



ANALISIS BEBAN DAN TEGANGAN PADA *KNUCKLE ARM* MOBIL LISTRIK *FORMULA STUDENT*

Don Joean Iskandar^{a*}, Kardiman^a, Siswadi^a, Afif Fachrudin^a, Candan Tabayyun^a, Ardiansyah Arum^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS.Ronggo Waluyo, Kel.Puseurjaya, Kec.Telukjambe Timur, Kab.Karawang, Prov. Jawa Barat, Kode Pos 41361, Indonesia.

*Corresponding authors at: 2110631150093@student.unsika.ac.id (D.J.Iskandar).

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 05 Juni 2025

Direvisi pada 11 Juli 2025

Disetujui pada 20 Agustus 2025

Tersedia daring pada 31 Agustus 2025

Kata kunci:

Knuckle Arm, Kendaraan Listrik, Analisis

Elemen Hingga.

Keywords:

Knuckle Arm, *Electric Vehicle*, *Finite*

Element.

ABSTRAK

Knuckle arm merupakan salah satu komponen penting pada sistem suspensi kendaraan yang berfungsi sebagai penghubung antara sistem kemudi, suspensi, dan roda. Dalam konteks kendaraan listrik, efisiensi struktural dan ketahanan terhadap beban menjadi hal krusial untuk menjamin performa dan keselamatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons mekanis *knuckle arm* terhadap variasi beban statik menggunakan pendekatan simulasi berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Proses pemodelan geometri dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*, sedangkan simulasi dan analisis struktural dilakukan dengan variasi pembebanan sebesar 500 N, 800 N, dan 1000 N. Material yang digunakan adalah Aluminium 6061-T6 dengan tegangan luluh sebesar 275.000.000 N/m². Parameter yang dianalisis meliputi tegangan *von mises*, deformasi total (*displacement*), dan faktor keamanan (*safety factor*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh nilai tegangan maksimum berada jauh di bawah tegangan luluh material, dengan nilai tegangan tertinggi sebesar 4.408.601 N/m² pada beban 1000 N. Deformasi maksimum yang terjadi adalah 0,004 mm, dan nilai *safety factor* konstan sebesar 3,000. Sehingga diketahui desain *knuckle arm* yang dianalisis memiliki ketahanan struktural yang baik dan aman digunakan dalam rentang beban statik tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan desain komponen kendaraan listrik yang lebih efisien dan andal secara struktural.

ABSTRACT

The knuckle arm is a critical component of a vehicle's suspension system, functioning as a connector between the steering system, suspension, and wheels. In the context of electric vehicles, structural efficiency and load-bearing capacity are essential to ensure performance and safety. The aim of this study was to analyze the mechanical response of the knuckle arm under various static loads using the finite element method (FEM). The geometric modeling process was carried out using SolidWorks software, while structural simulations and analyses were conducted under an applied load of 500, 800, and 1000 N. The material used was aluminum 6061-T6, which had a yield strength of 275,000,000 N/m². The parameters analyzed included the von Mises stress, total deformation (displacement), and safety factor. The simulation results showed that all of the maximum stress values remained well below the material's yield strength, with the highest stress recorded at 4,408,601 N/m² under a load of 1000 N. The maximum displacement was found to be 0.004 mm, and the safety factor remained constant at 3.000. These findings indicated that the knuckle arm design had strong structural integrity and was safe for use within the specified range of static loads. The findings of this study serve as a foundation for the development of more efficient and structurally reliable electric vehicle components.

1. PENGANTAR

Perkembangan teknologi transportasi yang berorientasi pada efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan telah mendorong peningkatan signifikan dalam produksi dan penggunaan kendaraan listrik. Berdasarkan laporan dari *International Energy Agency*, penjualan mobil listrik secara global mencapai lebih dari 14 juta unit pada tahun 2023, mencerminkan peningkatan kesadaran terhadap kendaraan rendah emisi dan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil (*Global EV Outlook 2023*, 2023). Transformasi menuju kendaraan listrik tidak hanya menuntut inovasi dalam sistem tenaga, tetapi juga dalam desain dan performa komponen mekanis pendukung.

Salah satu aspek penting dalam pengembangan kendaraan listrik adalah sistem suspensi dan kemudi, yang sangat memengaruhi kenyamanan, stabilitas, serta keselamatan berkendara. Dalam sistem ini, *knuckle arm* berfungsi sebagai penghubung utama antara sistem

kemudi, suspensi, pengereman, dan roda (Dong dkk., 2012). Komponen ini menjadi titik pusat dalam mentransmisikan beban dari permukaan jalan ke struktur kendaraan, sekaligus sebagaiudukan bagi *ball joint*, *tie rod*, dan *bearing* roda. *Knuckle arm* berperan vital dalam menentukan karakteristik gerak roda dan kekakuan sistem kemudi, sehingga memiliki pengaruh langsung terhadap kestabilan dinamis kendaraan (*Advanced Vehicle Technology*, 2002).

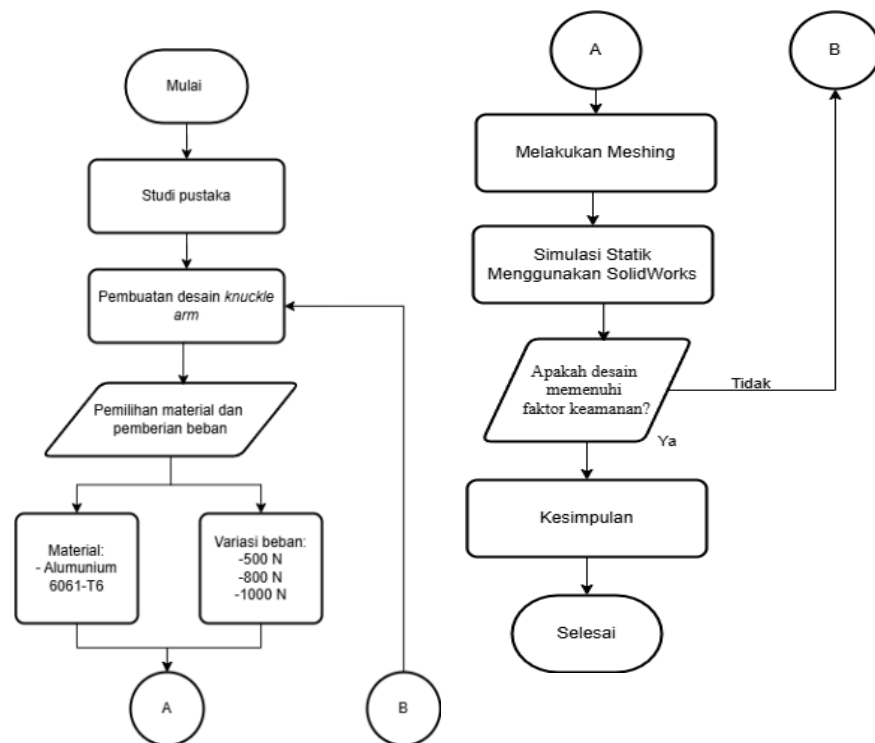
Dalam konteks kendaraan listrik *Formula Student* (FSEV), desain *knuckle arm* menghadapi tantangan yang lebih kompleks dibandingkan dengan kendaraan konvensional. Hal ini terutama disebabkan oleh peningkatan bobot total kendaraan akibat penggunaan baterai berkapasitas tinggi yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi selama kompetisi. Peningkatan massa ini secara langsung mempengaruhi sistem suspensi, di mana *knuckle arm* harus mampu menahan beban vertikal yang lebih besar serta gaya lateral yang signifikan selama manuver kecepatan tinggi di lintasan (Hasan dkk., 2023). Di sisi lain, untuk menjaga efisiensi energi dan jangkauan tempuh, diperlukan pengurangan bobot pada setiap komponen kendaraan, termasuk *knuckle arm*. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis struktural secara mendalam untuk memastikan *knuckle arm* mampu menahan beban statik yang bekerja tanpa mengalami deformasi yang melebihi batas izin, serta tanpa menambah bobot kendaraan secara signifikan (El Fariz & Sena, 2024). Tantangan utama dalam pengembangan *knuckle arm* melibatkan kompromi antara kekuatan mekanik, efisiensi massa, dan ketahanan terhadap konsentrasi tegangan. Desain yang kurang optimal dapat mengakibatkan kelelahan material, retakan dini, atau bahkan kegagalan struktural yang membahayakan keselamatan (Kazantseva dkk., 2023). Dalam hal ini, metode analisis numerik seperti *Finite Element Method* (FEM) menjadi pendekatan yang umum digunakan dalam rekayasa teknik untuk mensimulasikan perilaku material dan distribusi tegangan di bawah beban tertentu (Logan, 2011).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis statik *knuckle arm* pada kendaraan listrik *Formula Student* (FSEV) guna mengetahui distribusi tegangan, deformasi, serta faktor keamanannya. Sehingga melalui analisis ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai performa struktural *knuckle arm*, yang dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan desain atau implementasi yang lebih kuat, ringan, dan andal.

