

Optimasi Desain dan Analisis Struktur *Bracket* Terintegrasi Menggunakan FEA dan Topology Optimization untuk Kendaraan Hemat Energi

Adrian Fasa Putra¹, Amrul Khasani², Didin Zakariya Lubis^{3*}

^{1,2,3} Prodi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang
Jl. Semarang No.5, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

*Corresponding author: didin.zakariya.ft@um.ac.id

Abstract

The increasing consumption of fossil fuels in the transportation sector has encouraged the development of energy-efficient vehicles through structural weight reduction. However, previous studies generally optimized axle brackets and brake caliper brackets separately while employing only a single optimization approach. This study proposes an integrated bracket combining both functions through the integration of Aluminum 6061 material selection, wall thickness adjustment, topology optimization, finite element analysis (FEA), and weighted scoring. Topology optimization was performed using a minimize mass objective with a 60% retained mass, producing four design alternatives evaluated based on mass, von Mises stress, deformation, and safety factor. The results indicate that Design 4 achieved the highest weighted scoring value of 0.995 and reduced bracket mass by 43.9% compared with the initial design while maintaining a maximum stress of 38.664 MPa, a maximum deformation of 0.0266 mm, and a safety factor of 2.229. The scientific contribution of this study lies in the development of an integrated bracket evaluated through multiple optimization strategies within a single design framework. Practically, the proposed design has the potential to reduce vehicle weight and support higher energy efficiency in Urban Concept Shell Eco-marathon vehicles.

Keywords: Energy-Efficient Vehicle, Finite element analysis, Topology Optimization, Static Stress, Bracket

Abstrak

Meningkatnya konsumsi bahan bakar fosil pada sektor transportasi mendorong pengembangan kendaraan hemat energi melalui pengurangan massa komponen struktural. Namun, penelitian terdahulu umumnya mengoptimalkan *bracket* poros dan *bracket kaliper* secara terpisah serta hanya menerapkan satu pendekatan optimasi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan desain *bracket* terintegrasi yang menggabungkan fungsi *bracket* poros dan *bracket kaliper* rem melalui kombinasi pemilihan material Aluminium 6061, penyesuaian ketebalan dinding, *topology optimization*, *finite element analysis* (FEA), dan *weighted scoring*. Proses *topology optimization* menggunakan objektif *minimize mass* dengan *retained mass* sebesar 60% untuk menghasilkan empat alternatif desain yang dievaluasi berdasarkan massa, *von Mises stress*, deformasi, dan *safety factor*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain 4 merupakan alternatif terbaik dengan skor *weighted scoring* sebesar 0,995 serta mampu menurunkan massa *bracket* sebesar 43,9% dibandingkan desain awal, dengan tegangan maksimum 38,664 MPa, deformasi maksimum 0,0266 mm, dan *safety factor* sebesar 2,229. Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan *bracket* terintegrasi yang dievaluasi melalui kombinasi beberapa metode optimasi dalam satu kerangka perancangan. Secara praktis, desain yang dihasilkan berpotensi mendukung pengurangan massa kendaraan dan peningkatan efisiensi energi pada kendaraan *Urban Concept Shell Eco-marathon*.

Kata kunci: Kendaraan Hemat Energi, Analisis Elemen Hingga, Optimasi Topologi, Static Stress, Bracket

1. Pendahuluan

Penggunaan bahan bakar fosil pada sektor transportasi masih menjadi masalah global, dengan konsumsi energi yang masih didominasi oleh bahan bakar fosil sebesar 83%, jauh lebih tinggi dibandingkan energi terbarukan sebesar 12,6% [1,2]. Kondisi tersebut mendorong pengembangan kendaraan dengan konsep efisiensi energi [3,4]. Salah satu upaya yang dapat

dilakukan dalam mendukung efisiensi energi adalah melalui kompetisi *Shell Eco-marathon*. Kompetisi ini menjadi wadah mahasiswa untuk merancang kendaraan dengan penggunaan bahan bakar *ultra* efisien. Perancangan desain yang ringan dan ketelitian dalam simulasi merupakan faktor penting dalam kompetisi [5,6,7]. Massa kendaraan merupakan faktor utama yang memengaruhi konsumsi bahan bakar, karena

DOI: <https://doi.org/10.24127/trb.v15i1.5126>

Received 16 April 2026; Received in revised form 2 July 2026; Accepted 25 January 2026

