

Analisis Statis Komponen *Bell Crank* pada Mobil Listrik dengan *Finite Element Analysis*

Ujiburrahman^{1*}, Ardiansyah Arum², Candan Tabayyun³

^{1,2,3}Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang

*Penulis Korespondensi, email: ujiburrahman@ft.unsika.ac.id

Received:19/05/2025

Revised:20/05/2025

Accepted:22/05/2025

Abstract. The bell crank is a crucial component in the suspension system of electric vehicles, serving to redirect and distribute forces from the wheels to the damping system. Structural strength and material selection are key factors influencing the performance and reliability of this component. This study aims to determine the most optimal material for the bell crank in electric vehicles based on structural strength analysis. A static simulation using the Finite Element Analysis (FEA) method was conducted, applying a load of 10,000 N on the moving pivot, with fixed support at the fixed pivot. Three material variations were evaluated: Magnesium AZ91D, AISI 1045, and Aluminum 2024-T3. The analysis focused on von mises stress, maximum displacement, and safety factor. The results show that all materials experienced similar von mises stress levels around 83 MPa, remaining below their respective yield strengths. AISI 1045 exhibited the best performance, with the lowest displacement (0.004 mm) and the highest safety factor (5.396), making it the most suitable material for the bell crank application. Further research is recommended to include dynamic or cyclic loading analysis and experimental validation to enhance accuracy. Additionally, assessing weight efficiency through specific strength analysis and utilizing design optimization features in CAD/CAE software is proposed to develop lighter yet structurally sound components. These findings are expected to contribute to the efficient and reliable structural design of electric vehicle components.

Keywords: Bell crank, Electric vehicle, Finite element method

Abstrak. *Bell crank* merupakan komponen penting dalam sistem suspensi kendaraan listrik yang berperan dalam mengubah arah dan distribusi gaya dari roda ke sistem redaman. Kekuatan struktural dan pemilihan material menjadi faktor utama yang memengaruhi kinerja dan keandalan komponen ini. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan material paling optimal yang digunakan pada komponen *bell crank* kendaraan listrik berdasarkan analisis kekuatan struktur. Metode yang digunakan adalah simulasi statik dengan pendekatan *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan pembebanan sebesar 10.000 N pada bagian *moving pivot*, serta *fixed geometry* pada bagian *fixed pivot*. Tiga variasi material dibandingkan, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3. Parameter evaluasi meliputi tegangan *von mises*, *displacement maksimum*, dan nilai *safety factor*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketiga material memiliki nilai tegangan *von mises* serupa di kisaran 83 MPa, yang masih berada di bawah batas luluh masing-masing material. AISI 1045 menunjukkan performa terbaik dengan *displacement* terkecil (0,004 mm) dan *safety factor* tertinggi (5,396), sehingga dinilai paling optimal untuk aplikasi *bell crank*. Penelitian ini menyarankan pengembangan lanjutan berupa analisis kondisi dinamis dan pembebanan berulang, serta validasi eksperimental untuk meningkatkan akurasi hasil. Selain itu, analisis efisiensi bobot melalui pendekatan *specific strength* serta penerapan fitur optimasi desain pada perangkat lunak CAD/CAE diusulkan guna mendukung perancangan komponen yang lebih ringan dan tetap kuat. Temuan ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap pengembangan desain struktural kendaraan listrik yang efisien dan andal.

Kata Kunci: *Bell crank*, Kendaraan listrik, Metode elemen hingga

I. PENDAHULUAN

Dalam upaya mendukung pengembangan kendaraan ramah lingkungan, kendaraan listrik (*electric vehicle/EV*) semakin banyak dikembangkan dengan menitikberatkan pada efisiensi energi dan pengurangan bobot total kendaraan. Salah satu komponen penting dalam

sistem suspensi yang memengaruhi performa dinamis serta kenyamanan berkendara adalah *bell crank*, yaitu tuas penghubung yang berfungsi mengubah arah gaya dari sistem suspensi ke arah vertikal atau horizontal sesuai konfigurasi desain [1]. Dalam mobil listrik, kebutuhan akan komponen yang ringan namun tetap kuat menjadi tantangan utama karena bobot berlebih dapat berdampak

langsung pada konsumsi energi dan jarak tempuh [2]. Hal ini mendorong perlunya analisis mendalam terhadap performa struktural *bell crank* menggunakan material alternatif yang ringan namun memiliki kekuatan mekanis memadai.

Tantangan utama yang dihadapi adalah bagaimana memilih material dan desain *bell crank* yang mampu menahan beban kerja kendaraan tanpa mengalami deformasi berlebih atau kegagalan struktural. Berdasarkan kajian yang dilakukan oleh, Sharma et al. (2021), pada sistem suspensi *pullrod* yang digunakan dalam prototipe FSAE, komponen *bell crank* dianalisis menerima gaya sebesar 10.000 N sebagai representasi beban maksimum yang mungkin terjadi akibat manuver ekstrem atau kondisi jalan tidak rata [3]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, pembebanan sebesar 10.000 N digunakan sebagai dasar perhitungan beban maksimum pada *bell crank* untuk menggambarkan skenario terburuk (*worst-case scenario*) yang realistis.

