

Analisis Optimasi Topologi Komponen *Bell Crank* Berbasis Material Aluminium 7075-T6 Menggunakan Metode Elemen Hingga

Mahathir Byantara¹, Deri Teguh Santoso^{2*}, Marno³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang

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

Received: 20/04/2026

Revised: 25/04/2026

Accepted: 25/04/2026

Abstract. The Bell crank component in an electric vehicle suspension system plays a vital role in precise force transmission, but its excessive mass can increase the unsprung mass and reduce the vehicle's overall energy efficiency. This study aims to optimize the design and reduce the weight of an Aluminium Alloy 7075-T6 Bell crank component through the Density-Based Topology optimization method using a Finite Element Analysis (FEA) approach. Static analysis of the initial design under extreme Loading conditions of $F_x=3000\text{ N}$ and $F_y=-2000\text{ N}$ revealed a maximum von Mises stress of 96.33 MPa, a deformation of 0.0305 mm, and a safety factor of 5.22, indicating an over designed structure with an initial mass of 62.12 grams. Topology optimization was executed using a minimize compliance objective function to maintain global stiffness across two mass retention response constraint scenarios: 75% and 60%. Computational simulation results demonstrated that the 60% mass retention scenario yielded the most optimal final design. This design successfully reduced the component's mass by 44.42% to 34.528 grams. Although the total deformation experienced a slight compensatory increase to 0.0820 mm, this value remained well below the safe functional deformation tolerance threshold (0.1 mm). In conclusion, the topology optimization method successfully improved the strength-to-weight ratio significantly without compromising structural integrity, resulting in a highly efficient design recommended for the mechanical development of electric vehicles.

Keywords: Bell crank, AL 7075-T6, Finite Element Analysis, Topology optimization, Electric vehicle

Abstrak. Komponen *Bell crank* pada sistem suspensi kendaraan listrik memiliki peran vital dalam mentransmisikan gaya secara presisi, namun massanya yang berlebih dapat menambah beban *unsprung mass* dan mengurangi efisiensi energi kendaraan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain dan mereduksi bobot komponen *Bell crank* bermaterial Aluminium 7075-T6 melalui metode *Density-Based Topology optimization* menggunakan pendekatan Analisis Elemen Hingga (FEA). Analisis statik pada desain awal dengan pembebanan ekstrem $F_x=3000\text{ N}$ dan $F_y=-2000\text{ N}$ menunjukkan tegangan von Mises maksimum sebesar 96,33 MPa, deformasi 0,0305 mm, dan *safety factor* 5,22, yang mengindikasikan bahwa struktur bersifat *over-designed* dengan massa 62,12 gram. optimasi topologi dieksekusi menggunakan fungsi objektif *minimize compliance* untuk mempertahankan kekakuan global melalui dua skenario batasan respons retensi massa: 75% dan 60%. Hasil simulasi komputasi membuktikan bahwa skenario retensi massa 60% memberikan desain final yang paling optimal. desain tersebut berhasil memangkas massa komponen sebesar 44,42% menjadi 34,528 gram. Meskipun deformasi total mengalami sedikit peningkatan kompensasi menjadi 0,0820 mm, nilai tersebut terbukti masih berada jauh di bawah ambang batas toleransi aman deformasi fungsional (0,1 mm). Kesimpulannya, metode optimasi topologi berhasil meningkatkan rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) secara signifikan tanpa mengorbankan integritas struktural, sehingga menghasilkan desain yang sangat efisien dan direkomendasikan untuk pengembangan sistem mekanikal kendaraan listrik.

Kata Kunci: Bell crank, AL 7075-T6, Metode elemen hingga, Optimasi topologi, Kendaraan listrik

I. PENDAHULUAN

Peningkatan efisiensi energi merupakan isu teknis sentral dalam evolusi pengembangan kendaraan listrik masa kini. Guna merealisasikan hal tersebut, pemangkas massa komponen *lightweighting* diakui sebagai pendekatan

mekanikal yang sangat esensial [1]. Penurunan bobot ini berdampak positif secara langsung terhadap perbandingan performa dengan massa total kendaraan, sekaligus memaksimalkan efisiensi penggunaan daya baterai. Di dalam kerangka dinamika mobil, peran *bell crank* dan lengan ayun

suspensi memiliki tingkat signifikansi yang tinggi [2]. Tugas utama elemen tersebut adalah menyalurkan beban kinetis dari interaksi ban dan permukaan jalan menuju sistem peredam kejut (*shock absorber*). Karena paparan gaya dinamis yang berulang dan berat, keandalan struktur komponen suspensi mutlak diuji untuk menghindari malfungsi mekanis. Hal tersebut didukung oleh temuan Aditama et al. (2025), yang menegaskan pentingnya evaluasi fungsional dan *Finite Element Analysis* (FEA) pada lengan suspensi depan mobil listrik demi memastikan *safety factor* yang memadai ketika bermanuver [3]-[4].