2. METODE

Metode penelitian merupakan langkah sistematis yang digunakan untuk memperoleh data dan informasi dalam rangka menjawab permasalahan serta mencapai tujuan penelitian (Kilani & Kobziev, 2016). Dalam penelitian ini, pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif dengan metode numerik berbasis simulasi. Pendekatan ini dipilih karena mampu menggambarkan perilaku mekanis dari struktur komponen secara menyeluruh dan efisien, khususnya dalam menghadapi kondisi geometri kompleks serta pembebanan yang variatif. Objek yang diteliti merupakan *knuckle arm* pada kendaraan listrik, yang dianalisis secara statik untuk mengetahui respons struktural terhadap beban kerja yang diterima. Untuk tujuan tersebut, digunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*/FEM) yang diimplementasikan melalui perangkat lunak berbasis *Computer-Aided Engineering* (CAE). Metode ini memungkinkan visualisasi distribusi tegangan, deformasi, dan lokasi konsentrasi tegangan yang muncul akibat pembebanan (Dusane dkk., 2016).

Secara umum, pada tahapan penelitian ini yaitu dimulai dari pemodelan geometri *knuckle arm*, penentuan material, penerapan beban dan kondisi batas, proses *mesh*, hingga analisis hasil dan evaluasi tegangan serta deformasi. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai alur kerja penelitian ini pada Gambar 1.



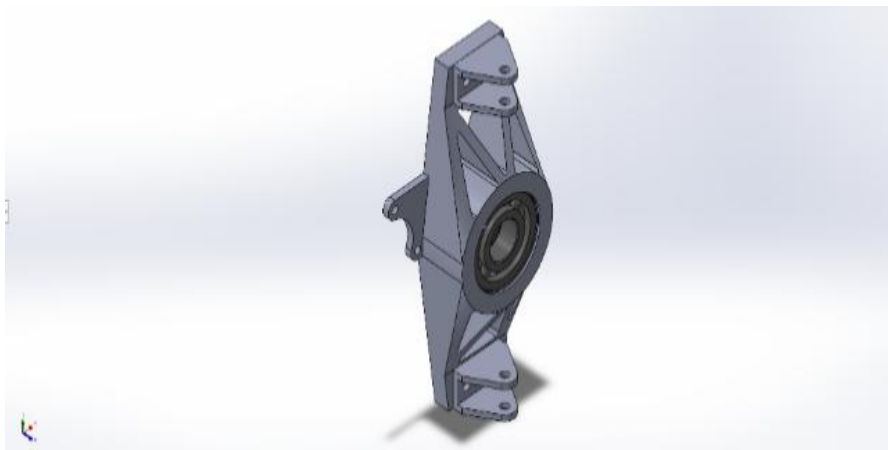
Gambar 1: Diagram Alir Penelitian

2.1 Pemodelan Desain

Knuckle arm merupakan komponen struktural yang berfungsi sebagai penghubung antara roda kendaraan dengan sistem suspensi dan kemudi. Komponen ini memiliki peran penting dalam menyalurkan beban dari roda ke rangka kendaraan serta menjaga kestabilan arah kendaraan selama berkendara. Sehingga, *knuckle arm* harus memiliki kekuatan, kekakuan, dan keandalan yang tinggi terhadap beban kerja

yang diterimanya, baik secara statik maupun dinamik. Dalam penelitian ini, pemodelan desain *knuckle arm* dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*, yang merupakan *software* berbasis *Computer-Aided Design* (CAD) yang banyak digunakan dalam bidang teknik mesin dan manufaktur (Dagar dkk., 2022). Proses pemodelan dilakukan secara tiga dimensi (3D) pada Gambar 2. Berdasarkan pendekatan bentuk umum *knuckle arm* pada kendaraan listrik tipe penumpang. Geometri yang dibuat disesuaikan dengan kebutuhan analisis, dengan tingkat detail yang cukup untuk merepresentasikan bentuk dan dimensi komponen secara realistis.

Pemodelan dilakukan secara parametrik untuk memudahkan penyesuaian dimensi dan memungkinkan pengolahan data lebih lanjut dalam proses simulasi. Pendekatan parametrik ini memberikan fleksibilitas dalam modifikasi desain tanpa perlu membangun ulang model dari awal, sehingga sangat efisien dalam proses iterasi desain teknik. Model yang telah selesai kemudian disimpan dalam format *.SLDPRT* (*SolidWorks Part*) yang merupakan format asli dari perangkat lunak *SolidWorks*. dan secara langsung kompatibel dengan modul simulasi berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Format ini memungkinkan integrasi yang lancar antara tahap desain dan analisis, serta meminimalkan risiko kehilangan detail geometri. Model 3D tersebut menjadi dasar bagi proses analisis statik yang bertujuan untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi akibat pembebanan tertentu. Maka proses pemodelan ini menjadi tahap awal yang sangat penting dalam memastikan ketepatan dan validitas hasil analisis struktural yang akan dilakukan pada tahapan selanjutnya (Tabayyun dkk., 2025). Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan pendekatan komputasional dalam bidang teknik dan fisika yang digunakan untuk menyelesaikan masalah kompleks yang diformulasikan dalam bentuk persamaan diferensial (Hafeez & Krawczuk, 2023a). Metode ini sangat efektif dalam menganalisis fenomena fisis seperti perilaku struktur mekanik, perpindahan panas, aliran fluida, vibrasi, serta distribusi medan elektromagnetik (Hafeez & Krawczuk, 2023b). Prinsip dasar (*Finite Element Method/FEM*) adalah memecah suatu sistem atau struktur yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil yang lebih sederhana dan saling terhubung, yang disebut elemen hingga. Setiap elemen ini dianalisis secara individu untuk menghitung respon lokal terhadap kondisi tertentu, seperti tegangan, suhu, tekanan, atau deformasi (Desai H, 2014). Selanjutnya, hasil dari masing-masing elemen digabungkan secara sistematis untuk membentuk solusi keseluruhan yang merepresentasikan perilaku fisik sistem secara menyeluruh (Paul, 2021). Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk melakukan simulasi terhadap berbagai kondisi pembebanan dan batas tanpa perlu melakukan uji coba fisik secara langsung, sehingga menghemat waktu dan biaya dalam proses desain dan analisis rekayasa.