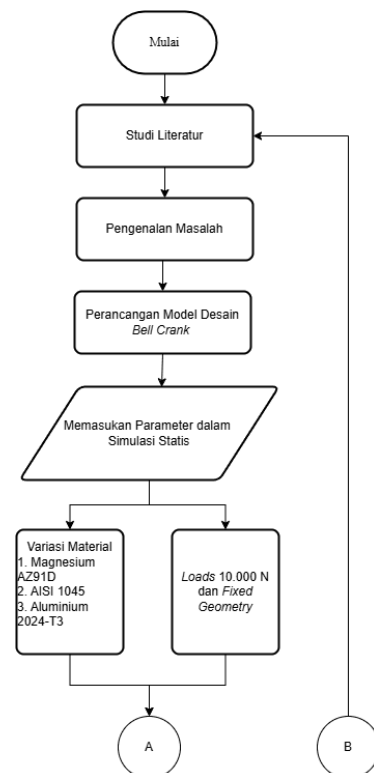
Sebagai solusi, dilakukan analisis statik dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) terhadap *bell crank* menggunakan tiga jenis material berbeda, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3. Berdasarkan dari penelitian yang dilakukan Kučera, J., et al. (2023), Magnesium AZ91D dikenal sebagai logam ringan dengan densitas rendah dan kemampuan cor yang baik, namun memiliki modulus elastisitas lebih rendah dibanding logam lainnya [4]. AISI 1045 merupakan baja karbon menengah dengan kekuatan tarik dan ketahanan deformasi tinggi, tetapi lebih berat sehingga kurang ideal untuk aplikasi ringan [5]. Aluminium 2024-T3, banyak digunakan dalam industri otomotif dan dirgantara, menawarkan kombinasi yang seimbang antara kekuatan tinggi dan bobot rendah [6]. Dengan membandingkan respons tegangan, regangan, dan deformasi dari ketiga material tersebut di bawah beban 10.000 N, Penelitian ini bertujuan untuk menentukan material yang paling optimal digunakan pada komponen *bell crank* mobil listrik, yang berdasarkan parameter kekuatan

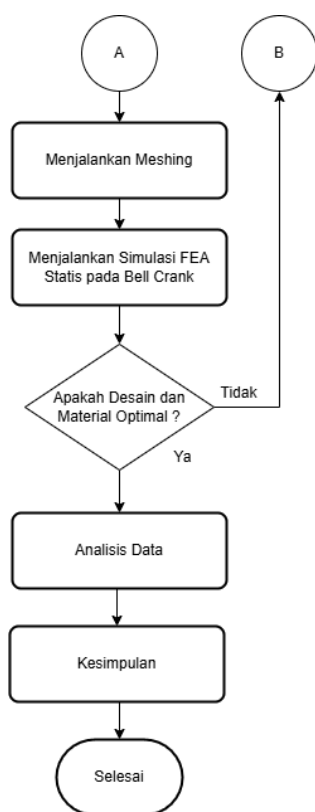
struktur melalui analisis elemen hingga diantaranya *von mises stress*, *displacement* dan *safety factor* [7].

II. METODOLOGI

Penelitian ini disusun untuk menganalisis perilaku struktural komponen *bell crank* menggunakan SolidWorks pada listrik menggunakan pendekatan simulasi elemen hingga (*Finite Element Analysis*). Penelitian difokuskan pada perbandingan tiga jenis material, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3, guna mengetahui respons tegangan, deformasi, dan faktor keamanan dari masing-masing material.

Analisis dilakukan dengan memberikan pembebanan sebesar 10.000 N pada model *bell crank*, yang merepresentasikan kondisi beban maksimum berdasarkan studi sebelumnya terhadap sistem suspensi kendaraan dinamis. Proses penelitian dilaksanakan secara bertahap, dimulai dari pemodelan geometri, pemilihan properti material, penetapan beban dan batasan, hingga proses *meshing*. Seluruh tahapan dijabarkan dalam bentuk diagram alir untuk menunjukkan urutan kerja secara sistematis.





Gambar 1. Diagram penelitian analisis statis pada bell crank

A. Material properties

Pemilihan material merupakan salah satu faktor kunci dalam analisis struktur komponen teknik, khususnya untuk kendaraan listrik yang menuntut bobot ringan namun tetap memiliki kekuatan tinggi [8]. Dalam penelitian ini, digunakan tiga jenis material yang umum diaplikasikan pada komponen otomotif, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3. Setiap material memiliki karakteristik mekanik yang berbeda, seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan massa jenis, yang memengaruhi respons struktur terhadap pembebanan. Data sifat mekanik dari ketiga material disajikan dalam Tabel (1-3) sebagai dasar input untuk simulasi elemen hingga.

