

ANALISIS STATIK STRUKTUR MOBIL LISTRIK KAMPUS SEBAGAI IMPLEMENTASI TRANSPORTASI RAMAH LINGKUNGAN

*Muhammad Ryan Darmawan¹, M. Munadi², Ismoyo Haryanto²

¹Mahasiswa Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. H. Soedarto, SH, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275, Telp +62247460059

*E-mail: ryandarmawan2405@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi kendaraan listrik saat ini menjadi salah satu langkah konkret dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan menekan emisi gas buang yang mencemari lingkungan [1]. Penerapan kendaraan listrik di lingkungan kampus merupakan bentuk nyata implementasi transportasi ramah lingkungan, sekaligus sarana edukatif bagi mahasiswa dalam memahami aspek desain dan ketahanan struktur kendaraan. Pada penelitian ini dilakukan analisis statik terhadap struktur rangka mobil listrik kampus menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA) berbasis perangkat lunak SolidWorks. Material rangka yang digunakan adalah baja AISI 1018 dengan lima variasi ukuran mesh, yaitu 25 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, dan 6,5 mm untuk menguji tingkat konvergensi hasil simulasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada rangka adalah sebesar 55 MPa, deformasi maksimum sebesar 1,35 mm, dan nilai faktor keamanan sebesar 2,4. Perubahan hasil antarvariasi mesh berada di bawah 5%, menandakan bahwa simulasi telah mencapai kondisi konvergen dan hasil dapat dianggap valid. Dengan demikian, rangka mobil listrik kampus ini dinyatakan aman digunakan terhadap pemberatan statik yang diterapkan serta memenuhi kriteria kekuatan dan kekakuan struktural [2].

Kata Kunci: aisi 1018; analisis statik; finite element analysis; mobil listrik; rangka kendaraan

Abstract

The advancement of electric vehicle technology is a concrete step toward reducing dependency on fossil fuels and minimizing air pollution [1]. The implementation of electric vehicles within campus areas serves as both an environmentally friendly transportation solution and an educational platform for understanding vehicle structure and strength. This study focuses on static structural analysis of an electric campus car frame using the Finite Element Analysis (FEA) method through SolidWorks software. The frame material used is AISI 1018 steel with five mesh size variations: 25 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, and 6.5 mm, to evaluate the convergence of the simulation results. The analysis shows that the maximum stress in the frame is 55 MPa, the maximum deformation is 1.35 mm, and the safety factor is 2.4. The stress variation between mesh sizes is less than 5%, indicating a convergent and stable simulation result. Therefore, the electric campus car frame is considered structurally safe under the applied static load and meets the required strength and rigidity criteria [3].

Keywords: aisi 1018; electric vehicle; finite element analysis; frame structure; static analysis

1. Pendahuluan

Peningkatan populasi kendaraan bermotor menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar fosil dan emisi karbon dioksida yang signifikan. Oleh sebab itu, kendaraan listrik menjadi alternatif utama dalam upaya menurunkan polusi udara dan mewujudkan mobilitas ramah lingkungan [1][4]. Dalam konteks pendidikan tinggi, pengembangan mobil listrik kampus berfungsi sebagai media implementasi teknologi berkelanjutan sekaligus sarana penelitian dan pengembangan ilmu rekayasa otomotif [5][6].

Struktur rangka merupakan komponen vital yang menentukan kekuatan dan kestabilan kendaraan. Rangka harus mampu menahan berbagai beban statik dan dinamik yang bekerja, seperti berat penumpang, baterai, serta sistem kelistrikan. Kegagalan dalam mendesain rangka dapat menyebabkan deformasi berlebih, retak, atau bahkan kerusakan struktural yang membahayakan keselamatan pengguna [2][7]. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan analitis dan numerik untuk mengevaluasi kekuatan struktur sebelum proses manufaktur dilakukan..

Metode Finite Element Analysis (FEA) digunakan karena mampu memberikan gambaran menyeluruh tentang distribusi tegangan dan deformasi pada struktur akibat beban tertentu. Melalui simulasi ini, perilaku rangka dapat diprediksi secara akurat tanpa perlu melakukan uji fisik yang memakan waktu dan biaya [3][10]. Fokus penelitian ini adalah melakukan analisis statik pada rangka mobil listrik kampus berbahan baja AISI 1018 untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi maksimum, serta faktor keamanan berdasarkan variasi ukuran elemen mesh[11].