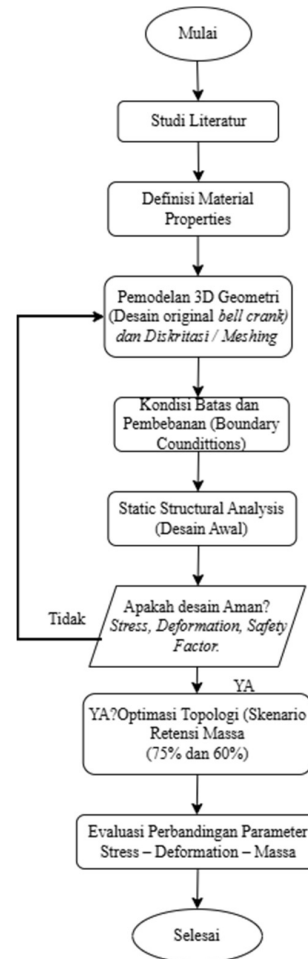
Pada umumnya, perancangan *bell crank* konvensional mengandalkan material baja padat guna memenuhi standar keamanan, namun pendekatan ini rentan menghasilkan komponen dengan bobot berlebih (*over-designed*) [5]. Berdasarkan kajian dari berbagai literatur terdahulu, *topology optimization* (optimasi topologi) muncul sebagai metode komputasional yang paling prospektif dalam merespons tantangan inefisiensi massa tersebut [6]. Secara matematis, teknik ini mengatur ulang penempatan material mengikuti lintasan pembebanan (*load paths*), dengan cara membuang material berlebih pada zona non-kritis dan menyisakan material hanya pada area yang menerima tegangan [7]. Bukti empiris dari aplikasi metode ini terlihat pada studi Prabowo et al. (2022) terhadap *front upright* mobil balap, yang berhasil memangkas massa sebesar 43% tanpa mengorbankan faktor keamanan operasional kendaraan [8].

Walaupun efektivitas optimasi topologi telah banyak divalidasi, masih dijumpai kekosongan literatur (*research gap*) terkait identifikasi parameter persentase reduksi massa yang paling ideal untuk komponen spesifik seperti *bell crank*. Kekosongan ini semakin nyata ketika material yang dikaji menggunakan spesifikasi paduan logam *aerospace* seperti Aluminium 7075-T6 [1],[5]. Nilai kebaruan (*novelty*) dari studi ini berada pada analisis perbandingan secara iteratif terhadap pembuangan massa yang ekstrem pada Aluminium 7075-T6, yang bertujuan untuk menemukan

ambang batas aman toleransi dalam kinematika suspensi.

Berpijak pada rasionalisasi tersebut, riset ini difokuskan untuk menilai kekuatan statis sekaligus menerapkan optimasi topologi pada desain *bell crank* melalui simulasi *Finite Element Analysis* (FEA). Kajian perbandingan akan dipusatkan pada dua skenario target retensi massa, yakni 60% dan 75%. Secara akademis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan desain (*design guidelines*) yang komprehensif bagi praktisi rekayasa mekanik. Pedoman tersebut nantinya dapat menjadi acuan teknis yang valid dalam mengeksekusi strategi perancangan ringan (*lightweighting*) yang aman pada sistem suspensi kendaraan listrik generasi mendatang [8].

II. METODOLOGI



Gambar 1. Diagram Penelitian Analisis

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan komputasi numerik secara sistematis menggunakan pendekatan metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Fase awal diinisiasi dengan studi literatur komprehensif guna membangun landasan teoretis terkait kinematika suspensi, material ringan, dan optimasi topologi. Selanjutnya, pemodelan geometri 3D komponen *bell crank* direalisasikan melalui perangkat analisis. Tahap pra-pemrosesan (*preprocessing*) dilanjutkan dengan pendefinisian parameter mekanik material secara spesifik, serta diskritisasi spasial geometri melalui proses *meshing* guna memecah domain model kontinu menjadi elemen-elemen diskrit yang dapat dihitung secara matematis [9].