Gambar 2: Model Desain *Knuckle Arm*

2.2 Karakteristik Material

Pemilihan material merupakan faktor krusial dalam perancangan komponen teknik, karena sifat mekanik dari material akan memengaruhi performa struktural dan keamanan komponen (Tawancy dkk., 2007). Dalam penelitian ini, material yang digunakan untuk *knuckle arm* adalah Aluminium 6061-T6, yaitu paduan aluminium yang telah mengalami perlakuan panas T6 (*solution heat-treated* dan *artificially aged*), sehingga memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan stabil.

Aluminium 6061-T6 banyak diaplikasikan dalam industri otomotif dan dirgantara karena sifatnya yang ringan, kuat, tahan korosi, serta mudah diproses secara mekanis (Minhas dkk., 2023). Material ini sangat cocok digunakan pada komponen struktural kendaraan listrik, termasuk *knuckle arm* yang harus mampu menahan beban kerja statik selama penggunaan. Adapun untuk material properties dari material tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1: Material Properties Aluminium 6061-T6

Material Properties	Nilai
Massa jenis	2,70 g/cm ³
Modulus Elastisitas	$68,9 \times 10^9$ N/m ²
Kekuatan tarik maksimum	310×10^6 N/m ²
Kekuatan luluh (0.2% offset)	275×10^6 N/m ²
Regangan putus	12%
Rasio poisson	0.33
Kekerasan <i>brinell</i>	95 HB

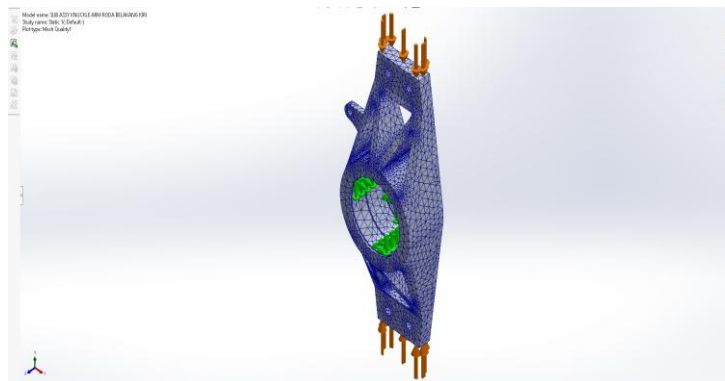
Sumber: Data dari Kaufman, 2019.

2.3 Penerapan Beban, Kondisi Batas dan Meshing

Penerapan beban dan penentuan kondisi batas merupakan langkah penting dalam analisis elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) yang bertujuan untuk merepresentasikan kondisi kerja aktual dari suatu komponen secara numerik (Martins & Romão, 2022). Ketepatan dalam menentukan besaran, arah, serta titik kerja beban, maupun area yang dikekang, sangat memengaruhi validitas dan akurasi hasil simulasi (Lee & Zhang, 2018). Dalam penelitian ini, beban diberikan pada permukaan tertentu dari *knuckle arm* yang berfungsi sebagai titik kontak dengan sistem suspensi dan hub roda. Besar gaya yang diterapkan divariasikan menjadi tiga nilai, yaitu 500 N, 800 N, dan 1000 N, dengan arah tegak lurus terhadap permukaan kerja (arah vertikal) (Zhou & Li, 2024). Variasi beban ini digunakan untuk mengevaluasi respons struktural *knuckle arm* terhadap kondisi pembebanan statik yang berbeda, yang dapat terjadi akibat perubahan beban kendaraan, gaya inersia saat manuver, atau beban akibat pengereman. Pendekatan ini sejalan dengan metode yang digunakan dalam studi oleh peneliti terdahulu Saputro, dimana beban statik sebesar 772,53 N diterapkan pada *knuckle arm* kendaraan *Formula Student* untuk mensimulasikan beban vertikal akibat berat kendaraan. Selain itu, beban lateral sebesar 2317,61 N dan momen pengereman sebesar 92.704 Nmm juga diterapkan untuk merepresentasikan kondisi saat menikung dan pengereman. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tegangan tertinggi terjadi pada titik pemasangan kaliper rem, dengan nilai maksimum mencapai 38,16 MPa, sementara faktor keamanan minimum berada pada angka 5,24, yang masih dalam batas aman untuk aplikasi kendaraan balap ringan (Saputro dkk., 2018).

Adapun kondisi batas (*boundary condition*) ditetapkan pada area tertentu dari *knuckle arm* yang berfungsi sebagai sambungan tetap dengan rangka atau sistem suspensi kendaraan. Area ini dikenai kekangan penuh (*fixed support*), sehingga tidak mengalami perpindahan maupun rotasi selama proses simulasi (Madhusudhanan dkk., 2017). Penetapan ini dilakukan untuk mensimulasikan interaksi antara *knuckle arm* dengan komponen kendaraan lainnya secara struktural. Penerapan beban dan kondisi batas ini dilakukan pada model tiga dimensi (3D) *knuckle arm* yang telah dibuat di *SolidWorks* dan diimpor ke dalam modul simulasi berbasis elemen hingga. Proses ini memungkinkan analisis distribusi tegangan (*von Mises stress*), deformasi (*displacement*) dan *safety factor* (faktor keamanan) akibat variasi pembebanan. Hasil dari tahapan ini akan menjadi dasar untuk mengevaluasi keamanan dan efisiensi desain *knuckle arm*.

Model 3D yang dibuat menggunakan *SolidWorks* kemudian diimpor ke dalam lingkungan simulasi, dilakukan proses *meshing* untuk membagi model menjadi elemen-elemen kecil (*finite elements*) yang memungkinkan analisis numerik. Pada penelitian ini, proses *meshing* dilakukan secara otomatis dengan menggunakan jenis elemen tetrahedral yang sesuai untuk geometri kompleks. Ukuran *mesh* yang disesuaikan dengan kebutuhan ketelitian simulasi, dengan pengaturan *mesh fine* (halus) untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat di area yang mengalami konsentrasi tegangan yang dapat dilihat pada Gambar 3 (Bucalem & Bathe, 1997).



Gambar 3: Penerapan beban, kondisi batas dan meshing pada *knuckle arm*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

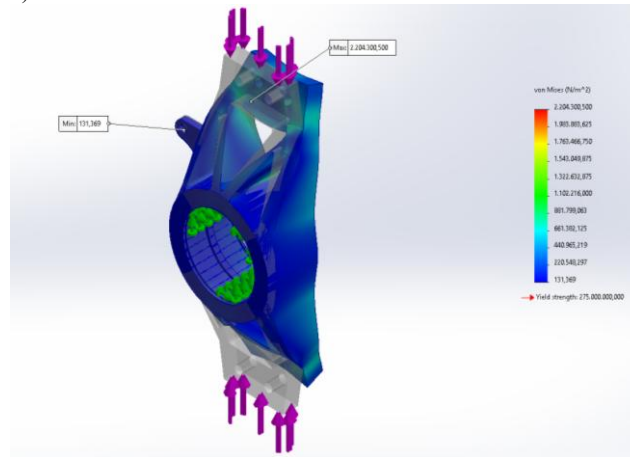
Pada bab tersebut menyajikan hasil dari analisis numerik yang telah dilakukan terhadap komponen *knuckle arm* kendaraan listrik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Simulasi dilakukan pada model tiga dimensi yang telah dirancang dalam perangkat lunak *SolidWorks*, dengan material Aluminium 6061-T6, yang memiliki karakteristik kekuatan mekanik cukup tinggi dan ringan sehingga sesuai untuk aplikasi otomotif. Penelitian ini yaitu menerapkan tiga variasi beban statik, yaitu sebesar 500 N, 800 N, dan 1000 N, yang ditujukan untuk merepresentasikan kondisi pembebanan nyata yang mungkin terjadi pada *knuckle arm* saat kendaraan dalam keadaan diam, membawa beban penuh, ataupun ketika mengalami gaya tambahan akibat akselerasi atau pengereman mendadak. Ketiga variasi beban ini digunakan untuk mengevaluasi performa struktural komponen terhadap tingkat pembebanan yang berbeda.