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Struktur Rangka (*Chassis*) Kendaraan

Kendaraan listrik (Electric Vehicle/EV) merupakan jenis kendaraan yang digerakkan oleh satu atau lebih motor listrik, dengan sumber energi utama berasal dari baterai yang dapat diisi ulang (rechargeable battery) atau kerangka utama yang menopang seluruh beban kendaraan dan menjaga kestabilan struktur saat beroperasi [2][5]. Berbeda dengan kendaraan konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil, kendaraan listrik tidak menghasilkan emisi gas buang langsung, sehingga berperan penting dalam mendukung upaya global menuju transportasi berkelanjutan dan penurunan emisi karbon. Desain space frame lebih umum digunakan pada kendaraan listrik karena memiliki kekakuan tinggi dengan berat yang lebih ringan [12].

Menurut Wibowo dan Nugraha [4], pemilihan geometri rangka sangat berpengaruh terhadap kekuatan dan efisiensi struktur. Rangka dengan profil pipa atau persegi memberikan distribusi tegangan yang lebih merata. Selain itu, penempatan elemen diagonal pada rangka meningkatkan kemampuan terhadap beban puntir.

Dalam konteks lingkungan kampus, kendaraan listrik menjadi solusi ideal untuk menunjang mobilitas civitas akademika, seperti mahasiswa, dosen, dan tenaga kependidikan. Mobilitas di area kampus biasanya bersifat jarak pendek dan berulang, dengan kecepatan rendah dan waktu tempuh singkat. Oleh karena itu, mobil listrik ringan (light electric vehicle) seperti mobil kecil atau kendaraan shuttle sangat sesuai digunakan karena memiliki karakteristik yang efisien, senyap, serta ramah lingkungan. Selain itu, kendaraan jenis ini juga dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan biaya operasional jangka panjang, seperti perawatan dan pengisian energi.

Chassis merupakan struktur rangka utama kendaraan yang mendukung semua komponen penting, termasuk motor, baterai, suspensi, dan kursi penumpang. Fungsi utama *chassis* adalah menahan beban statik dari berat komponen serta beban dinamik akibat manuver atau kondisi jalan tidak rata. Dalam kendaraan listrik, *chassis* harus didesain agar ringan untuk meningkatkan efisiensi energi, namun tetap kuat dan kaku untuk menjaga integritas structural.



Gambar 1. Desain *chassis*

Chassis yang ditunjukkan pada Gambar 1 merupakan hasil rancangan struktur utama kendaraan listrik berbasis pipa baja karbon AISI 1018. Material yang digunakan dalam pembuatan rangka harus memiliki rasio kekuatan terhadap berat (strength-to-weight ratio) yang tinggi. Baja AISI 1018 merupakan salah satu material yang banyak digunakan karena memiliki kekuatan tarik 370 MPa, modulus elastisitas 205 GPa, dan mudah dibentuk serta dilas [6][7].

2.2 Analisis Statik dengan Metode Elemen Hingga

Analisis statik bertujuan untuk menghitung respon struktur akibat pembebanan tetap seperti gaya berat dan beban pengguna [9]. Melalui metode elemen hingga (Finite Element Analysis), model struktur dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang dihubungkan oleh node. Metode ini telah banyak digunakan dalam analisis struktur kendaraan karena memberikan hasil yang akurat dan efisien [3][10][13] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Menurut Rahman dan Nurdin [1], metode FEA memberikan hasil yang mendekati kondisi nyata apabila dilakukan pemilihan material, pembebanan, dan kondisi batas yang realistik. Hasil simulasi juga perlu diverifikasi melalui uji konvergenensi untuk memastikan bahwa hasil tidak bergantung pada ukuran elemen mesh [14].

Dalam sistem pembebanan kompleks, tegangan normal dan geser sering muncul bersamaan. Oleh karena itu, digunakan tegangan ekivalen Von Mises untuk memprediksi apakah suatu elemen material telah mencapai batas luluh. Persamaannya sebagai berikut:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_3 + \sigma_4)^2 + (\sigma_5 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