Available online 28 July 2026



peningkatan massa akan diikuti oleh kenaikan kebutuhan bahan bakar [8]. Salah satu komponen yang berkontribusi terhadap massa kendaraan adalah *bracket*. *Bracket* merupakan komponen struktural yang berfungsi sebagai penopang berbagai komponen kendaraan [9,10]. Fungsi *bracket* pada kendaraan kompetisi kelas *urban concept*, *bracket* poros menopang poros roda, sedangkan *bracket* kaliper menjadiudukan kaliper pengereman [11,7]. Kedua komponen tersebut harus memiliki kekuatan struktur yang memadai dengan massa serendah mungkin untuk menjamin performa dan keselamatan [12]. Oleh karena itu, *finite element analysis* (FEA) banyak digunakan sebagai metode evaluasi karena mampu memprediksi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi akibat pembebanan secara numerik [13,14].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa optimasi *bracket* kendaraan telah dilakukan melalui pendekatan yang berbeda untuk mencapai keseimbangan antara pengurangan massa dan kekuatan struktur. Penelitian yang dilakukan Nugraha et al [15] menunjukkan bahwa penerapan FEA mampu mengurangi massa *wheel bracket* kendaraan listrik FSAE hingga 50% dengan kondisi tegangan aman. Hasil ini sejalan dengan penelitian Sariski et al [6] yang menggunakan FEA, namun dengan tambahan metode *topology optimization* sehingga mampu mengurangi massa komponen 34,25% dengan tegangan maksimum 22,8 MPa. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa capaian optimasi dipengaruhi oleh metode yang diterapkan serta karakteristik komponen yang dianalisis. Penelitian lain dari Tyflopoulos et al [16] menunjukkan bahwa *topology optimization* mampu menurunkan massa *housing kaliper* rem sebesar 36,9% melalui optimasi distribusi material terhadap bentuk geometri, sedangkan penelitian Raffic et al [17] menunjukkan bahwa peningkatan performa *bracket* juga dapat dicapai melalui pemilihan material yang tepat berdasarkan parameter massa, *von Mises stress*, deformasi, dan

karakteristik getaran. Perbandingan kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengurangan massa *bracket* tidak hanya dapat dicapai melalui optimasi geometri, tetapi juga dipengaruhi oleh material yang digunakan untuk memberikan karakteristik performa yang berbeda.

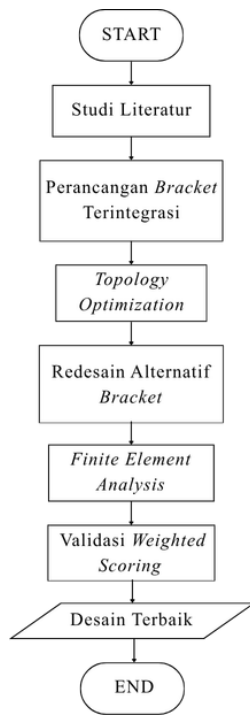
Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa optimasi *bracket* kendaraan melalui FEA, *topology optimization*, dan pemilihan material mampu menurunkan massa tanpa mengurangi kekuatan struktur. Namun, pendekatan tersebut masih diterapkan pada komponen yang berbeda-beda, seperti *wheel bracket*, *steering bracket*, *brake caliper*, maupun *engine bracket*, sehingga setiap penelitian hanya mengevaluasi satu fungsi komponen secara terpisah. Selain itu, penelitian yang mengombinasikan beberapa pendekatan optimasi dalam pengembangan *bracket* terintegrasi pada kendaraan hemat energi masih sangat terbatas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas integrasi beberapa metode optimasi terhadap desain *bracket* yang menggabungkan fungsi *bracket* poros dan *bracket* kaliper rem belum banyak dikaji.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan desain *bracket* terintegrasi yang menggabungkan fungsi *bracket* poros dan *bracket* kaliper rem ke dalam satu komponen. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang mengoptimalkan masing-masing *bracket* secara terpisah, pendekatan ini mengurangi jumlah komponen dan area sambungan sehingga menghasilkan struktur yang lebih ringkas serta mendukung pengurangan massa kendaraan. Selain itu, penelitian ini mengombinasikan pemilihan material, penyesuaian ketebalan dinding, pengurangan area struktur, dan *topology optimization* dalam satu proses pengembangan desain untuk menghasilkan empat alternatif konfigurasi *bracket*. Seluruh alternatif kemudian dievaluasi menggunakan FEA sehingga diperoleh desain yang memberikan keseimbangan terbaik antara pengurangan massa dan kekuatan struktur. Penelitian ini bertujuan

mengembangkan desain bracket terintegrasi pada kendaraan Urban Concept Shell Eco-marathon untuk memperoleh konfigurasi dengan massa minimum dan kekuatan struktur yang memadai melalui evaluasi menggunakan FEA.