Tabel 1. Material Properties Magnesium AZ91D

Parameter	Nilai	
Density	1810 kg/m ³	[9]
Modulus of Elasticity	44,800 N/mm ² (MPa)	
Poisson Ratio	0.35	

Yield Strength	150 N/mm ² (MPa)	
Tensile Strength	230 N/mm ² (MPa)	

Tabel 2. Material Properties baja AISI 1045

Parameter	Nilai	
Density	7870 kg/m ³	[10]
Modulus of Elasticity	205000 N/mm ²	
Poisson Ratio	0.29	
Yield Strength	450 N/mm ²	
Tensile Strength	585 N/mm ²	

Tabel 3. Material properties Aluminium 2024-T3

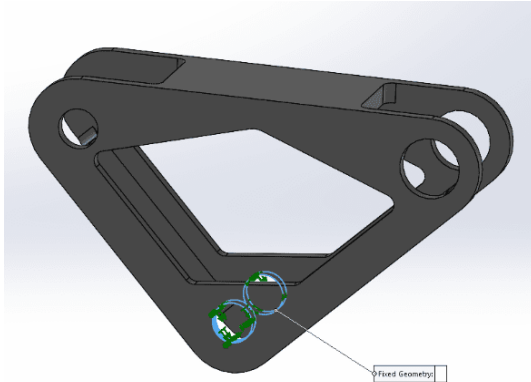
Parameter	Nilai	
Density	2780 kg/m ³	[11]
Modulus of Elasticity	73000 N/mm ²	
Poisson Ratio	0.33	
Yield Strength	325 N/mm ²	
Tensile Strength	470 N/mm ²	

B. Loads dan boundary conditions

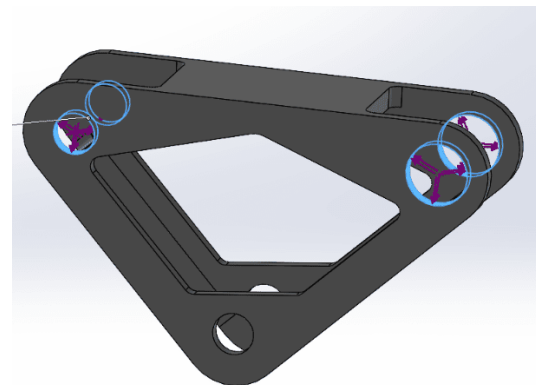
Pada simulasi elemen hingga adalah menetapkan kondisi pembebanan dan batas (*loads and boundary conditions*). Kondisi ini berperan penting dalam merepresentasikan lingkungan kerja aktual dari komponen *bell crank* selama kendaraan beroperasi. Dalam penelitian ini, pembebanan sebesar 10.000 N diterapkan pada *moving pivot* pada *bell crank* untuk menggambarkan kondisi ekstrem yang mungkin terjadi akibat gaya vertikal saat kendaraan melintasi medan tidak rata, pengereman mendadak, atau manuver agresif. Nilai beban tersebut diadaptasi dari penelitian sebelumnya sebagai representasi beban maksimum realistis.

Titik tumpu utama dari *bell crank* diberikan batasan gerak (*fixed support*) pada *fixed pivot*, sedangkan beban dikenakan pada *moving pivot* pada *bell crank* untuk menstimulasi gaya kerja dari sistem suspensi. Penetapan kondisi batas ini dirancang agar mampu mencerminkan respons

struktural komponen secara akurat selama simulasi. Adapun visualisasi dari penentuan *loads* dan *boundary conditions* terdapat pada Gambar (2-3).



Gambar 2. Pemberian *fixed support* pada *bell crank*



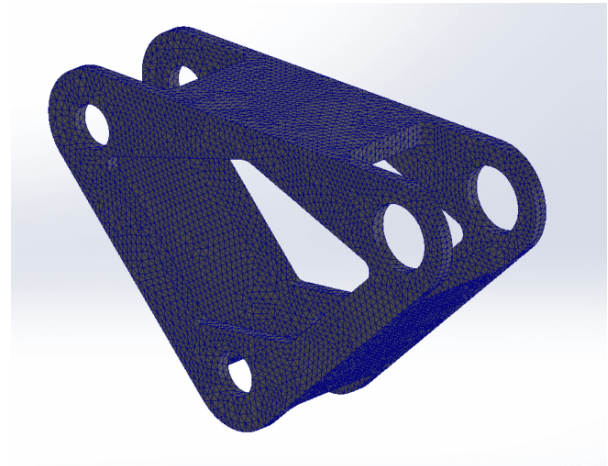
Gambar 3. Pemberian *force* pada *bell crank*

C. Meshing

Sebelum simulasi dilakukan adalah proses *meshing*, yaitu pembagian geometri model menjadi elemen-elemen kecil yang dapat dihitung secara numerik oleh perangkat lunak analisis. Kualitas dan kepadatan *mesh* sangat memengaruhi tingkat akurasi hasil simulasi, khususnya pada area dengan konsentrasi tegangan tinggi [12].