Parameter utama yang diamati dalam simulasi mencakup tegangan *von Mises*, deformasi total (*total displacement*), dan faktor keamanan (*safety factor*). Tegangan *von Mises* digunakan sebagai indikator utama dalam menentukan apakah material mengalami kegagalan plastis berdasarkan kriteria kekuatan luluh. Deformasi total pada analisis ini dianalisis untuk mengetahui sejauh mana perubahan bentuk yang terjadi pada komponen akibat beban yang diterapkan. Sementara itu, faktor keamanan yang dihitung untuk mengevaluasi seberapa jauh kekuatan aktual material mampu menahan beban sebelum mencapai kondisi gagal. Dimana hasil simulasi yang diperoleh disajikan dalam bentuk visualisasi warna (*contour plot*), tabel, serta grafik untuk memudahkan interpretasi terhadap distribusi tegangan dan deformasi. Selanjut nya, dilakukan pembahasan terhadap hasil tersebut dengan mengacu pada nilai kekuatan luluh material (*yield strength*) sebesar 275 MPa dan mempertimbangkan standar umum dalam rekayasa mekanik terkait batas aman desain.

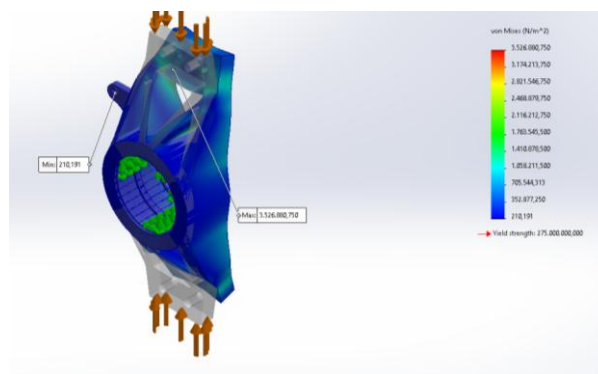
Melalui pembahasan ini, diharapkan dapat diperoleh kesimpulan mengenai kelayakan desain *knuckle arm* dari segi kekuatan dan stabilitas struktural, serta memberikan masukan terhadap kemungkinan perbaikan desain jika ditemukan area kritis dengan konsentrasi tegangan tinggi atau deformasi berlebih.

3.1 Tegangan Von mises pada Knuckle Arm

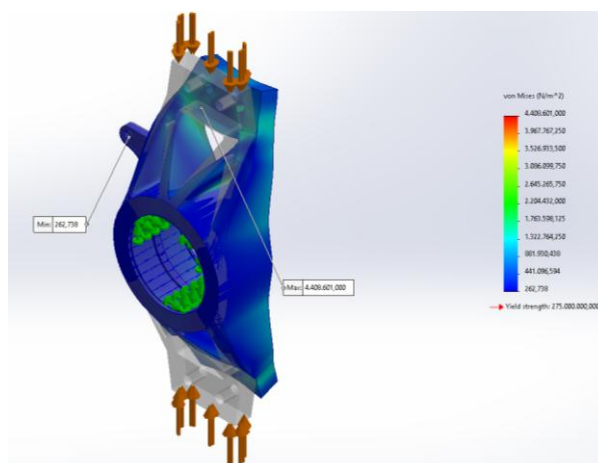
Analisis tegangan *von mises* merupakan salah satu pendekatan penting dalam evaluasi kekuatan material terhadap beban statik. Tegangan ini dihitung berdasarkan teori distorsi energi, yang banyak digunakan untuk memprediksi kegagalan material *duktile* seperti Aluminium 6061-T6. Pada penelitian ini, tegangan *von Mises* digunakan untuk mengidentifikasi sebaran tegangan akibat pembebanan statik pada *knuckle arm* dan untuk membandingkannya dengan nilai kekuatan luluh material, yaitu sebesar 275 MPa. Simulasi dilakukan dengan menerapkan tiga variasi beban, yaitu 500 N, 800 N, dan 1000 N, yang bekerja secara vertikal pada area tertentu dari *knuckle arm*. Hasil distribusi tegangan divisualisasikan dalam bentuk kontur warna (*stress contour*), yang menunjukkan area dengan tegangan tinggi dan rendah dapat dilihat pada Gambar (4-6).



Gambar 4: Tegangan *von mises* beban 500N



Gambar 5: Tegangan *von mises* beban 800N

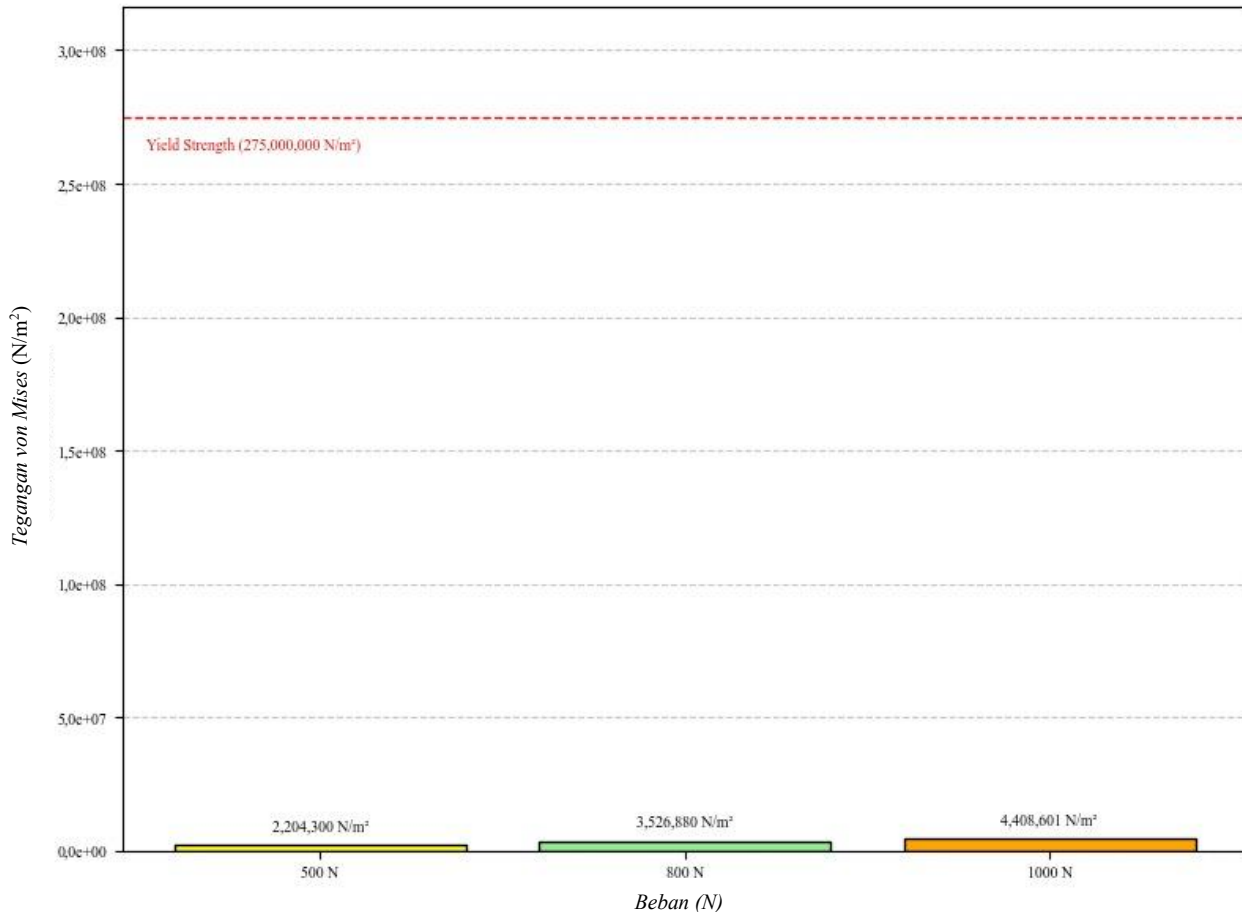


Gambar 6: Tegangan *von mises* beban 1000N

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebaran tegangan tidak merata pada seluruh bagian *knuckle arm*. Konsentrasi tegangan tertinggi umumnya terjadi pada area sambungan (*lug* atau *mounting hole*), terutama di sekitar tepi lubang dan sudut peralihan geometri, yang merupakan titik lemah potensial secara struktural. Tegangan maksimum yang dihasilkan pada setiap skenario pembebanan ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 7 berikut.