2. Metode Penelitian

2.1 Alur Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

2.2 Pemilihan Material

Pemilihan material pada perancangan *bracket* kendaraan ramah lingkungan mempertimbangkan beberapa kriteria utama, seperti kekuatan, massa yang ringan, ketersediaan bahan, dan kemampuan material dalam proses manufaktur [18]. Aluminium 6061 dipilih untuk menggantikan material *bracket* sebelumnya yang menggunakan baja ST60. Pemilihan material ini berpotensi menurunkan massa yang signifikan pada *bracket* karena memiliki struktur yang lebih ringan [19]. Aluminium 6061 memiliki kekakuan dan keawetan yang tinggi karena sifatnya tahan terhadap korosi [20]. Kekakuan material Aluminium 6061 sudah dibuktikan dari beberapa penelitian dalam pembuatan

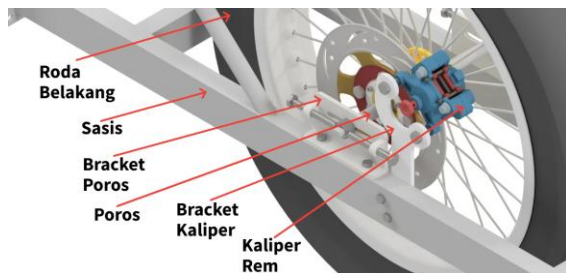
komponen kendaraan [21]. Perbandingan *mechanical properties* dari baja ST60 dan Aluminium 6061 ditunjukkan oleh Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Perbandingan *Mechanical Properties* Baja ST60 & Aluminium 6061 [22]

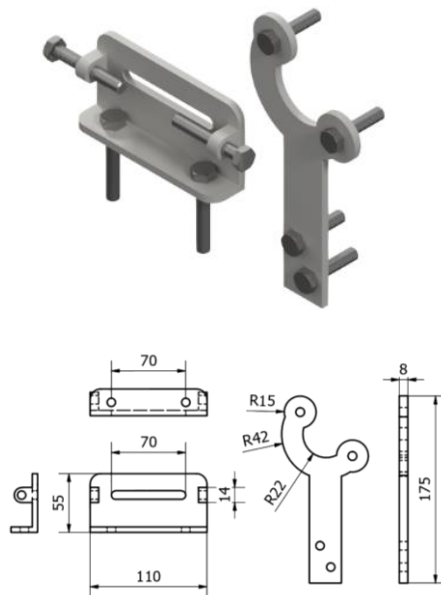
No.	Parameter	Baja ST60	Aluminium 6061
1	<i>Density</i> (Kg/m ³)	7850	2700
2	<i>Modulus of elasticity</i> (Gpa)	200	68.9
3	<i>Poisson's ratio</i>	0.30	0.33
4	<i>Yield strength</i> (MPa)	335	276
5	<i>Ultimate tensile strength</i> (MPa)	590	310

2.3 Model Fisik

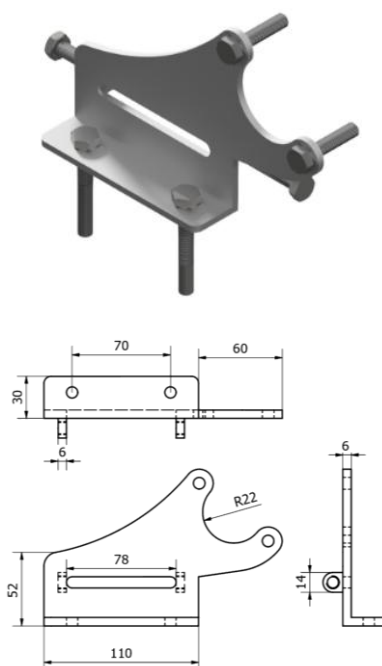
Bracket yang berfungsi sebagai penopang komponen utama harus memiliki kekuatan yang memadai serta mudah dalam proses *maintenance*. Penelitian ini melakukan redesain dengan menggabungkan *bracket* poros dan *bracket* kaliper rem menjadi satu untuk pengoptimalan massa dan mempermudah *maintenance*. Perubahan desain dilakukan pada ketebalan dinding *bracket* untuk mengoptimalkan massa [23]. Posisi baut tensioner *bracket* diubah ke bagian dalam agar tidak mengganggu pemasangan mur pada bagian luar poros. Pada tahap ini, massa *bracket* berhasil dikurangi sebesar 23,7%. Massa *bracket* turun dari 1,342 kg pada desain awal yang belum terintegrasi dan menggunakan material baja ST60 menjadi 1,024 kg setelah desain diintegrasikan serta material diganti menjadi Aluminium 6061. Proses redesain *bracket* dilakukan menggunakan *software Computer-Aided Design* (CAD). Model tiga dimensi dan gambar teknis dari hasil redesain disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Konfigurasi Bracket