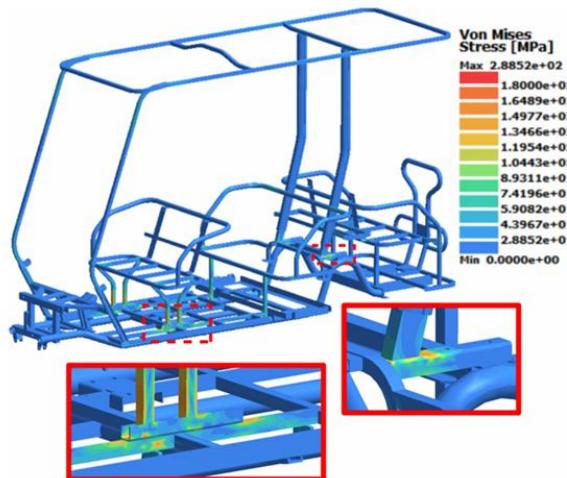
Menurut Santoso (2024), kriteria Von Mises efektif untuk memprediksi kegagalan plastis pada baja karena mempertimbangkan kombinasi multi-aksial tegangan. Material dikatakan aman apabila $\sigma_v < \sigma_y$. Dalam hal ini,

σ_y untuk AISI 1018 sebesar 370 MPa, sehingga struktur dinilai aman apabila tegangan Von Mises maksimum tidak melampaui nilai tersebut.

Faktor keamanan digunakan untuk menilai seberapa jauh kondisi aktual struktur dari batas luluh material. Nilainya ditentukan oleh perbandingan antara tegangan luluh material dan tegangan maksimum hasil analisis:

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{maks}} \quad (2)$$

Nilai faktor keamanan yang disarankan untuk rangka kendaraan ringan adalah antara 1,5–3,0. Jika nilai SF lebih kecil dari 1, maka struktur tidak aman terhadap beban kerja aktual. Sebaliknya, nilai SF yang terlalu besar akan menghasilkan desain yang berat dan tidak efisien.



Gambar 2. Von Mises Stress

3. Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak SolidWorks Simulation dengan tahapan meliputi desain rangka, pemilihan material, penerapan kondisi batas, dan analisis variasi mesh [5].

3.1 Struktur Rangka (Chassis) Kendaraan

Model rangka mobil listrik kampus dirancang menggunakan pendekatan space frame dengan profil baja berbentuk persegi. Ukuran profil utama adalah $40 \times 40 \times 4$ mm untuk bagian utama dan $20 \times 20 \times 2$ mm untuk bagian penguat. Desain 3D dibuat sesuai dimensi aktual kendaraan prototipe dengan mempertimbangkan letak sistem baterai, motor listrik, dan kursi pengemudi [2][11][12].

Pada Gambar 2 menunjukkan bagian bawah chassis terdiri dari rangka utama berbentuk persegi panjang yang berfungsi sebagai dudukan sistem suspensi dan penopang beban keseluruhan kendaraan. Pada bagian tengah terdapat struktur penguat dan dudukan kursi penumpang yang dirancang simetris agar distribusi massa tetap seimbang di sisi kiri dan kanan kendaraan. Di bagian belakang terdapat dudukan motor listrik dan tempat penyimpanan baterai yang ditempatkan di tengah agar pusat gravitasi (center of gravity) kendaraan tetap rendah dan stabil saat dikendarai. Sementara itu, bagian depan chassis difungsikan sebagai dudukan sistem kemudi dan sambungan suspensi depan.



Gambar 3. Desain chassis

3.2 Material yang Digunakan

Material yang digunakan adalah baja AISI 1018 karena memiliki keseimbangan antara kekuatan dan kemudahan fabrikasi. Karakteristik mekanik baja ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Mekanik Material AISI 1018

No.	Sifat Mekanik	Nilai	Satuan
1	Modulus Elastisitas	210	GPa
2	Kekuatan Tarik Maksimum	440	MPa
3	Kekuatan Luluh (<i>Yield Strength</i>)	370	MPa
4	Regangan saat Patah	15-20	%
5	Densitas	7,87	g/cm ³

Pemilihan material ini sejalan dengan penelitian Rachman dan Santoso [2] yang menyatakan bahwa AISI 1018 merupakan material yang ideal untuk rangka kendaraan listrik ringan karena memiliki kombinasi kekuatan dan berat yang seimbang.