Dalam penelitian ini, proses *meshing* dilakukan dengan menggunakan *blended curvature*, yang sesuai untuk geometri kompleks seperti *bell crank*. Ukuran elemen ditentukan berdasarkan keseimbangan antara ketelitian hasil dan efisiensi komputasi, dengan prioritas pada area-area kritis seperti titik tumpu (*mounting*) dan titik penerapan beban. Dengan *meshing* yang tepat, distribusi tegangan dan deformasi dapat diperoleh secara lebih akurat pada proses analisis elemen hingga [13].

Adapun visualisasi dari proses *meshing* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Proses *meshing* pada *bell crank*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

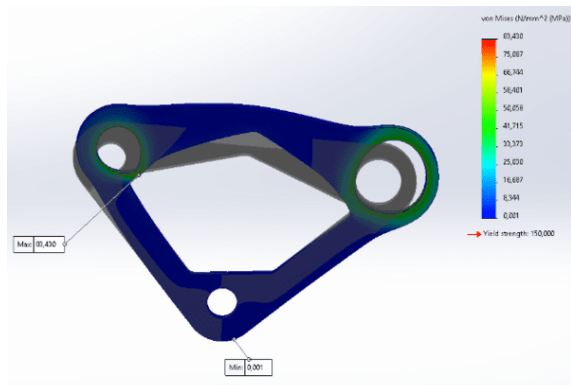
Hasil analisis statik komponen *bell crank* pada kendaraan listrik yang telah dilakukan dengan pendekatan metode elemen hingga (*finite element analysis*), Simulasi dilakukan terhadap tiga variasi material, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3, yang masing-masing memiliki karakteristik mekanik berbeda.

Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi *von mises stress*, deformasi total (*total displacement*), dan faktor keamanan (*safety factor*). Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan struktur dalam menahan beban statis sebesar 10.000 N yang diberikan pada *moving pivot*, dengan titik tumpu terletak pada bagian *fixed pivot*. Hasil dari setiap parameter kemudian dibandingkan guna mengetahui material yang paling efektif dari aspek kekuatan struktural, kekakuan, serta tingkat keamanan desain. Pembahasan disusun secara sistematis berdasarkan parameter yang dianalisis untuk masing-masing material, sehingga dapat memberikan pemahaman yang komprehensif terhadap kinerja struktural *bell crank* dalam kondisi pembebanan maksimum.

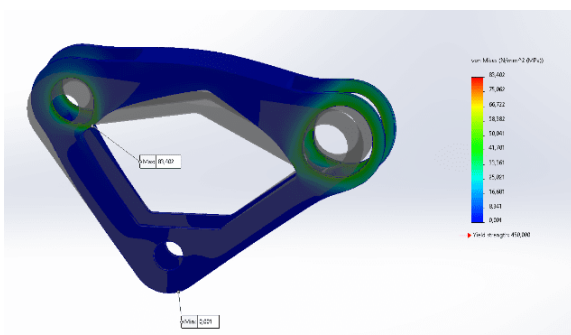
A. Von mises stress

Tegangan *von mises* digunakan untuk menilai apakah suatu material akan mengalami kegagalan plastis di bawah pembebanan [14]. Kriteria ini umum diterapkan pada material *ductile* karena

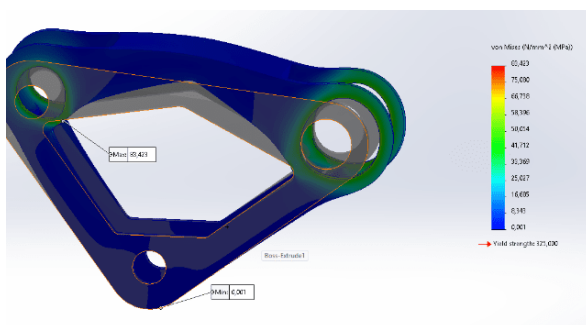
mempertimbangkan distribusi tegangan triaksial yang terjadi akibat beban kerja. Adapun gambar hasil simulasi *von mises stress* pada Gambar (5-7).



