran maksimum (*displacement*) yang hanya sebesar 0,2932 mm mengindikasikan bahwa struktur rangka sangat kaku dan stabil. Rendahnya nilai deformasi ini sangat krusial untuk menjaga kelurusan (*alignment*) sistem penggerak dan suspensi, serta mencegah terjadinya getaran berlebih atau kelelahan material (*fatigue*) akibat fleksibilitas struktur yang terlalu tinggi. Penggunaan profil pipa Ø 30 × 2 mm dan Ø 25 × 2 mm pada *sub-frame* terbukti efektif dalam mendistribusikan beban secara merata.

Secara keseluruhan, dengan nilai *safety factor* minimum sebesar 7,97, performa struktur rangka ini dinyatakan sangat aman ($SF > 1$). Evaluasi ini menunjukkan bahwa optimasi desain menggunakan perangkat lunak *Autodesk Inventor* telah berhasil menciptakan geometri yang efisien tanpa mengorbankan integritas struktural. Dengan demikian, model rangka ini telah memenuhi kriteria teknis untuk dilanjutkan ke tahap fabrikasi prototipe fisik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktur rangka mobil listrik tipe *Tubular Space Frame*, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Rangka mobil listrik tipe *Tubular Space Frame* mampu menahan beban operasional kendaraan dengan baik berdasarkan hasil analisis struktur.
2. Tegangan maksimum *von Mises* sebesar 25,96 MPa masih jauh di bawah batas kekuatan luluh material *Galvanized Steel* sebesar 207 MPa, sehingga struktur rangka dinilai aman dari potensi kegagalan material.
3. Nilai perpindahan maksimum sebesar 0,2932 mm menunjukkan bahwa rangka memiliki tingkat kekakuan yang baik dan mampu menjaga kestabilan komponen kendaraan.
4. Nilai *Safety Factor* masing-masing sebesar 11,44 pada pembebanan 46 kg, 9,40 pada pembebanan 56 kg, dan 7,98 pada pembebanan 66 kg. *Safety Factor* terendah

sebesar 7,98 terjadi pada pembebanan 66 kg, sehingga rangka memiliki tingkat keamanan yang tinggi terhadap beban yang bekerja.

5. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa desain rangka memenuhi kriteria kekuatan, kekakuan, dan keamanan struktur pada variasi pembebanan yang diberikan, sehingga layak untuk dilanjutkan ke tahap fabrikasi prototipe

6. Daftar Pustaka

- [1] J. Kim, H. Lee, K. Chung, H. Lee, Y. Kang, and J. Nam, "A new body concept for electric vehicle: PBC-EV," *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 195 LNEE, no. VOL. 7, pp. 579–591, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-33835-9_53.
- [2] R. R. X. Khoo, "Design, development and analysis of a full carbon fibre reinforced composite chassis of an electric vehicle," 2015, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10356/62236>
- [3] C. Herrmann, W. Dewulf, M. Hauschild, A. Kaluza, S. Kara, and S. Skerlos, "Life cycle engineering of lightweight structures," *CIRP Ann.*, vol. 67, no. 2, pp. 651–672, 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.05.008.
- [4] L. Reimer, A. Kaluza, F. Cerdas, J. Meschke, T. Vietor, and C. Herrmann, "Design of eco-efficient body parts for electric vehicles considering life cycle environmental information," *Sustain.*, vol. 12, no. 14, 2020, doi: 10.3390/su12145838.
- [5] T. Bein *et al.*, "Enhanced Lightweight Design - First Results of the FP7 Project ENLIGHT," *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 1031–1040, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.173.
- [6] A. Rianto, E. Erwin, W. Apriani, and E. M. Sundari, "Analisis Statis Design Prototype Chassis Tubular Space Frame Kendaraan Listrik Berjenis Buggy," *Mek. J. Tek. Mesin Pertan.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–29, 2023, doi: 10.47767/mechanisasi.v1i1.566.
- [7] M. Arie, A. Setiawan, I. Sujana, and R. A. Wicaksono, "Simulasi Struktur Sasis Mobil Listrik Fakultas Teknik Menggunakan Finite Element Analysis (FEA)," *Sujana & Wicaksono*, vol. 2, no. 2, pp. 118–122, 2021.
- [8] S. Aten, P. Ledi, F. Y. Utama, Y. S. Widoretno, and D. Wulandari, "Analisis Pembebanan Statis Chassis Ladder Frame Pada Mobil Hemat Energi Tipe Urban GARNESA," vol. 09, no. 01, pp. 277–283, 2024.

- [9] M. S. Solidwork, "Vol 11, No. 1, Juli 2025," vol. 11, no. 1, pp. 123–131, 2025.
- [10] A. Z. Taufik, N. Rashid, M. Ian, M. Faruq, and M. Zahir, "Electric car chassis design and analysis by using CATIA V5 R19," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 56–69, 2014, doi: 10.9790/1684-11435669.
- [11] L. A. Rayyan, J. Sumarjo, and F. A. Pratama, "Analisis Frame Sepeda Listrik Roda Tiga Bagi Lansia dan Penyandang Disabilitas Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Metrotech (Journal Mech. Electr. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 188–198, 2025, doi: 10.70609/metrotech.v4i3.7358.
- [12] K. Holenko *et al.*, "Structure and Strength Optimization of the Bogdan ERCV27 Electric Garbage Truck Spatial Frame Under Static Loading," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 23, 2024, doi: 10.3390/app142311012.
- [13] F. Marpaung *et al.*, "Materials Selection of Electric Motorcycle Chassis , and Structural Analysis Using Finite Element and Experimental Testing Materials Selection of Electric Motorcycle Chassis , and Structural Analysis Using Finite Element and Experimental Testing," vol. 12, no. 1, pp. 303–312, 2025.
- [14] N. Damanik, R. Saraswani, D. F. Hakam, and D. M. Mentari, "A Comprehensive Analysis of the Economic Implications, Challenges, and Opportunities of Electric Vehicle Adoption in Indonesia," *Energies*, vol. 18, no. 6, 2025, doi: 10.3390/en18061384.
- [15] gridoto.com, "Tubular space frame chassis," no. 23, pp. 9–17, [Online]. Available: <https://www.gridoto.com/read/221018652/ken-alin-ini-sasis-favorit-buat-sports-car-klasik>.
- [16] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Characteristics, Application, and Processing of Polymers*. 2003. [Online]. Available: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>.