A. Sifat mekanik material (*mechanical properties of materials*)

Penentuan spesifikasi bahan memegang peranan vital untuk memprediksi reaksi komponen saat menghadapi variasi beban pada sistem suspensi. Kajian ini berfokus pada penggunaan paduan Aluminium 7075-T6. Alasan utama pemilihan paduan ini adalah tingginya batas luluh (*yield strength*) yang sebanding dengan karakteristik baja struktural, namun dibarengi dengan bobot jenis yang jauh lebih ringan [1],[10]. Parameter mekanis tersebut bersumber dari pangkalan data material standar (seperti *MatWeb Material Property Data*), yang selanjutnya diintegrasikan ke dalam menu *Engineering Data* pada perangkat lunak ANSYS. Rincian sifat mekanis ini dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Mekanik Aluminium 7075-T6

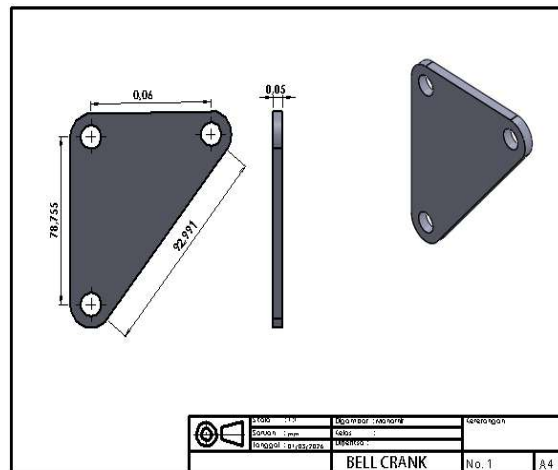
Parameter Mekanik	Nilai	Satuan
Massa Jenis (<i>Density</i>)	2804	kg/m ³
Modulus Elastisitas (<i>Young's Modulus</i>)	71.700	MPa
Poisson (<i>Poisson's Ratio</i>)	0,33	
Tegangan Luluh (<i>Tensile Yield Strength</i>)	503	MPa

B. Pemodelan geometri dan diskritisasi elemen

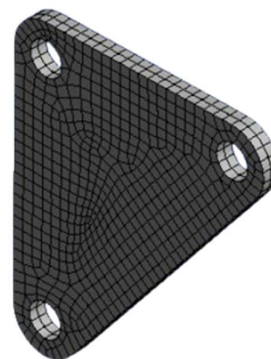
Pada tahap pemodelan Geometri *bell crank* di Representasi geometri 3D dimana desain dibuat dengan *software* CAD ini selanjutnya ditransfer ke *software* simulasi dengan memanfaatkan format

STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) guna mencegah distorsi atau hilangnya detail garis kontur geometri [5],[11]. Kondisi rancangan mula-mula memiliki volume 22.155 mm³ dengan berat total mencapai 62,12 gram.

Tahapan *meshing* dijalankan dengan memanfaatkan elemen *tetrahedral* yang diatur melalui mode adaptif (*automatic sizing*). Pembagian elemen (diskritisasi) ditetapkan menggunakan *element size* senilai [3 mm], sehingga terbentuk susunan [1156] elemen serta [6884] *nodes*. Pengaturan konfigurasi jaring semacam ini bertujuan untuk menjamin kehalusan transisi antar-elemen sekaligus meningkatkan keakuratan komputasi, terutama di sekitar area berlekuk (seperti lubang poros) yang sangat berisiko memicu pemusatan tegangan (*stress concentration*).



Gambar 2. Geometri 3D (Desain CAD Awal)

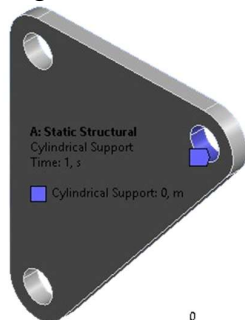


Gambar 3. Hasil *Meshing* pada Komponen *Bell Crank*

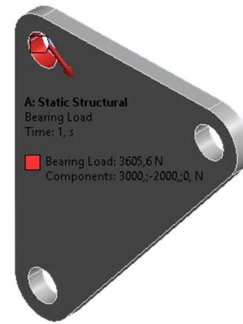
C. Kondisi batas dan pembebanan (*boundary conditions*)