Table 2: Tegangan *von mises* pada *knuckle arm* dengan variasi beban

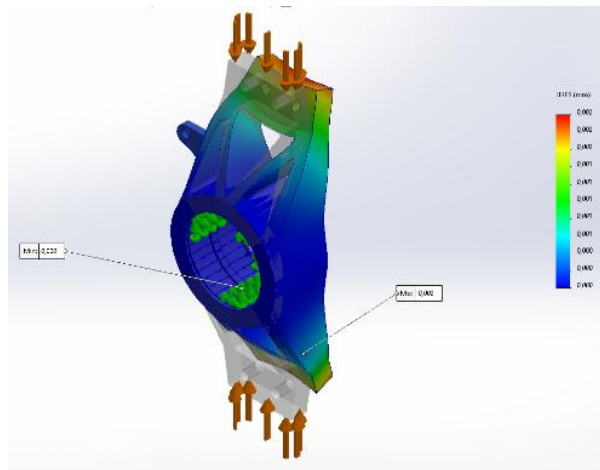
Yield Strength (N/m ²) Aluminium 6061-T6	Von Mises Stress Maksimum	
	Beban (N)	Nilai (N/m ²)
275.000.000	500 N	2.204.300
	800 N	3.526.880
	1000 N	4.408.601

**Gambar 7.** Perbandingan hasil tegangan *von mises* dengan variasi beban pada *knuckle arm*

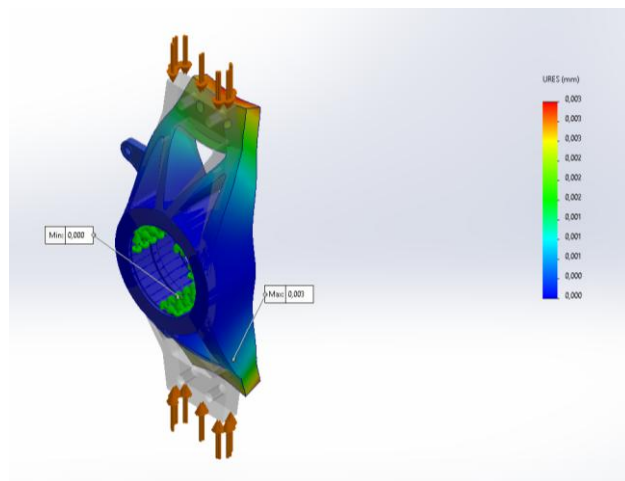
Perbandingan hasil simulasi statik pada *von mises stress* yang dilihat pada Gambar 7 dengan menunjukkan hubungan antara variasi beban statik terhadap tegangan *von mises* maksimum pada komponen *knuckle arm* kendaraan listrik berbahan Aluminium 6061-T6. Beban yang divariasikan sebesar 500 N, 800 N, dan 1000 N menghasilkan tegangan berturut-turut sebesar 2.204.300 N/m², 3.526.880 N/m², dan 4.408.601 N/m². Nilai-nilai tegangan ini dibandingkan dengan batas *yield strength* material, yang ditandai oleh garis putus-putus berwarna merah pada 275.000.000 N/m². Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh tegangan maksimum yang dihasilkan berada jauh di bawah batas elastis material, sehingga secara struktural *knuckle arm* masih berada dalam kondisi aman dan mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen.

3.2 Displacement pada *knuckle arm*

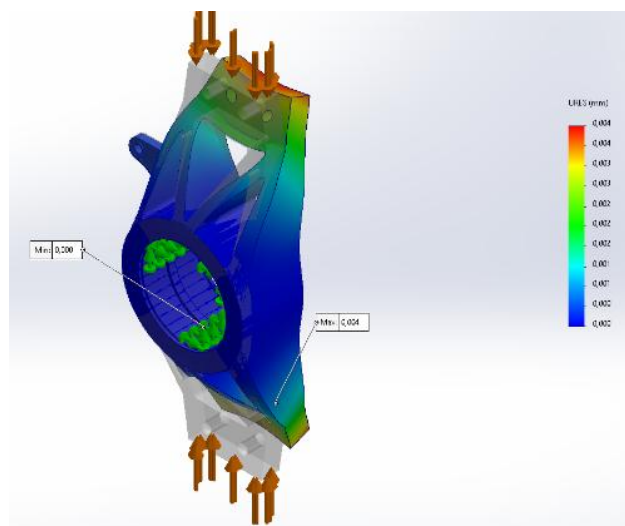
Displacement atau defomarsi total merupakan salah satu parameter penting dalam menganalisis perilaku deformasi pada suatu komponen ketika menerima beban. Pada komponen struktural seperti *knuckle arm*, *displacement* yang melebihi batas toleransi dapat menyebabkan gangguan fungsi mekanis, penurunan akurasi geometri, hingga potensi kerusakan pada sambungan dengan komponen lainnya. Oleh karena itu, evaluasi *displacement* dilakukan untuk memastikan bahwa desain yang digunakan masih berada dalam batas aman secara struktural dilihat pada Gambar (8-10).



Gambar 8: *Displacement* beban 500N



Gambar 9: *Displacement* beban 800 N



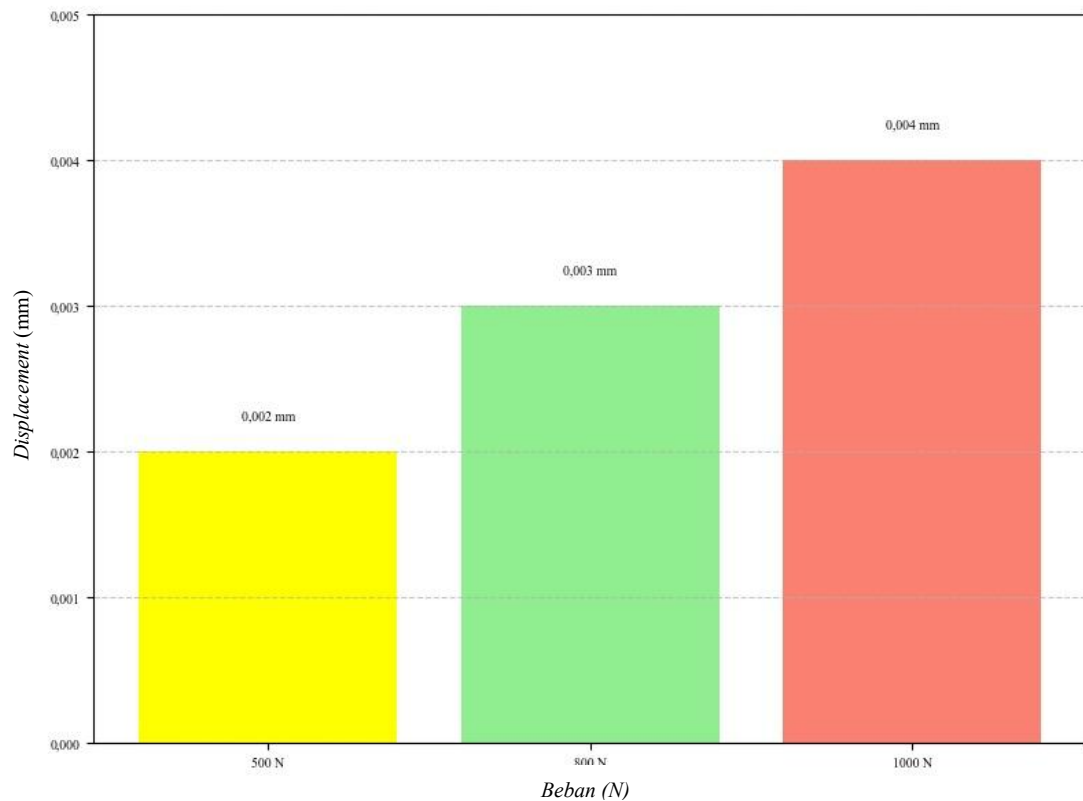
Gambar 10: *Displacement* beban 10.000 N