Gambar 3. Desain Bracket Terpisah (mm)



Gambar 4. Desain Bracket Kombinasi (mm)

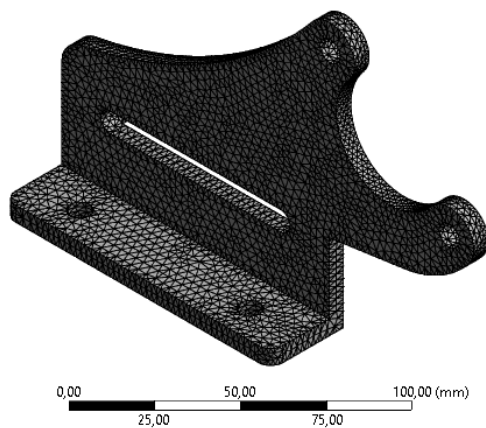
2.4 Finite Element Analysis

Penelitian ini menggunakan FEA sebagai tolak ukur evaluasi pada desain *bracket* dari sebelum dan sesudah *topology optimization*. Dalam memastikan keseragaman analisis, Simulasi dilakukan menggunakan analisis *static structural*. Material diasumsikan bersifat homogen, isotropik, dan elastis linier. Analisis dilakukan dengan asumsi *small deformation* sehingga, pengaruh deformasi terhadap perubahan geometri diabaikan [24]. Simulasi dilakukan menggunakan bantuan *software Computer Aided Engineering (CAE)*.

Tahapan dalam simulasi *static structural* meliputi, pemodelan 3d, pembuatan *meshing*, menentukan besar gaya, dan penetapan *boundary condition*. Pembuatan *meshing* berfungsi untuk membagi geometri model 3d menjadi sejumlah elemen berukuran kecil yang terhubung satu sama lain [25]. Besarnya elemen elemen yang tersusun berpengaruh besar terhadap keakuratan hasil simulasi [26,27]. Uji *mesh convergence* dilakukan pada desain bracket integrasi sebelum *topology* untuk menentukan besar *mesh*. Hasil uji *mesh convergence* dan visualisasi *mesh* pada model *bracket* disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 5 berikut.

Tabel 2. Mesh Convergence Result

Mesh Size (mm)	Equivalent von-mises Stress (Mpa)	change %	Status
0,2	43,241	-	-
0,4	42,124	2,58	Not Converged
0,8	32,871	21,97	Not Converged
1	30,534	7,11	Not Converged
1,4	30,413	0,40	Converged (<2%)
1,8	30,657	0,80	Converged (<2%)



Gambar 5. Pemodelan *Meshing* FEA

Hasil dari *mesh convergence* ukuran *mesh* yang diterapkan adalah sebesar 1,4 mm. Nilai tersebut dipilih karena presentase perbedaan *Equivalent von-misses Stress mesh* 1,4 mm tidak jauh berbeda dari nilai *mesh* 1,8 mm. Nilai tersebut digunakan pada seluruh model untuk menjaga keseragaman proses analisis. Pada gambar 5 pemodelan *meshing* FEA menunjukkan *mesh* menunjukkan dominasi elemen *tetrahedral 10-node*. Variasi nilai pembebanan merupakan parameter penting yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap gaya yang bekerja. Pengujian ini menerapkan beban yang sama pada seluruh model agar perbandingan antar desain dapat dilakukan secara objektif. Beban yang diterapkan pada *bracket* dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Beban *Bracket* Analisis FEA

No.	Parameter	Nilai
1	Massa total kendaraan & <i>driver</i> (kg)	170
2	Distribusi beban 1 roda (kg)	42,5
3	Beban kendaraan Bagian Belakang (N)	444,977
4	Sudut kemiringan jalan pada regulasi kompetisi	11,3°
5	<i>Preload</i> baut tensioner (N)	50