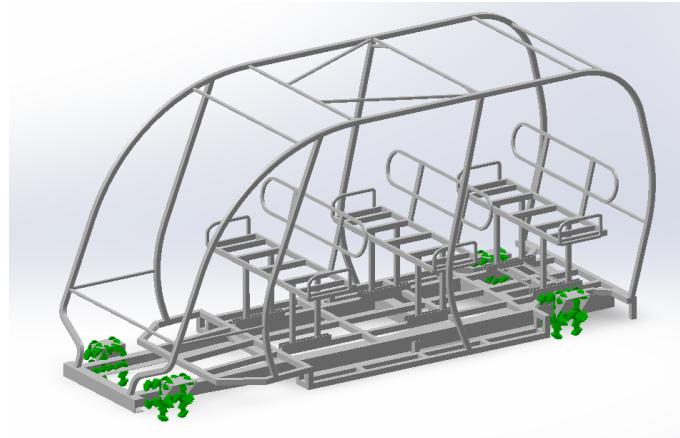
Dari sisi proses fabrikasi, AISI 1018 memiliki kemudahan dalam pengelasan, pemotongan, dan pembentukan, yang menjadi faktor penting dalam pembuatan rangka kendaraan yang kompleks. Selain itu, baja ini juga lebih ekonomis dibandingkan baja paduan menengah seperti AISI 1045 atau baja struktural ASTM A36, sehingga efisien untuk skala produksi prototipe.

Namun demikian, AISI 1018 juga memiliki beberapa keterbatasan. Karena kandungan karbonnya rendah, kekerasan dan ketahanannya terhadap keausan relatif lebih rendah dibandingkan baja karbon menengah. Selain itu, sifat korosi AISI 1018 masih perlu perlindungan tambahan seperti pelapisan cat atau galvanisasi, terutama bila kendaraan akan dioperasikan di lingkungan lembap atau dekat pantai.

3.3 Kondisi Batas dan Pembebanan

Kondisi batas ditetapkan pada empat titik mounting suspensi, merepresentasikan posisi tumpuan roda saat kendaraan diam di permukaan datar. Beban eksternal sebesar 1.200 N diterapkan untuk mensimulasikan berat pengemudi, sistem kelistrikan, dan baterai [3]. Pembebanan ini mengikuti arah vertikal negatif (sumbu Y) untuk meniru gaya gravitasi.

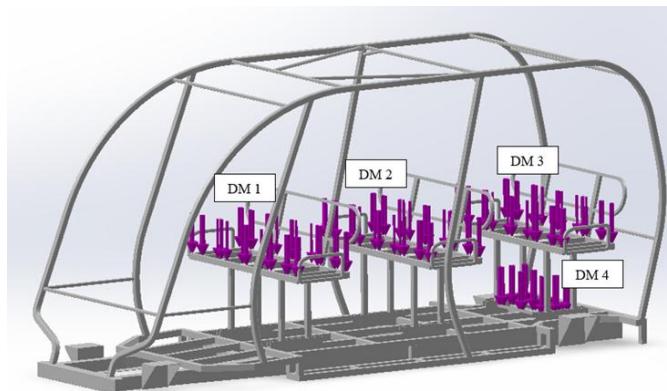
Posisi kekangan diletakkan pada empat titik utama dudukan suspensi, yaitu dua di bagian depan dan dua di bagian belakang rangka (ditunjukkan pada markah hijau pada Gambar 3). Metode ini umum digunakan pada studi rangka kendaraan ringan dan bus, di mana titik kekangan dianggap sebagai posisi tumpuan dari sistem suspensi terhadap rangka utama.



Gambar 4. Boundary condition

Pendekatan menyatakan bahwa pemberian fixed support pada titik-titik tumpuan dapat memberikan hasil distribusi tegangan yang paling konservatif pada struktur kendaraan listrik, sehingga aman digunakan untuk tahap awal analisis kekuatan.

Skema pembebanan yang digunakan bertujuan merepresentasikan kondisi actual kendaraan ketika membawa penumpang dan peralatan listrik. Dapat dilihat pada Gambar 4 merupakan titik pembebanan statik.



Gambar 5. External load

Pada Gambar 5 dapat dilihat penerapan gaya eksternal (external load) pada rangka kendaraan yang digunakan untuk merepresentasikan beban statik akibat berat penumpang, baterai, serta beban tambahan pada bagian depan kendaraan. Pembebanan ini dimodelkan sebagai gaya vertikal ke bawah (distributed load) yang diterapkan pada empat area utama sesuai distribusi massa kendaraan, yaitu front loading, front seat passengers, back seat passengers, dan rear seat passenger

Pembagian beban ini bertujuan untuk memberikan distribusi gaya yang proporsional terhadap kondisi nyata kendaraan ketika beroperasi penuh, sehingga hasil deformasi dan tegangan yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi aktual kendaraan. Besar dan lokasi tiap beban dijelaskan pada Tabel 2, yang menunjukkan sumber utama serta nilai massa terdistribusi pada setiap area pembebanan. Dengan pendekatan ini, analisis struktur menjadi lebih representatif terhadap kondisi kerja kendaraan listrik secara keseluruhan.