Pada beban 500 N (Gambar 8), nilai deformasi maksimum tercatat sebesar 0,002 mm. Nilai ini meningkat menjadi 0,003 mm saat beban dinaikkan menjadi 800 N (Gambar 9), dan mencapai 0,004 mm pada pembebanan 1000 N (Gambar 10). Pola kenaikan ini memperlihatkan hubungan linear antara besar gaya dan deformasi, yang mengindikasikan bahwa material bekerja dalam wilayah elastis tanpa mengalami kerusakan permanen. Dalam penelitian ini, nilai *displacement* yang diperoleh menunjukkan kesesuaian dengan hasil studi sebelumnya yang dilakukan oleh Ujiburrahman, di mana pengujian komponen berbahan aluminium menggunakan pendekatan metode

elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) menghasilkan deformasi total yang sebanding. Bahkan, nilai *displacement* pada penelitian ini cenderung lebih rendah, yang mengindikasikan bahwa desain *knuckle arm* yang dianalisis memiliki karakteristik kekakuan struktural yang lebih baik dalam menahan beban statik (Ujiburrahman, 2025). *Displacement* (deformasi total) maksimum yang dihasilkan pada setiap skenario pembebanan ditampilkan pada Tabel 3 dan Gambar 11 berikut.

Table 3: *Displacement* pada *knuckle arm* dengan variasi beban

<i>Displacement</i>	
Beban (N)	Nilai (mm)
500	0,002
800	0,003
1000	0,004

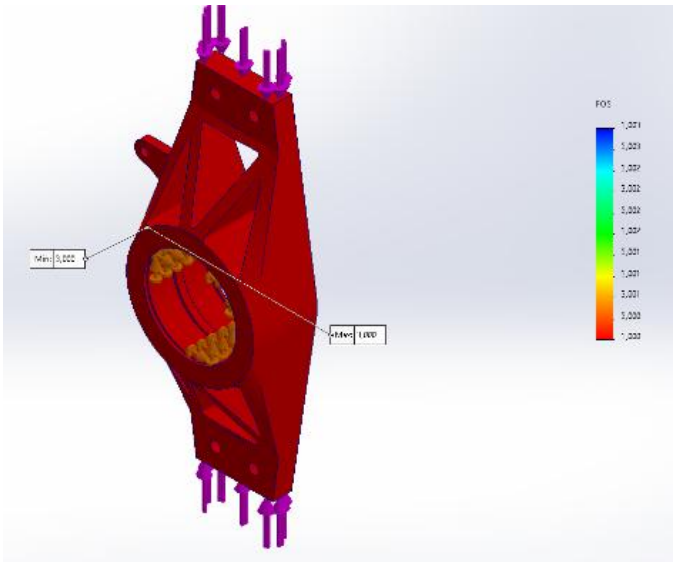


Gambar 11: Perbandingan *displacement* dengan variasi beban pada *knuckle arm*

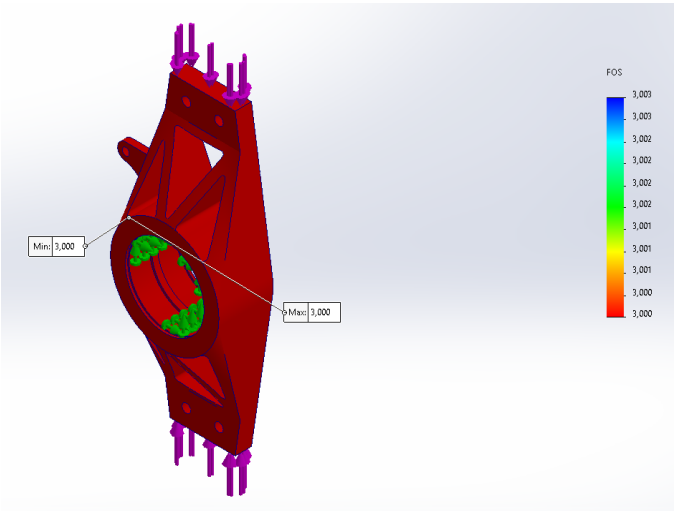
Pada Gambar 11 yang menunjukkan hubungan antara *displacement* (mm) terhadap variasi beban statik (N) pada komponen *knuckle arm* hasil simulasi metode elemen hingga. Nilai *displacement* terendah sebesar 0,002 mm diperoleh saat beban 500 N diterapkan, sedangkan nilai tertinggi sebesar 0,004 mm terjadi pada beban 1000 N. Peningkatan *displacement* ini menunjukkan kecenderungan linear terhadap pertambahan gaya, yang konsisten dengan respons elastis material Aluminium 6061-T6. Meskipun terjadi peningkatan deformasi, seluruh nilai *displacement* masih berada jauh di bawah batas deformasi plastis material, sehingga tidak menimbulkan risiko kerusakan struktural permanen. Hal ini menunjukkan bahwa desain *knuckle arm* mampu mempertahankan kestabilan geometrinya di bawah kondisi pembebanan statik yang bervariasi dan tetap memenuhi kriteria kelayakan struktural dari aspek deformasi.

3.3 Safety Factor pada Knuckle Arm

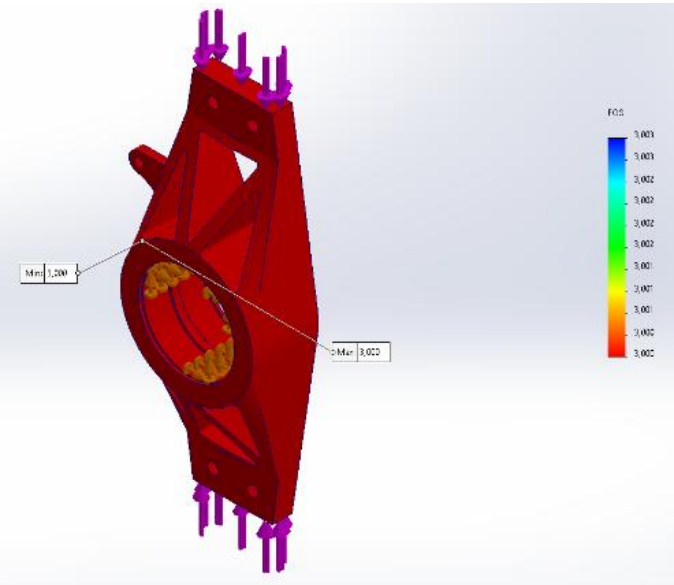
Safety factor atau faktor keamanan merupakan parameter penting dalam evaluasi kelayakan struktural suatu komponen teknik. Nilai ini menunjukkan seberapa jauh batas kekuatan material dibandingkan dengan beban maksimum yang dialami dalam kondisi kerja. Pada komponen *knuckle arm*, *safety factor* digunakan untuk menilai apakah struktur masih berada dalam zona aman terhadap kemungkinan kegagalan akibat pembebanan yang diterima. Nilai *safety factor* diperoleh dengan membandingkan kekuatan luluh material (*yield strength*) terhadap tegangan maksimum yang terjadi akibat beban kerja. Dalam studi ini, material yang digunakan adalah Aluminium 6061-T6 dengan *yield strength* sebesar 275 MPa. Perhitungan *safety factor* dilakukan berdasarkan hasil tegangan maksimum dari simulasi metode elemen hingga pada masing-masing variasi beban statik, yaitu 500 N, 800 N, dan 1000 N. Nilai *safety factor* yang lebih besar dari satu menunjukkan bahwa struktur masih berada dalam kondisi aman, sedangkan nilai mendekati atau kurang dari satu mengindikasikan potensi kegagalan plastis. Oleh karena itu, analisis faktor keamanan penting dilakukan guna memastikan bahwa desain *knuckle arm* mampu bertahan dalam kondisi operasional yang realistis dan memiliki margin keselamatan yang memadai. Adapun nilai faktor keamanan (*safety factor*) dapat dilihat pada Gambar (12-14).