Pemodelan kondisi batas (*boundary conditions*) beserta skema pembebanan merupakan tahapan krusial dalam simulasi elemen hingga untuk merepresentasikan perilaku mekanis komponen pada kondisi operasional aktual, dengan lingkungan fisik sistem suspensi diintegrasikan ke modul *Static Structural* guna mengevaluasi integritas struktural desain awal secara komprehensif. Tiga parameter utama *Fixed Support* pada lubang pivot utama untuk membatasi semua derajat kebebasan (translasi dan rotasi X, Y, Z) yang merepresentasikan hubungan kaku dengan sasis *Cylindrical Support* pada lubang koneksi sekunder dengan radial dan aksial *fixed* sementara tangensial *free* untuk mengakomodasi rotasi *bell crank* tanpa tegangan artifisial serta *Bearing Load* dengan gaya ($F_x=3000\text{ N}$, $F_y=-2000\text{ N}$) pada lubang ujung *pushrod* yang menghasilkan distribusi tekanan parabolik akurat dibanding *point Load* yang ditetapkan untuk mensimulasikan transmisi gaya dinamis dari roda ke peredam kejut secara presisi. Berikut Gambar 4 hingga 6 adalah kondisi batas dan pembebanan pada analisis *Static Structural*.

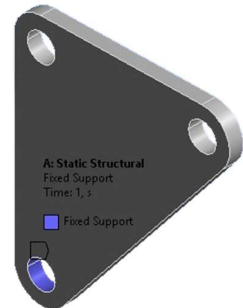
Beban bantalan (*Bearing Load*) diberikan pada lubang yang terkoneksi dengan *pushrod*. Penentuan gaya operasional ekstrem yang bernilai $F_x=3000\text{ N}$ dan $F_y=-2000\text{ N}$ didasarkan pada kalkulasi perpindahan beban dinamis (*dynamic Load transfer*) saat prototipe mobil listrik Anobrain bermanuver secara agresif.



Gambar 4. Batas dan Pembebanan (*Cylindrical Support*)



Gambar 5. Batas dan Pembebanan Load 3000N dan -2000N (*Bearing Load*)

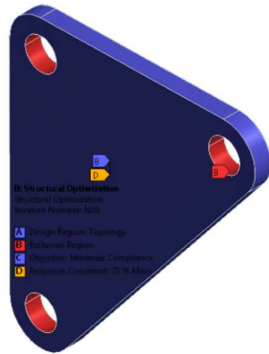


Gambar 6. Batas dan Pembebanan (*Fixed Support*)

D. Skenario optimasi topologi

Proses simulasi optimasi dijalankan pada modul *Structural Optimization* dengan mengadopsi algoritma *Density-Based Topology optimization* [6]-[7], Fungsi objektif (*objective function*) diatur untuk meminimalkan tingkat fleksibilitas (*minimize compliance*), yang bertujuan untuk mempertahankan sekaligus meningkatkan kekakuan struktural (*stiffness*) secara menyeluruh. Di sisi lain, batasan respons (*response constraint*) diarahkan secara eksklusif pada pemenuhan target reduksi massa (*mass retention*) [11]. Dalam konfigurasinya, fungsi objektif (*objective function*) disetel pada parameter *Minimize compliance* guna mempertahankan dan memaksimalkan kekakuan global struktur (*maximize stiffness*), sementara batasan respons (*response constraint*) difokuskan sepenuhnya pada target pemangkasan massa (*mass retention*) [12][13]. Siklus iterasi disimulasikan melalui dua variasi target komparasi yang ekstrem: menyisakan 75% massa (pengurangan 25%) dan mempertahankan 60% massa (pengurangan 40%) dari bobot acuan. Guna menjamin keabsahan perhitungan numerik, seluruh model komputasi

dibatasi hingga 500 iterasi maksimal, menggunakan faktor penalti kekakuan (*penalty factor*) bernilai 3, serta tingkat toleransi konvergensi sebesar 0,1% [7]. Bentuk topologi akhir dari tiap skenario selanjutnya diekspor menggunakan ambang batas retensi material (*retained threshold*) di level 0,5 untuk dianalisis lebih lanjut pada tahapan evaluasi kekuatan struktural.



Gambar 7. Optimization Region Topology

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil simulasi numerik dan analisis data komprehensif terkait proses optimasi topologi pada komponen *bell crank* menggunakan material Aluminium 7075-T6. Pemaparan dimulai dengan hasil analisis struktural statis terhadap desain awal (*original design*) guna menetapkan parameter rujukan dasar mengenai distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan di bawah beban operasional. Selanjutnya, efektivitas dari skenario optimasi topologi dengan dua variasi target retensi massa, yaitu 75% dan 60%, akan diuraikan secara mendalam. Seluruh data yang diperoleh dari Analisis kemudian dievaluasi secara komparatif untuk mengidentifikasi pengaruh pengurangan massa terhadap integritas struktural, sehingga dapat ditentukan desain yang paling optimal dalam mencapai efisiensi bobot tanpa mengabaikan aspek keamanan fungsional komponen.