Gambar 5. Von mises stress dengan material Magnesium AZ91D



Gambar 6. Von mises stress dengan material Baja AISI 1045

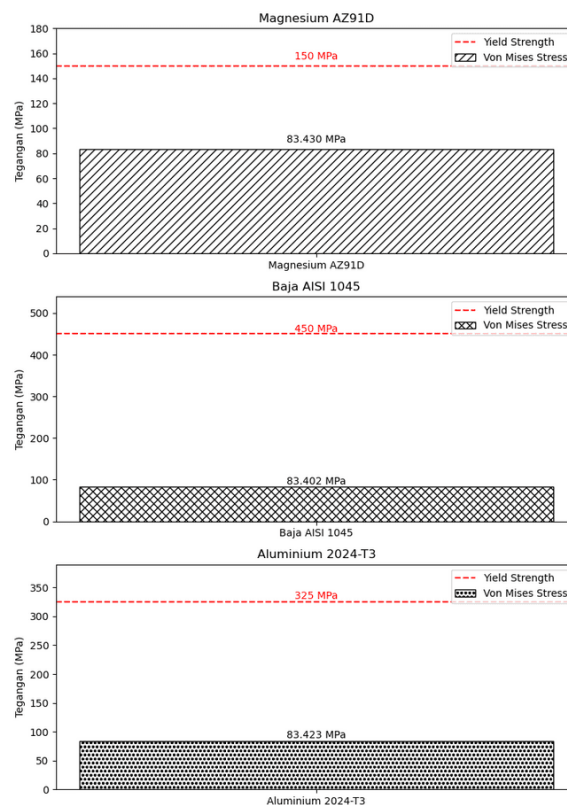


Gambar 7. Von mises stress material Aluminium 2024-T3

Tabel 4. Hasil simulasi maksimum *von mises stress* dari variasi material

Material	Yield Strenght (Mpa)	Maksimum von mises stress (Mpa)
Magnesium AZ91D	150 N/mm ² (MPa)	83,430
Baja AISI 1045	450 N/mm ² (Mpa)	83,402
Aluminium 2024-T3	325 N/mm ² (Mpa)	83,423

Perbandingan Tegangan Von Mises dan Yield Strength (MPa)



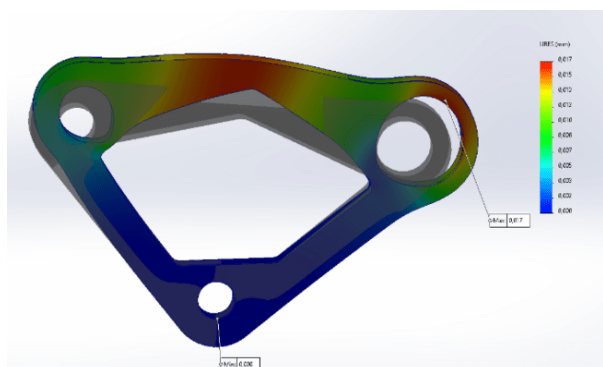
Grafik 1. Perbandingan nilai *von mises stress* terhadap variasi material

Grafik 1 perbandingan antara tegangan *von mises* maksimum hasil simulasi dengan tegangan luluh (*yield strength*) untuk masing-masing material yang digunakan, yaitu Magnesium AZ91D, Baja AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan *von mises* untuk ketiga material relatif serupa, berkisar antara 83,402 MPa hingga 83,430 MPa. Seluruh nilai tersebut berada jauh di bawah batas tegangan luluh masing-masing material, yang berarti tidak terjadi deformasi plastis pada kondisi pembebanan yang diberikan.

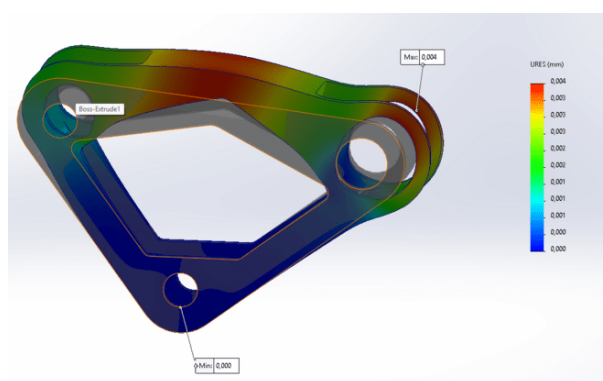
Di antara ketiga material, Baja AISI 1045 memiliki tegangan luluh tertinggi, sehingga selisih antara tegangan *von mises* dan tegangan luluhnya paling besar. Meskipun nilai *von mises*-nya hanya berbeda sangat tipis dibanding material lain, hal ini menunjukkan bahwa Baja AISI 1045 memiliki toleransi tertinggi terhadap kenaikan beban sebelum mencapai batas elastis material.

B. Displacement

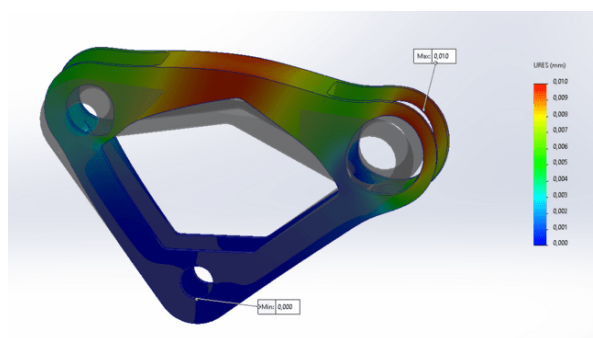
Displacement merupakan parameter penting dalam analisis statis untuk mengukur seberapa besar deformasi yang dialami komponen akibat pembebanan [15]. Nilai perpindahan yang berlebihan dapat mengindikasikan risiko kegagalan fungsi mekanis, terutama pada komponen yang harus mempertahankan posisi presisi seperti *bell crank* dalam sistem suspensi kendaraan listrik. Dalam penelitian ini, hasil perpindahan akan dibandingkan antar material Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3 untuk menilai kekakuan relatif dan kemampuan material menahan deformasi akibat gaya 10.000 N pada *moving pivot*. Adapun hasil simulasi dari *displacement* terdapat Gambar (8-10).