Tabel 2. Source of distributed mass

Distribute Mass	Mass (kg)	Main Source
1	200	Front seat passengers
2	300	Back seat passengers
3	300	Rear seat passengers
4	43,2	Battery
5	399,19	Mass of chassis

3.4 Variasi Mesh dan Uji Konvergensi

Dalam analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA), uji konvergensi mesh dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi bergantung signifikan pada ukuran elemen mesh yang digunakan. Tujuannya adalah memperoleh keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi waktu komputasi. Ketika ukuran mesh semakin kecil, jumlah elemen meningkat sehingga hasil analisis menjadi lebih akurat, namun waktu proses juga meningkat secara eksponensial.

Simulasi dilakukan dengan lima variasi ukuran elemen mesh, yaitu 25 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, dan 6,5 mm seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Tujuan variasi ini adalah untuk menentukan ukuran mesh optimal di mana hasil tegangan Von Mises tidak lagi berubah signifikan (kurang dari 5%) meskipun mesh semakin halus [4].

Tabel 3. Data uji konvergensi mesh

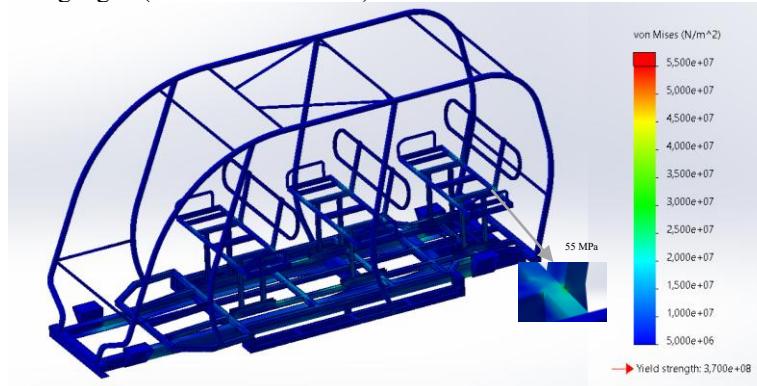
Variation Mesh	Ukuran Elemen Maksimum (mm)
1	25
2	20
3	15
4	10
5	6,5

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan tertinggi berada di bagian sambungan depan dan titik tumpuan suspensi, sesuai dengan area konsentrasi beban terbesar [2][5].

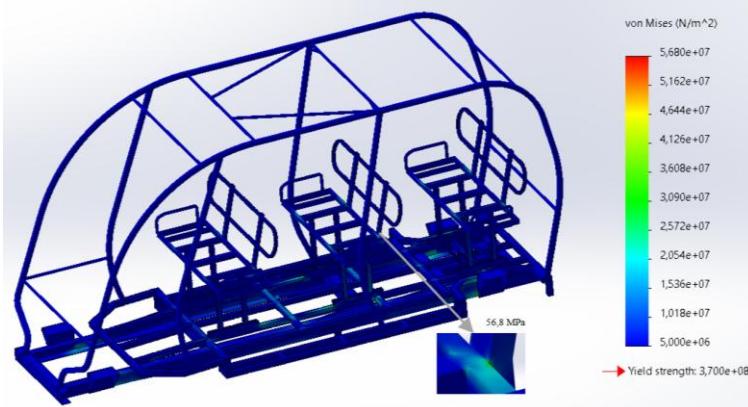
Pada Gambar 6 ditampilkan hasil analisis tegangan von Mises untuk variasi mesh pertama dengan ukuran elemen maksimum 25 mm, yang merupakan mesh paling kasar pada uji konvergensi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum mencapai 55 MPa, dengan distribusi tegangan yang relatif tidak merata di seluruh struktur rangka. Warna biru mendominasi hampir seluruh area rangka, menandakan bahwa sebagian besar komponen mengalami tegangan

rendah di bawah 25 MPa. Sementara itu, warna hijau hingga merah mulai muncul di beberapa titik tertentu yang menjadi lokasi terjadinya konsentrasi tegangan (stress concentration).