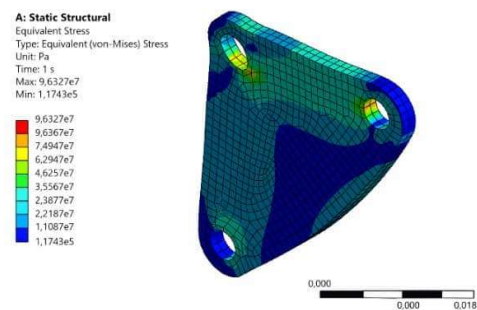
A. Analisis statik desain awal (*initial design*)

Evaluasi kekuatan struktur pada rancangan awal dikerjakan untuk menetapkan standar acuan (*baseline*) dalam memetakan persebaran tegangan maupun perubahan bentuk (deformasi) sebelum proses optimasi dijalankan. Menggunakan skenario

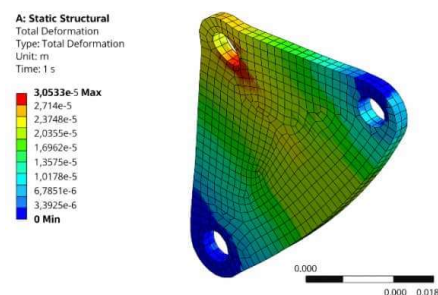
pembebanan ekstrem bernilai $F_x=3000$ N serta $F_y=-2000$ N, komputasi memperlihatkan tegangan von Mises puncak di angka 96,33 MPa. Dikarenakan Aluminium Alloy 7075-T6 mempunyai batas luluh (*yield strength*) pada level 503 MPa, beban operasional yang timbul rupanya baru menyentuh 19% dari total daya tahan material tersebut.

Ketangguhan struktur ini turut dibuktikan oleh sangat kecilnya angka deformasi total, yakni hanya 0,0305 mm, diiringi dengan perolehan *safety factor* (SF) di angka 5,22. Merujuk pada kriteria desain mekanikal, angka SF yang melampaui 5 mengindikasikan komponen tersebut memiliki spesifikasi yang terlampaui berlebih (*over-designed*). Kondisi ini memperlihatkan adanya penumpukan material yang tidak efisien pada zona dengan tegangan rendah, sehingga menjadi landasan rasional yang kuat untuk mengeksekusi pemangkasan bobot lewat optimasi topologi tanpa harus mengorbankan keandalan fungsionalnya.

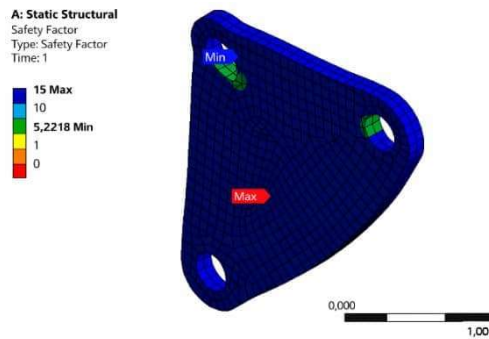
Konsentrasi tegangan hasil dari *static* ditunjukkan pada Gambar 8 sampai dengan Gambar 10.



Gambar 8. Kontur Distribusi Tegangan Von Mises pada Desain Awal *Bell crank*



Gambar 9. Kontur Deformasi Total (*Total Deformation*)



Gambar 10. Kontur Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Mengingat material Aluminium *Alloy* 7075-T6 memiliki tegangan luluh (*yield strength*) sebesar 503 MPa, tegangan operasional yang terjadi masih berada jauh di bawah batas elastis material. Integritas struktural ini dibuktikan dengan nilai deformasi total yang sangat minim, yaitu 0,0305 mm, serta nilai Faktor Keamanan (*Safety factor*) minimum sebesar 5,22. Angka SF sebesar 5,22 menunjukkan bahwa struktur komponen tergolong *over-designed*, sehingga reduksi bobot melalui optimasi topologi sangat aman untuk dilakukan.