Gambar 12: *Safety factor* beban 500 N



Gambar 13: *Safety factor* beban 800 N

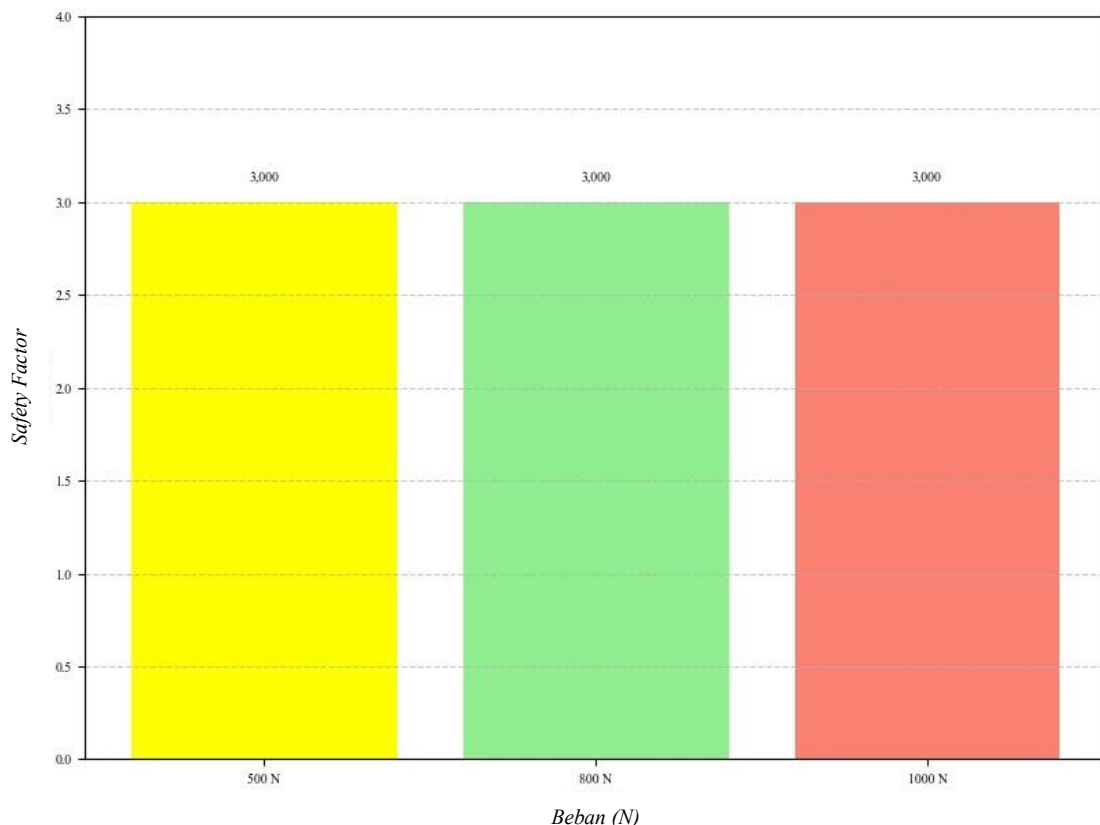


Gambar 14: *Safety factor* beban 1000 N

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan (*safety factor*) pada *knuckle arm* tetap konsisten sebesar 3,000, meskipun beban statik yang diterapkan divariasikan pada tiga tingkat, yaitu 500 N, 800 N, dan 1000 N. Konsistensi nilai ini mengindikasikan bahwa material Aluminium 6061-T6 yang digunakan masih memiliki cadangan kekuatan sebesar tiga kali dari beban maksimum sebelum mencapai tegangan luluhnya. Kestabilan nilai *safety factor* tersebut menandakan bahwa struktur bekerja sepenuhnya dalam wilayah elastis, tanpa mengalami degradasi kemampuan struktural meskipun beban meningkat. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa desain *knuckle arm* memiliki performa struktural yang baik dan mampu menjaga kestabilan tegangan, sehingga tetap aman untuk digunakan dalam berbagai kondisi pembebanan statik. Nilai *safety factor* pada setiap skenario pembebanan ditampilkan pada Tabel 4 dan Gambar 15 berikut.

Table 4: *Safety factor* pada *knuckle arm* dengan variasi beban

<i>Safety Factor</i>	
Beban	Nilai
500	3,000
800	3,000
1000	3,000



Gambar 15: Perbandingan *safety factor* dengan variasi beban pada *knuckle arm*

Pada Gambar 15 yang menunjukkan hubungan antara variasi beban statik dan nilai *safety factor* pada *knuckle arm* berbahan Aluminium 6061-T6. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *safety factor* pada ketiga variasi beban, yaitu 500 N, 800 N, dan 1000 N, memiliki nilai konstan sebesar 3,000. Nilai ini mengindikasikan bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada struktur masih jauh di bawah batas kekuatan luluh material (*yield strength*) sebesar 275 MPa. Faktor keamanan sebesar 3 menunjukkan bahwa struktur memiliki margin keamanan tiga kali lipat terhadap beban kerja yang diterapkan, sehingga dinilai sangat aman dalam menahan beban statik yang diberikan. Nilai yang seragam pada setiap skenario pembebanan juga mencerminkan karakteristik linear elastis dari material, serta distribusi tegangan yang terkendali dalam desain geometri *knuckle arm*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa desain ini telah memenuhi standar kelayakan struktural dari aspek kekuatan dan keamanan.

4. KESIMPULAN

Proses pemodelan desain, karakterisasi material, penerapan beban, serta simulasi dan analisis numerik berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method*) pada *knuckle arm* kendaraan listrik menunjukkan performa struktural dan kelayakan desain komponen. Tahapan meliputi pemodelan geometri dengan CAD, penentuan material Aluminium 6061-T6, serta evaluasi respons mekanis terhadap variasi beban statik, yang menggambarkan kemampuan struktur menahan pembebanan tanpa kegagalan plastis maupun deformasi berlebihan. Desain *knuckle arm* berhasil dimodelkan secara tiga dimensi menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*, dengan mempertimbangkan elemen-elemen fungsional dan titik tumpu utama sebagai dasar pembebanan. Proses pemodelan memperhatikan kontur geometri dan lokasi sambungan (*lug*) sebagai titik kritis untuk analisis tegangan. Material Aluminium 6061-T6 memiliki karakteristik mekanik utama yaitu tegangan luluh (*yield strength*) sebesar 275.000.000 N/m² dan modulus elastisitas sebesar 68.900.000.000 N/m².