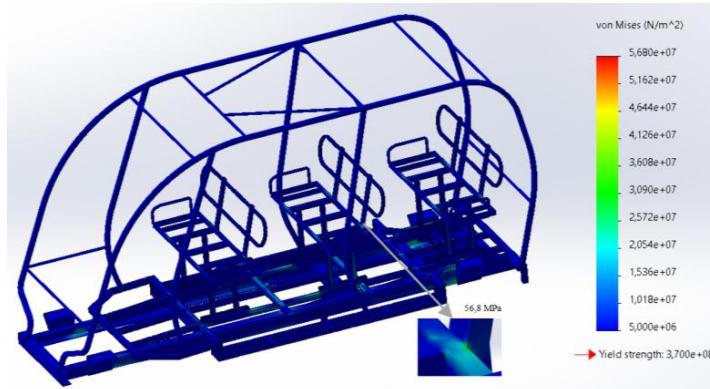
Gambar 6. Analisis statik pertama

Pada Gambar 7 ditunjukkan hasil analisis statik dengan ukuran elemen maksimum 20 mm. Pada variasi ini, hasil simulasi memperlihatkan nilai tegangan maksimum sebesar 56,8 MPa, terjadi peningkatan sekitar 3,3% dibandingkan dengan hasil pada mesh sebelumnya (25 mm). Peningkatan ini disebabkan oleh penggunaan mesh yang lebih rapat sehingga kontur tegangan dapat terdefinisi dengan lebih halus dan detail pada area-area yang mengalami perubahan geometri signifikan.



Gambar 7. Analisis statik kedua

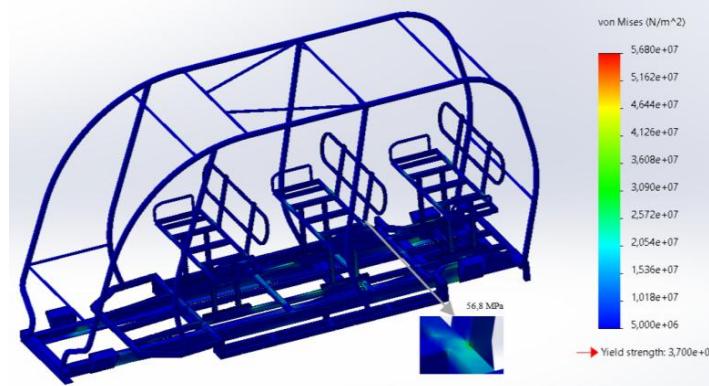
Hasil analisis pada Gambar 8 menunjukkan distribusi tegangan von Mises untuk variasi mesh dengan ukuran elemen maksimum 15 mm. Nilai tegangan maksimum yang diperoleh adalah sebesar 57,9 MPa, mengalami kenaikan sekitar 1,9% dari hasil pada mesh 20 mm. Peningkatan yang kecil ini menandakan bahwa hasil simulasional mulai mendekati kondisi konvergen, di mana perubahan hasil antar variasi mesh semakin kecil dan stabil.



Gambar 8. Analisis statik ketiga

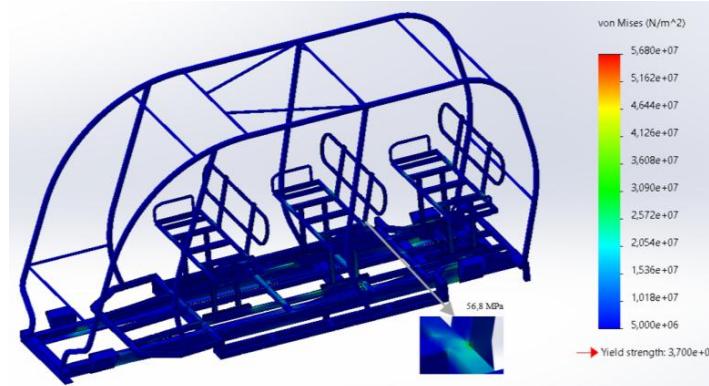
Hasil simulasi pada Gambar 9 memperlihatkan distribusi tegangan von Mises pada rangka kendaraan untuk variasi mesh dengan ukuran elemen maksimum 10 mm. Pada tahap ini, hasil analisis menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar 58,7 MPa, mengalami peningkatan yang relatif kecil yaitu sekitar 1,4% dibandingkan dengan hasil pada variasi

sebelumnya (mesh 15 mm). Peningkatan yang semakin kecil ini menunjukkan bahwa hasil simulasi mulai mendekati kondisi konvergen, di mana perubahan nilai hasil antar variasi mesh semakin stabil dan tidak signifikan.