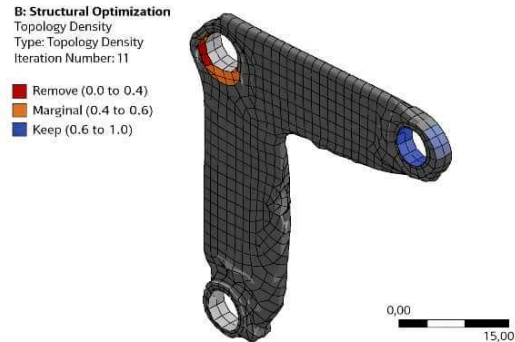
B. Hasil optimasi topologi

Proses optimasi topologi dilakukan secara iteratif untuk mengeliminasi elemen material pada area dengan densitas regangan rendah guna mencapai efisiensi massa yang maksimal. Algoritma optimasi mengevaluasi kontribusi setiap elemen terhadap kekakuan global struktur secara iteratif dan secara bertahap mengurangi densitas elemen yang tidak berada pada jalur beban utama (*load paths*) [14].

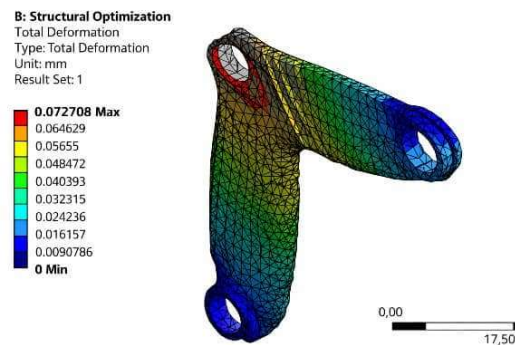
1. Variasi retensi massa 75%

Pada skenario retensi massa 75%, algoritma mencapai titik konvergensi pada iterasi ke-11. Massa komponen berhasil direduksi secara signifikan dari 62,12 gram menjadi 43,03 gram. Secara volumetrik, hasil optimasi ini menyisakan 69,25% dari volume desain asli. Pengurangan material pada area non-kritis menyebabkan kenaikan deformasi total maksimum menjadi 0,0727 mm. Meskipun mengalami peningkatan dibandingkan desain awal, nilai deformasi ini tetap

berada dalam batas toleransi kekakuan yang diizinkan, memastikan fungsionalitas komponen tetap terjaga



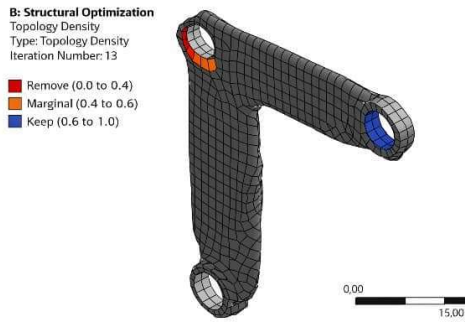
Gambar 11. *Topology Density Tracker* 75%



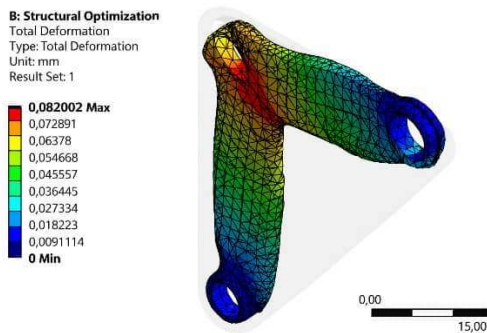
Gambar 12. Kontur Deformasi Total dari 75%

2. Variasi retensi massa 60%

Pada skenario retensi massa 60%, algoritma mencapai titik konvergensi pada iterasi ke-13. Massa komponen berhasil direduksi secara signifikan dari 62,12 gram menjadi 34,528 gram. Secara volumetrik, hasil optimasi ini menyisakan 55,58% dari volume desain asli, yang merepresentasikan efisiensi berat sebesar 44,42%. Pengurangan material yang lebih agresif pada area bodi menyebabkan kenaikan deformasi total maksimum menjadi 0,082 mm. Meskipun mengalami peningkatan dibandingkan variasi sebelumnya, nilai deformasi ini tetap berada dalam batas toleransi kekakuan yang diizinkan (di bawah 0,1 mm), sehingga memastikan fungsionalitas dan integritas komponen tetap terjaga dengan optimal.