Gambar 8. *Displacement* dengan material Magnesium AZ91D



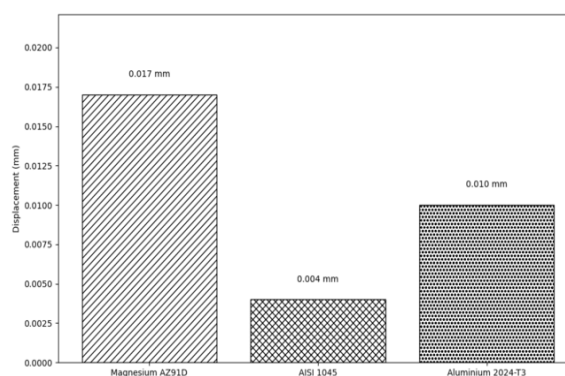
Gambar 9. *Displacement* dengan material Baja AISI 1045



Gambar 10. *Displacement* dengan material Aluminium 2024-T3

Tabel 5. Hasil maksimum *displacement* terhadap variasi material

Material	Maksimum Displacement (mm)
Magnesium AZ91D	0,017
Baja AISI 1045	0,004
Aluminium 2024-T3	0,010



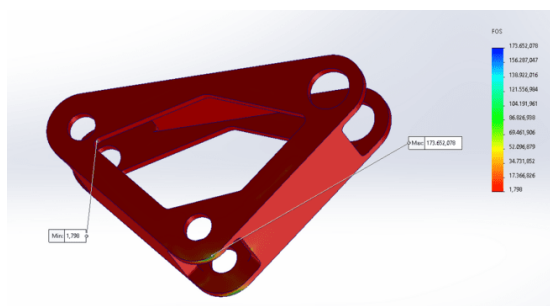
Grafik 2. Perbandingan *displacement* terhadap variasi material

Dilihat dari Grafik 2 perbandingan nilai maksimum displacement pada komponen bell crank untuk tiga jenis material, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa AISI 1045 memiliki displacement terkecil sebesar 0,004 mm, yang mencerminkan kekakuan material tertinggi. Sebaliknya, Magnesium AZ91D menunjukkan displacement terbesar sebesar 0,017 mm, mengindikasikan kekakuan yang lebih rendah terhadap pembebanan sebesar 10.000 N pada titik *moving pivot*. Perbandingan ini memperkuat bahwa AISI 1045 memiliki keunggulan dalam menahan deformasi struktural.

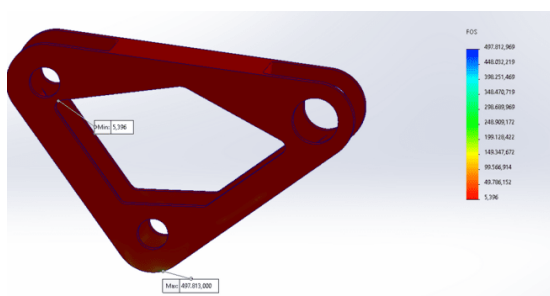
C. Safety factor

Safety factor atau faktor keamanan adalah ukuran kuantitatif yang menunjukkan seberapa besar margin keamanan suatu komponen terhadap kegagalan akibat pembebanan. Faktor ini diperoleh dengan membandingkan kekuatan material dengan tegangan kerja aktual, seperti tegangan *von mises* [16]. Faktor keamanan yang memadai sangat krusial untuk memastikan bahwa *bell crank* dapat bekerja secara andal dalam berbagai kondisi operasi mobil listrik.

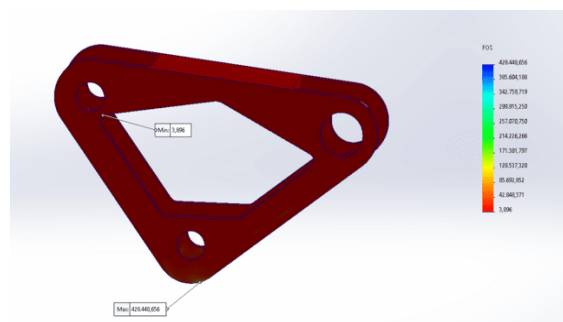
Penggunaan *safety factor* dalam analisis komponen *bell crank* pada mobil listrik bertujuan untuk mengetahui seberapa andal material yang digunakan dalam menghadapi gaya pembebanan sebesar 10.000 N yang diterapkan pada bagian *moving pivot*. Dengan mempertimbangkan tiga variasi material, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3, perhitungan *safety factor* memungkinkan penilaian terhadap margin keamanan dari masing-masing material. Semakin tinggi nilai *safety factor*, maka semakin besar cadangan kekuatan yang dimiliki material tersebut sebelum mencapai kondisi plastis atau gagal secara struktural. Oleh sebab itu, dipaparkan hasil simulasi pada Gambar (11-13).