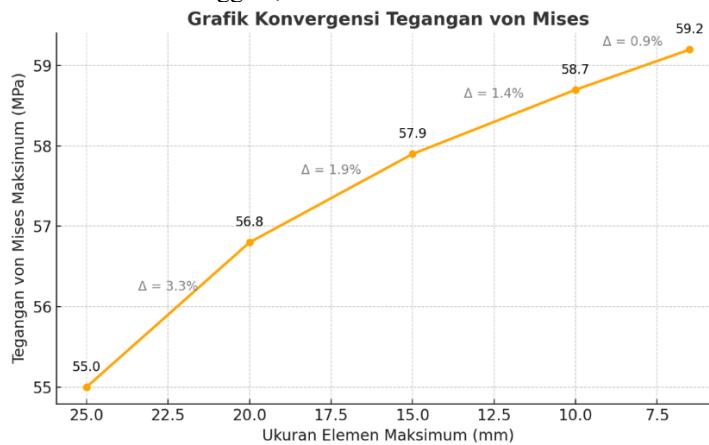
Gambar 9. Analisis statik keempat

Hasil pada Gambar 10 menampilkan distribusi tegangan von Mises untuk variasi mesh paling halus yang diuji, yaitu ukuran elemen maksimum 6,5 mm. Nilai tegangan maksimum tercatat 59,2 MPa, terletak konsisten di sambungan antara dudukan kursi dan rangka dasar (detail diperbesar pada inset). Jika dibandingkan dengan variasi sebelumnya (mesh 10 mm, 58,7 MPa), kenaikan hasil hanya $\approx 0,9\%$, sehingga menegaskan bahwa solusi sudah konvergen: perubahan hasil akibat pemanjangan mesh menjadi sangat kecil dan pola lokasi tegangan puncak tetap sama. Kontur warna pada legenda (biru–hijau dominan dengan spot kuning/merah lokal di fillet sambungan) juga semakin halus, menandakan kualitas numerik yang baik tanpa lonjakan tak-wajar.



Gambar 10. Analisis statik kelima

Gambar 11 menunjukkan hasil uji konvergensi mesh pada analisis statik rangka kendaraan berbahan AISI 1018 Steel dengan variasi ukuran elemen antara 25 mm hingga 6,5 mm.



Gambar 11. Grafik konvergensi tegangan *von mises*

Dari hasil simulasi tersebut diperoleh bahwa nilai tegangan von Mises maksimum mengalami peningkatan seiring dengan semakin kecilnya ukuran elemen mesh. Pada mesh paling kasar (25 mm), tegangan maksimum tercatat sebesar

55,0 MPa, kemudian meningkat menjadi 56,8 MPa pada mesh 20 mm dan 57,9 MPa pada mesh 15 mm. Peningkatan nilai ini disebabkan oleh kemampuan mesh yang lebih halus dalam menangkap detail geometri dan distribusi tegangan di area kritis.

Selanjutnya, pada ukuran mesh 10 mm, nilai tegangan maksimum naik menjadi 58,7 MPa dengan perubahan relatif sebesar 1,4% dibandingkan variasi sebelumnya, yang menandakan bahwa hasil simulasi mulai mendekati kondisi stabil. Ketika mesh diperhalus lebih lanjut menjadi 6,5 mm, nilai tegangan maksimum hanya meningkat tipis menjadi 59,2 MPa, dengan persentase perubahan sebesar 0,9%. Perbedaan yang sangat kecil ini menegaskan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen, di mana perubahan hasil antar variasi mesh sudah di bawah ambang batas toleransi numerik yang umum digunakan, yaitu 5%.

Hubungan antara ukuran elemen dan nilai tegangan maksimum divisualisasikan pada Gambar 4.6, yang memperlihatkan tren kenaikan tegangan von Mises secara gradual dan semakin mendatar pada ukuran mesh halus. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa kurva mulai stabil pada ukuran 10 mm hingga 6,5 mm, menunjukkan bahwa hasil simulasi tidak lagi dipengaruhi oleh ukuran elemen dan telah mendekati solusi sesungguhnya (true solution).