Gambar 11. Topology Density Tracker 60%



Gambar 12. Kontur Deformasi Total dari 60%

C. Perbandingan dan evaluasi desain

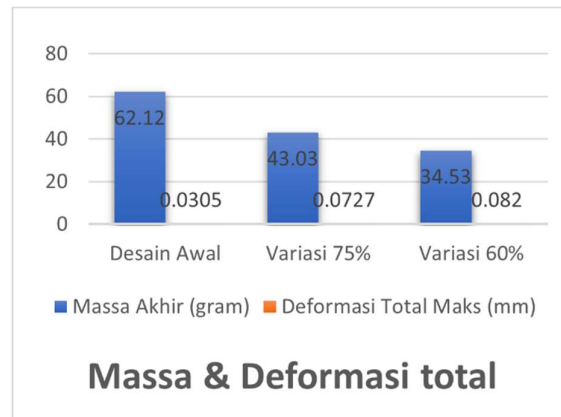
Evaluasi komprehensif dilakukan dengan membandingkan performa mekanis antara desain awal (original) dan dua variasi hasil optimasi topologi. Fokus utama evaluasi ini adalah pada efisiensi massa dan respon deformasi struktur akibat pembebanan ekstrem yang diberikan. Ringkasan data perbandingan parameter tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Parameter Mekanis Desain Awal dan Hasil Optimasi

Parameter Evaluasi	Desain Awal	Variasi 75%	Variasi 60%
Massa Akhir (gram)	62,12	43,03	34,528
Reduksi Massa Aktual (%)	0%	30,75%	44,42%
Deformasi Total (mm)	0,0305	0,0727	0,082

Berdasarkan data pada Tabel 2, terlihat adanya tren penurunan massa yang signifikan yang berbanding lurus dengan peningkatan nilai

deformasi. Variasi 60% memberikan hasil yang paling signifikan dari sisi efisiensi bobot dengan berhasil memangkas massa sebesar 44,42% atau setara dengan penghematan 27,59 gram dari desain aslinya. Pengurangan massa ini sangat krusial dalam perancangan kendaraan listrik kompetisi, di mana reduksi mass pada sistem suspensi secara teoritis akan meningkatkan respon kontrol dan efisiensi energi kendaraan secara keseluruhan.



Bagan 1. Grafik Perbandingan Massa vs Deformasi Total pada Setiap Variasi Desain

Dari kacamata saintifik, perolehan pemangkas bobot hingga 44,42% pada model akhir (60%) tergolong amat kompetitif serta berkesesuaian dengan tren literatur sebelumnya terkait *lightweighting* di ranah suspensi. Sebagai tolok ukur, riset Prabowo et al. (2022) yang berfokus pada bagian upright mobil balap menggunakan material Al 7075-T6 mencatatkan reduksi massa paling ideal di angka 43% [8]. Temuan tersebut memvalidasi bahwa interval penurunan berat di kisaran 40% hingga 45% adalah titik paling optimal (*sweet spot*) untuk mengeksplorasi performa paduan aluminium seri 7000 pada aplikasi otomotif, tanpa menimbulkan risiko kerusakan struktur [4].

Naiknya angka deformasi ke level 0,0820 mm pada wujud akhir merupakan konsekuensi fisik natural akibat menyusutnya luasan penampang silang (*cross-sectional area*) setelah elemen dikurangi. Kendati demikian, besaran tersebut masih masuk dalam kategori aman secara teknis. Berpijak pada parameter fungsionalitas suspensi

kendaraan listrik, perubahan wujud yang berada di bawah ambang 0,1 mm dinilai tidak akan membawa dampak buruk yang berarti pada akurasi kinematika roda (misalnya deviasi pada sudut *camber* maupun *caster*). Didukung oleh temuan Setyawan et al. (2022), sistem suspensi yang mengalami deformasi hingga 0,1116 mm pun masih diklaim laik operasi guna menjamin kestabilan kendali (*handling*) kendaraan. Kesimpulannya, model hasil optimasi 60% sangat direkomendasikan untuk dijadikan rancangan definitif karena menawarkan rasio perbandingan kekuatan dan bobot (*strength-to-weight ratio*) yang paling prima [4].

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi ini mengonfirmasi efektivitas penggunaan pendekatan *Density-Based Topology optimization* sebagai langkah strategis dalam meminimalisasi *unsprung mass* pada sistem suspensi mobil listrik. Hasil utama dari investigasi ini menyoroti bahwa pemakaian paduan Aluminium 7075-T6 untuk elemen *bell crank* memungkinkan terjadinya pemangkasan bobot yang drastis, dengan capaian efisiensi material menyentuh 44,42%. Walaupun proses eliminasi massa dilakukan secara masif sejalan dengan paradigma rancangan ringan (*lightweighting*) pada suspensi masa kini rancangan akhir terbukti sukses mempertahankan keandalan strukturnya. Fakta tersebut didukung oleh nilai kompensasi deformasi yang tertahan pada level 0,0820 mm; suatu angka yang secara keteknikan berada pada zona aman karena tidak melampaui limit toleransi penyimpangan kinematika suspensi (yakni $< 0,1$ mm).