Total massa kendaraan dan pengemudi diasumsikan terdistribusi merata pada empat roda penumpu, Maka beban yang bekerja pada lubang poros sebesar $170 \text{ kg} \div 4 = 42,5 \text{ kg}$. Kemudian berat 42,5 kg dikalikan dengan percepatan gravitasi

sebesar $9,8 \text{ m/s}^2$ sebelum masuk simulasi. Sehingga $42,5 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 416,5 \text{ N}$. Hasil perhitungan gaya pengereman diperoleh dengan Persamaan 1 Berikut.

$$W_R = W_r \times \cos \theta \quad (1)$$

Keterangan:

W_R : Gaya pengereman roda belakang

W_r : Beban bagian belakang kendaraan

$\cos \theta$: Sudut kemiringan jalan

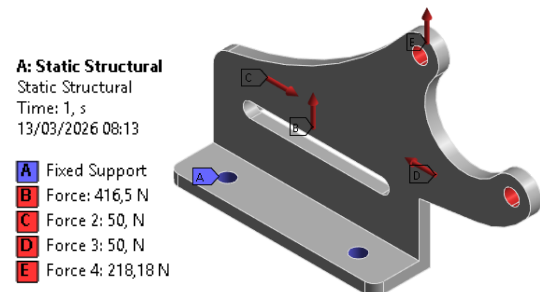
Sehingga:

$$W_R = W_r \times \cos \theta$$

$$W_R = 444,977 \text{ N} \times 11,3^\circ$$

$$W_R = 436,35 \text{ N}$$

Hasil persamaan dibagi menjadi 2 karena kendaraan memakai 2 kaliper rem pada kedua roda belakang. Sehingga gaya pengereman pada 1 *bracket* $436,35 \div 2 = 218,18 \text{ N}$ Kekencangan baut tensioner juga dijadikan sebagai parameter pembebanan nilai yang mengacu pada standar torsi *maintenance* baut. Visualisasi arah beban terhadap *bracket* ditunjukkan oleh Gambar 6 berikut.



Gambar 6. *Boundary Condition Bracket*

2.5 Topology Optimization

Metode *topology optimization* digunakan untuk mengurangi massa *bracket* setelah proses penggabungan *bracket* poros dan *bracket* kaliper rem. Metode ini merupakan teknik optimasi struktural yang menghilangkan material pada area dengan kontribusi kecil terhadap pembebanan sehingga diperoleh struktur yang lebih efisien [28]. Hasil penggabungan *bracket* masih menyisakan beberapa area yang dapat direduksi berdasarkan hasil simulasi *static structural*. Parameter *topology optimization* yang digunakan meliputi *objective minimize*

mass dan *retained mass* sebesar 60%. *Objektif minimize mass* dipilih karena penelitian ini berfokus pada pengembangan *bracket* dengan massa serendah mungkin untuk mendukung efisiensi kendaraan. Sementara itu, nilai *retained mass* sebesar 60% dipilih karena pengurangan massa yang lebih besar menghasilkan geometri yang sulit diproduksi, sedangkan nilai tersebut masih mampu mempertahankan jalur distribusi beban utama pada struktur *bracket*. Hasil *topology optimization* selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam pengembangan empat alternatif desain *bracket* dengan variasi geometri lubang.

2.6 Validasi Hasil Simulasi

Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan kecenderungan distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan yang diperoleh melalui simulasi FEA terhadap hasil penelitian terdahulu yang menggunakan metode dan kondisi pembebanan serupa. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada tahap pengembangan desain. Hasil simulasi dinyatakan valid apabila pola distribusi tegangan, lokasi konsentrasi tegangan, dan kecenderungan perubahan deformasi memiliki kesesuaian dengan penelitian pembandingan.

2.7 Metode Evaluasi Desain

Setelah seluruh alternatif desain dianalisis menggunakan metode FEA, dilakukan evaluasi untuk menentukan desain terbaik menggunakan metode *Weighted Scoring* [29]. Metode ini dipilih karena mampu mengintegrasikan beberapa parameter evaluasi ke dalam satu nilai akhir sehingga proses pemilihan desain dilakukan secara objektif berdasarkan seluruh aspek kinerja.