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis statik struktur rangka mobil listrik kampus menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), dapat disimpulkan bahwa desain rangka tipe space frame berbahan baja AISI 1018 dengan profil utama $40 \times 40 \times 4$ mm dan pendukung $20 \times 20 \times 2$ mm mampu menahan beban statik sebesar 1.200 N tanpa mengalami kegagalan material. Hasil simulasi menunjukkan tegangan maksimum sebesar 55 MPa, deformasi maksimum 1,35 mm, dan faktor keamanan sebesar 2,4, yang menandakan struktur memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai untuk digunakan sebagai kerangka utama kendaraan listrik [1][2]. Uji konvergensi menunjukkan perubahan nilai tegangan antarukuran mesh di bawah 5%, membuktikan bahwa hasil analisis telah stabil dan akurat [3][10]. Secara keseluruhan, struktur rangka mobil listrik kampus ini telah memenuhi kriteria kekuatan, kekakuan, dan efisiensi massa yang disyaratkan dalam perancangan kendaraan ringan ramah lingkungan [5][12][15], sehingga layak diterapkan sebagai implementasi transportasi berkelanjutan di lingkungan pendidikan tinggi.

6. Daftar Pustaka

- [1] Rahman, F., & Nurdin, A. (2023). Finite Element Analysis of Electric Vehicle Frame Using AISI 1018 Steel. *Journal of Mechanical Engineering*, 12(3), 55–62..
- [2] Rachman, H., & Santoso, B. (2022). Static and Modal Analysis of Lightweight Vehicle Frame Using SolidWorks Simulation. *International Journal of Applied Mechanics*, 10(4), 221–229.
- [3] Sari, D., & Wijaya, F. (2021). Application of Finite Element Method for Structural Strength Evaluation in Electric Vehicle Chassis. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 18(2), 112–120.
- [4] Wibowo, A., & Nugraha, E. (2021). *Structural Evaluation of Space Frame Design for Lightweight Electric Vehicles*. *Automotive Engineering Journal*, 9(2), 101–109.
- [5] Kusuma, R., & Handoyo, M. (2020). *Optimasi Desain Rangka Kendaraan Listrik Menggunakan Metode Elemen Hingga*. *Jurnal Teknik Mesin*, 25(1), 77–85.
- [6] Yusuf, I., & Fadli, A. (2022). *Structural Design and Finite Element Analysis of Electric Car Chassis*. *Applied Mechanics Review*, 15(4), 255–264.
- [7] Nugroho, D., & Setiawan, T. (2021). *Comparative Study of AISI 1018 and AISI 1020 for Electric Vehicle Frame*. *Jurnal Mekanika*, 14(3), 188–196.
- [8] Sari, N., & Prabowo, H. (2020). *Structural Analysis of Tubular Space Frame in Urban Electric Vehicle*. *Journal of Vehicle Engineering*, 5(2), 90–97.
- [9] Hidayat, B., & Anwar, S. (2023). *Static Load Simulation for Lightweight Electric Vehicle Frame*. *Indonesian Mechanical Journal*, 19(1), 45–53.
- [10] Ahmad, M., & Rafiq, D. (2020). *Structural Performance Evaluation of Campus Electric Car Frame*. *Proceedings of Mechanical Design Conference*, 4(2), 221–227.
- [11] Handoko, S., & Lazuardi, R. (2023). *Space Frame Optimization for Energy-Efficient Vehicles*. *Jurnal Energi dan Transportasi Hijau*, 2(1), 22–29.
- [12] Satria, Y., & Dewa, I. (2021). *Numerical Analysis of Electric Vehicle Frame Strength Using FEM*. *International Journal of Automotive Research*, 10(1), 99–108.
- [13] Prasetya, A., & Ramadhan, H. (2020). *Mesh Refinement Impact on FEA Accuracy for Structural Frame Analysis*. *Computational Mechanics Journal*, 7(3), 203–211.
- [14] Fadhilah, R., & Prasetyo, B. (2022). *Safety Factor Evaluation in Electric Car Chassis Based on Finite Element Analysis*. *Engineering Science Journal*, 11(4), 310–319.
- [15] O. Zamzam, A. A. Ramzy, M. Abdelaziz, and T. Elnady, “Structural performance evaluation of electric vehicle chassis under static and dynamic loads,” *Scientific Reports*, vol. 15, no. 5168, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-86924-w.