Sumbangsih fundamental dari riset ini berupa penyusunan panduan teknis bagi perancangan suku cadang mekanikal pada kendaraan listrik berkinerja tinggi. Pada prinsipnya, kajian ini memberikan penegasan bahwa reduksi beban mati secara radikal dapat dieksekusi guna mendongkrak efisiensi konsumsi energi pada mobil listrik, tanpa memunculkan risiko yang mencederai kriteria keselamatan pengguna.

Guna pengembangan studi di masa mendatang, rancangan definitif dengan geometri rongga topologi yang kompleks ini sangat ideal untuk

diproduksi melalui teknik pencetakan logam tiga dimensi (*Additive Manufacturing*). Di samping itu, pelaksanaan uji dinamis lanjutan terutama evaluasi umur lelah (*fatigue analysis*) sangat dianjurkan untuk mengonfirmasi daya tahan komponen tersebut saat menerima siklus pembebanan yang terjadi secara kontinu selama beroperasi di lintasan.

REFERENSI

- [1] J. Hajnys and K. Kutiova, "TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE FORMULA STUDENT BELL CRANK," pp. 2964–2968, 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019.
- [2] T. Nandanwar, K. Waghela, E. Gupta, and T. Narendiranath Babu, "Topology optimization of the Bell crank & Brake Pedal," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 1123, no. 1, p. 012035, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1123/1/012035.
- [3] S. Divadkar and P. Dhatrak, "Topology optimization of a Bell crank Lever Based on Stiffness and Mass using Finite Element Analysis," vol. 266, pp. 1–11, 2023.
- [4] Candra Kusuma Aditama, Muhammad Yusri Ismail, and Ibnu Siswanto, "Testing of Design and Functionality of Front Suspension Arm in UNY Automotive Electric Vehicle for Individuals with Disabilities," J. Automot. Mech. Appl. Technol., vol. 2, no. 1, pp. 76–83, 2025, doi: 10.21831/jamat.v2i1.1276.
- [5] T. Y. Pang and M. Fard, "Reverse engineering and topology optimization for weight-reduction of a bell-crank," Appl. Sci., vol. 10, no. 23, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/app10238568.
- [6] R. N. Rao, "Topology optimization of the Bell crank Lever," pp. 220–225, 2023.
- [7] Tyflopoulos, "applied sciences A Comparative Study of the Application of Different Commercial Software for Topology Optimization," 2022.
- [8] R. H. A. Shiddieqy, "Optimisation Front upright Racing Car Using Finite Element Analysis," IPTEK J. Eng., vol. 8, no. 1, p. 14, 2022, doi: 10.12962/j23378557.v8i1.a10785.

- [9] S. S. Nahara, M. S. Rahman, and M. S. Karim, "Auto Mesh generation algorithm for the convex domain with the triangular elements," GANIT J. Bangladesh Math. Soc., vol. 43, no. 1, pp. 017–035, 2023, doi: 10.3329/ganit.v43i1.67856.
- [10] C. Llopis-albert, F. Rubio, and S. Zeng, "Advances in Engineering Software Multiobjective optimization framework for Designing a vehicle suspension system . A comparison of optimization algorithms," vol. 176, no. December 2022, 2023.
- [11] H. K. K. M, S. Akilan, J. R. K, and C. A. D. Cam, "Materials Today : Proceedings *Topology optimization* of engine mounting bracket," Mater. Today Proc., no. xxxx, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.215.
- [12] L. Nirmalkar, "Modelling And Analysis the Structures by Finite Element Methods," Int. J. Sci. Res. Eng. Manag., vol. 09, no. 04, pp. 1–9, 2025, doi: 10.55041/ijrsrem45365.
- [13] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, and S. Yuan, "A review of *topology optimization* for additive manufacturing : Status and challenges," Chinese J. Aeronaut., vol. 34, no. 1, pp. 91–110, 2021, doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020.
- [14] R. Suraj, K. Ram, R. L. West, and R. A. Canfield, "*Structural Optimization* of a Parametric *Bell crank* using Adaptive Response Surface Optimization *Structural Optimization* of a Parametric *Bell crank* using Adaptive Response Surface Optimization," 2024.