Gambar 11. *Safety factor* dengan material Magnesium AZ91D



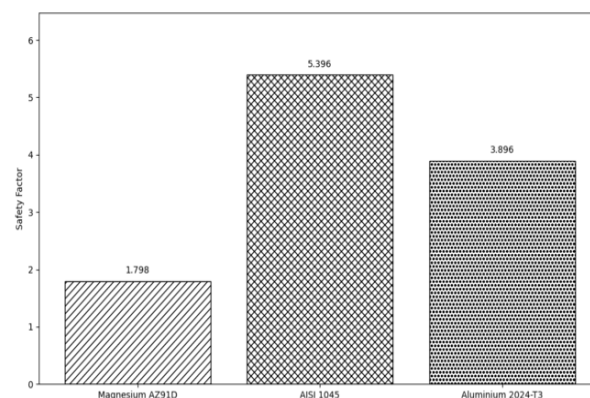
Gambar 12. *Safety factor* dengan material Baja AISI 1045



Gambar 13. *Safety factor* dengan material Aluminium 2024-T3

Tabel 6. Hasil simulasi *safety factor* terhadap variasi material

Material	Nilai <i>Safety Factor</i>
Magnesium AZ91D	1,798
Baja AISI 1045	5,396
Aluminium 2024-T3	3,896



Grafik 3. Perbandingan *safety factor* terhadap variasi material

Pada Grafik 3 perbandingan nilai *safety factor* pada komponen *bell crank* dengan tiga jenis material, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa material AISI 1045 memiliki *safety factor* tertinggi sebesar 5,396, menandakan tingkat keamanan yang paling tinggi terhadap beban kerja sebesar 10.000 N. Aluminium 2024-T3 memiliki *safety factor* sebesar 3,896, yang juga masih dalam kategori aman. Sementara itu, Magnesium AZ91D menunjukkan *safety factor* terendah yaitu sebesar 1,798, meskipun masih berada di atas batas minimum umum (1,0) [17], namun menunjukkan margin keamanan yang lebih

kecil dibanding dua material lainnya. Hasil ini mengindikasikan bahwa AISI 1045 merupakan material paling andal dari segi ketahanan terhadap kegagalan struktural.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah melakukan analisis statis terhadap komponen *bell crank* pada kendaraan listrik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) dengan variasi tiga jenis material, yaitu Magnesium AZ91D, AISI 1045, dan Aluminium 2024-T3. Simulasi dilakukan dengan pembebanan sebesar 10.000 N yang diterapkan pada titik *moving pivot* dan batasan *fixed geometry* pada titik *fixed pivot*. Didapatkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan, yaitu:

1. Tegangan *von mise* dari seluruh material menunjukkan nilai maksimum tegangan *von mises* yang serupa, yaitu sekitar 83 MPa, dan masih berada jauh di bawah nilai *yield strength* masing-masing material. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga material mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi plastis, dan berada dalam zona aman secara struktural.
2. *Displacement* dari material AISI 1045 menunjukkan nilai displacement terkecil sebesar 0,004 mm, diikuti oleh Aluminium 2024-T3 sebesar 0,010 mm, dan Magnesium AZ91D sebesar 0,017 mm. Nilai displacement ini merefleksikan kekakuan material, di mana AISI 1045 memiliki kekakuan tertinggi dan Magnesium AZ91D paling rendah dalam merespon pembebanan.
3. *Safety Factor* yaitu perhitungan faktor keamanan menunjukkan bahwa AISI 1045 memiliki nilai tertinggi sebesar 5,396, diikuti Aluminium 2024-T3 sebesar 3,896, dan Magnesium AZ91D sebesar 1,798. Meskipun seluruh material berada di atas ambang batas minimum yang direkomendasikan (umumnya 1,5), nilai *safety factor* AISI 1045 memberikan margin keamanan terbesar terhadap kemungkinan kegagalan struktural.

Berdasarkan ketiga parameter analisis tersebut, yaitu tegangan *von mises*, *displacement*, dan *safety factor*, material AISI 1045 dapat disimpulkan

sebagai pilihan yang paling optimal untuk digunakan sebagai material pada komponen *bell crank* kendaraan listrik. Material ini tidak hanya memenuhi kriteria kekuatan dan kekakuan struktural, tetapi juga memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dua material lainnya. Temuan ini dapat menjadi dasar dalam proses perancangan dan pemilihan material pada sistem suspensi kendaraan listrik yang menuntut keandalan dan efisiensi struktural.