Material ini dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang baik serta ketahanan terhadap deformasi permanen dalam rentang beban kerja kendaraan ringan. Analisis tegangan *von mises* menunjukkan bahwa nilai maksimum tegangan yang terjadi pada variasi beban 500 N, 800 N, dan 1000 N berturut-turut adalah 2.204.300 N/m², 3.526.880 N/m², dan 4.408.601 N/m². Nilai-nilai tersebut masih jauh di bawah tegangan luluh material (275.000.000 N/m²), sehingga struktur *knuckle arm* dinyatakan aman terhadap kegagalan plastis. Konsentrasi tegangan terbesar terdeteksi pada area sambungan, khususnya di sekitar lubang dan peralihan sudut, yang merupakan titik lemah potensial dalam desain. *Displacement* (deformasi total) mengalami peningkatan proporsional terhadap besarnya gaya yang diterapkan, dengan nilai maksimum sebesar 0,004 mm pada beban 1000 N. Seluruh nilai deformasi berada dalam batas elastisitas material, menunjukkan bahwa struktur tetap mampu kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan, dan tidak mengalami deformasi permanen. Faktor keamanan (*safety factor*) menunjukkan nilai konstan sebesar 3,000 pada seluruh skenario pembebanan. Hal ini menunjukkan bahwa struktur *knuckle arm* memiliki margin keamanan yang tinggi, yakni mampu menahan beban hingga tiga kali lipat dari beban maksimum kerja aktual sebelum mencapai batas luluh. Nilai tersebut menjadi indikator bahwa desain saat ini telah berada pada tingkat keamanan struktural yang memadai.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa desain dan pemilihan material *knuckle arm* mobil listrik telah memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, dan keamanan struktural. *Knuckle arm* mampu bekerja optimal dalam menahan beban statik yang diberikan tanpa mengalami kerusakan atau deformasi berlebih. Penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam pengembangan desain komponen suspensi kendaraan listrik dengan pendekatan rekayasa berbasis simulasi numerik. Evaluasi lanjutan dapat difokuskan pada pengujian dinamis atau pembebanan siklik untuk mengetahui performa jangka panjang dari desain tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa diperlukan validasi eksperimental terhadap hasil simulasi numerik. Meskipun analisis berbasis metode elemen hingga (FEM) telah memberikan gambaran awal mengenai perilaku struktural *knuckle arm*, namun data simulasi tetap memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Oleh karena itu, pengujian fisik melalui metode seperti uji tarik, uji tekan, atau uji beban statik langsung terhadap *prototipe knuckle arm* sangat diperlukan. Sehingga langkah ini bertujuan untuk mengonfirmasi akurasi hasil simulasi serta memastikan bahwa performa struktur sesuai dengan prediksi numerik. Validasi ini juga penting dalam proses rekayasa produk agar desain yang dikembangkan dapat digunakan secara aman dan andal pada kendaraan listrik dalam kondisi operasional sesungguhnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulisan ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Kardiman, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Siswadi, M.Pd. atas segala bimbingan, arahan, serta ilmu yang telah diberikan selama proses penulisan. Semoga segala kebaikan dan bantuan yang diberikan mendapat balasan terbaik dari Allah Subhanahu wa Ta'ala.

DAFTAR PUSTAKA

- Advanced Vehicle Technology*. (2002). Elsevier.
- Bucalem, M. L., & Bathe, K. J. (1997). Finite element analysis of shell structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 4(1), 3–61.
- Dagar, N., Sharma, R., Lal Rinawa, M., Gupta, S., Chaudhary, V., & Gupta, P. (2022). Design and analysis of piston using aluminum alloy and composites in Solidworks and Ansys. *Materials Today: Proceedings*, 67, 784–791.
- Desai H, M. S. (2014). Basic Concepts of Finite Element Analysis and its Applications in Dentistry: An Overview. *Journal of Oral Hygiene & Health*, 02(05).
- Dong, Z. R., Deng, Z. J., Ren, S. Y., Qiu, H., & Qi, T. Z. M. (2012). Suspension Design and Research for Electric Vehicles with Independent Steering and Driving. *Advanced Materials Research*, 479–481, 1481–1489.
- Dusane, S. V., Dipke, M. K., & Kumbhalkar, M. A. (2016). Analysis of Steering Knuckle of All Terrain Vehicles (ATV) Using Finite Element Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149, 012133.
- El Fariz, H., & Sena, B. (2024). Analisis Knuckle Arm Mobil Listrik Anobrain AR-1 Dengan Menggunakan Metode Finite Element. *Journal Serambi Engineering*, 9(1), 7908–7916.
- Global EV Outlook 2023*. (2023). OECD.
- Hafeez, M. B., & Krawczuk, M. (2023a). A Review: Applications of the Spectral Finite Element Method. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(5), 3453–3465.
- Hafeez, M. B., & Krawczuk, M. (2023b). A Review: Applications of the Spectral Finite Element Method. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(5), 3453–3465.
- Hasan, A., Lu, C., & Liu, W. (2023). Lightweight Design and Analysis of Steering Knuckle of Formula Student Car Using Topology Optimization Method. *World Electric Vehicle Journal*, 14(9), 233.
- Kaufman, J. G. (2019). Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. In *Properties and Selection of Aluminum Alloys* (pp. 96–129). ASM International.
- Kazantseva, N., Il'inikh, M., Kuznetsov, V., Koemets, Y., Bakhrunov, K., & Karabanalov, M. (2023). Design and Structural Factors' Influence on the Fatigue Life of Steel Products with Additive Manufacturing. *Materials*, 16(23), 7315.
- Kilani, M. Al, & Kobziev, V. (2016). An Overview of Research Methodology in Information System (IS). *OALib*, 03(11), 1–9.

- Lee, W., & Zhang, C. (2018). Computational consistency of the material models and boundary conditions for finite element analyses on cantilever beams. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6).
- Logan, D. L. (2011). *A first course in the finite element method* (Vol. 4). Thomson.
- Madhusudhanan, S., Rajendran, I., & Raguganeshkumar, B. (2017). Fatigue Analysis of Steering Knuckle using Finite Element Simulation: Technical Note. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 9(3).
- Martins, J. A., & Romão, E. C. (2022). The Importance of Accurate Boundary Condition in Obtaining Reliable Shearing Stresses on a Torsional Finite Element Simulation. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(3), 8482–8487.
- Minhas, N., Sudheer, L., Sharma, V., & Bhadauria, S. S. (2023). Evaluating the corrosion behaviour of AA6061-T6 alloy and its friction stir welded joints. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 62(2), 244–261.
- Paul, S. (2021). Finite element analysis in fused deposition modeling research: A literature review. *Measurement*, 178, 109320.
- Saputro, B. A., Ubaidillah, Triono, D. A., Pratama, D. R., Cahyono, S. I., & Imaduddin, F. (2018). *Static load simulation of steering knuckle for a formula student race car*. 030049.
- Tabayyun, C., Kardiman, & Ujiburrahman. (2025). Analisis Frame Meja Dandori Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA). *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*, 4(2), 77–87.
- Tawancy, H. M., Ul-Hamid, A., Mohammed, A. I., & Abbas, N. M. (2007). Effect of materials selection and design on the performance of an engineering product – An example from petrochemical industry. *Materials & Design*, 28(2), 686–703.
- Ujiburrahman. (2025). Analisis Statis Komponen Bell Crank pada Mobil Listrik dengan Finite Element Analysis. *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*, 4(2), 103–111.
- Zhou, Y., & Li, H. (2024). Study on failure assessment and experimental validation of automotive steering knuckle in McPherson front suspension system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 238(1), 241–261.