Penelitian ini masih terbatas pada analisis statik dengan pendekatan simulasi elemen hingga. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan dilakukan analisis lanjutan yang mencakup kondisi dinamis atau pembebanan berulang agar hasil lebih representatif terhadap kondisi nyata. Validasi hasil simulasi dengan pengujian eksperimental juga penting dilakukan guna meningkatkan akurasi dan kredibilitas data. Selain itu, disarankan untuk mempertimbangkan penggunaan material alternatif seperti komposit atau paduan ringan lainnya, dengan memperhatikan efisiensi bobot melalui analisis *specific strength* yang merupakan rasio kekuatan terhadap massa jenis. Hal ini dapat membantu dalam merancang komponen yang ringan namun tetap memiliki ketahanan struktural yang memadai. Dengan penggunaan fitur optimasi desain pada perangkat lunak CAD/CAE juga dapat diterapkan untuk memperoleh bentuk geometri komponen yang lebih efisien. Dengan pengembangan tersebut, hasil penelitian di masa mendatang diharapkan dapat memberikan kontribusi yang lebih signifikan dalam perancangan komponen kendaraan listrik yang ringan, kuat, dan efisien.

REFERENSI

- [1] A. M. Sharma, S. Konwar Roy, A. R, and N. Das Thaikoothattil, "Structural analysis of bellcrank in a pullrod suspension system in an FSAE prototype," *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, vol. 23, no. 10, pp. 236–246, Oct. 2021, doi: 10.51201/JUSST/21/10743.
- [2] T. Shi, F. Zhao, H. Hao, and Z. Liu, "Costs, Benefits and Range: Application of Lightweight Technology in Electric Vehicles,"

- SAE INTERNATIONAL, Apr. 2019. doi: 10.4271/2019-01-0724.
- [3] S. Thillikkani and M. Nataraj, "Fatigue life prediction of heavy vehicle suspension system under varying load conditions," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 11, 2020, doi: 10.1177/1687814020968325.
- [4] K. Nopová *et al.*, "Processing of AZ91D Magnesium Alloy by Laser Powder Bed Fusion," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/app13031377.
- [5] R. Karimbaev, S. Choi, Y. S. Pyun, and A. Amanov, "Mechanical and tribological characteristics of clad AISI 1045 carbon steel," *Materials*, vol. 13, no. 4, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13040859.
- [6] H. I. Khalaf, R. Al-Sabur, A. Kubit, Ł. Świąch, K. Żaba, and V. Novák, "Experimental Investigation of Load-Bearing Capacity in EN AW-2024-T3 Aluminum Alloy Sheets Strengthened by SPIF-Fabricated Stiffening Rib," *Materials*, vol. 17, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.3390/ma17081730.
- [7] A. Halim, Ilmawan Suryapradana, Radear N.S., Gheitsa Z.S., and Akbar P., "Analisis Struktur Rangka Box Fermentasi Biji Kakao Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 20, no. 1, pp. 105–114, Apr. 2025, doi: 10.32497/jrm.v20i1.6092.
- [8] C. M. Enloe and H. Mohrbacher, "A Perspective on Materials Selection for Body Structure Lightweighting in Battery Electric Vehicles," SAE INTERNATIONAL, Mar. 2022. doi: 10.4271/2022-01-0233.
- [9] "Magnesium AZ91D-F, Cast Alloy Material Properties Datasheet," Sarmet Corp. Accessed: May 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.teko.it/uploads/manuali/materiali/AZ91D.pdf>
- [10] "AISI 1045 Medium Carbon Steel – Material Properties Datasheet," Gravity Cast Pvt. Ltd. Accessed: May 17, 2025. [Online]. Available: <https://gravitycastindia.com/images/resources/ferrouspdf/AISI%201045.pdf>
- [11] P. J. Blau *et al.*, *Metals Handbook Desk Edition*. ASM International, 1998.
- [12] L. Y. Yang, H. N. Hu, C. Y. Pang, H. Z. Xie, and G. D. Wang, "Effect of Mesh Density on the Estimation of Stress Intensity Factors Evaluated by Interaction Integral in the Experiment," *Exp Tech*, vol. 47, no. 5, pp. 959–971, Oct. 2023, doi: 10.1007/s40799-022-00606-0.
- [13] C. Pisarciuc, I. Dan, and R. Cioară, "The Influence of Mesh Density on the Results Obtained by Finite Element Analysis of Complex Bodies," *Materials*, vol. 16, no. 7, p. 2555, Mar. 2023, doi: 10.3390/ma16072555.
- [14] A. N. Eraslan, "Von Mises? yield criterion and nonlinearly hardening rotating shafts," *Acta Mech*, vol. 168, no. 3–4, pp. 129–144, Apr. 2004, doi: 10.1007/s00707-004-0088-z.
- [15] Z. Zhang, "Application of finite element analysis in structural analysis and computer simulation," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.2478/amns.2023.1.00273.
- [16] F. Arif Budiman, A. Septiyanto, A. Dwi Nur Indriawan Musyono, R. Setiadi Jurusan Teknik Mesin, F. Teknik, and U. Negeri Semarang Kampus Unnes Sekaran, "Analisis Tegangan von Mises dan Safety Factor pada Chassis Kendaraan Listrik Tipe In-Wheel," 2021. [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>
- [17] D. Bleiker, "Uncertainty Related to Factor of Safety." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/384191180>