Parameter dalam pendekatan ini meliputi massa, tegangan maksimum, *maximum deformation*, dan *safety factor*. Penentuan bobot setiap parameter didasarkan pada tujuan penelitian, yaitu memperoleh *bracket* dengan massa serendah mungkin tanpa mengurangi

kekuatan struktur [30]. Oleh karena itu, massa dan tegangan maksimum diberikan bobot terbesar karena secara langsung memengaruhi efisiensi kendaraan dan keamanan struktur. *Safety factor* digunakan sebagai indikator tambahan untuk memastikan struktur masih berada pada kondisi aman, sedangkan *deformation* diberikan bobot lebih rendah karena seluruh alternatif desain masih menunjukkan deformasi yang relatif kecil. Tabel 4 menunjukkan bobot yang digunakan pada metode *weighted scoring*.

Tabel 4. Bobot Parameter Evaluasi Desain

Parameter	Kriteria	Bobot (%)
Massa	Semakin kecil semakin baik	35
Tegangan maksimum	Semakin kecil semakin baik	35
Safety factor	Semakin besar semakin baik	20
Deformasi maksimum	Semakin kecil semakin baik	10

Sebelum dilakukan perhitungan skor akhir, seluruh parameter dinormalisasi agar memiliki skala yang sama. Untuk parameter bertipe *cost* (massa, tegangan maksimum, dan deformasi maksimum), normalisasi dihitung menggunakan Persamaan 2 berikut.

$$R_i = \frac{x_{\min}}{x_i} \quad (2)$$

Sedangkan parameter bertipe *benefit* (*safety factor*) dihitung menggunakan Persamaan 3 berikut.

$$R_i = \frac{x_i}{x_{\min}} \quad (3)$$

Nilai akhir setiap alternatif desain dihitung menggunakan metode *weighted scoring* sesuai Persamaan 4 berikut.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i R_i \quad (4)$$

Keterangan :

S : skor akhir desain,

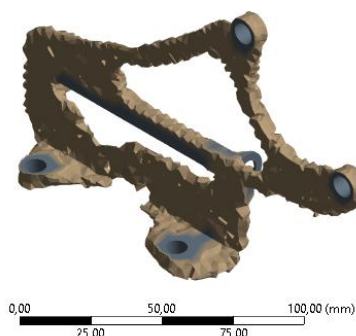
w_i : bobot parameter,
 R_i : nilai hasil normalisasi,
 n : jumlah parameter evaluasi.

Alternatif desain dengan nilai *weighted scoring* tertinggi dipilih sebagai desain terbaik karena menunjukkan keseimbangan paling baik antara pengurangan massa, kekuatan struktur, kekakuan, dan tingkat keamanan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil *Topology Optimization*

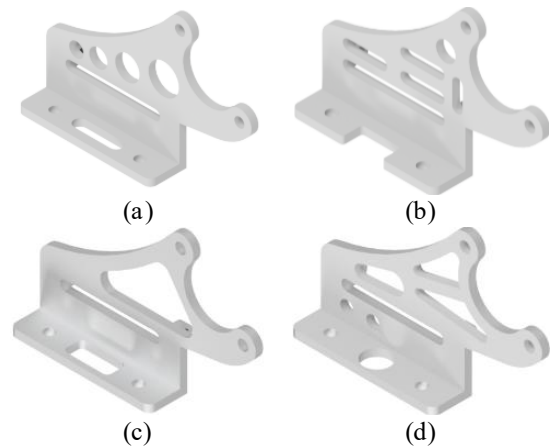
Hasil *topology optimization* mengidentifikasi beberapa area non-kritis yang berpotensi untuk dioptimalkan. Area tersebut meliputi bagian di antara lubang baut penumpu pada bagian bawah, bagian bawah penopang poros, serta bagian tengah penopang baut kaliper. besarnya reduksi menunjukkan *bracket* masih signifikan untuk di desain ulang dengan area struktur yang lebih kecil. Visualisasi hasil *topology optimization* ditunjukkan pada gambar 7 berikut.



Gambar 7. Hasil Topology Optimization

3.2 Redesain Alternatif *Bracket*

Redesain alternatif *bracket* variasi bentuk dilakukan untuk memaksimalkan *retained mass* dengan mengacu pada *topology optimization* [31]. Bagian area fungsional seperti lubang dudukan poros, lubang baut kaliper rem, dan lubang baut *bracket* masih dipertahankan. Visualisasi dari 4 hasil redesain dapat dilihat pada Gambar 8 berikut.



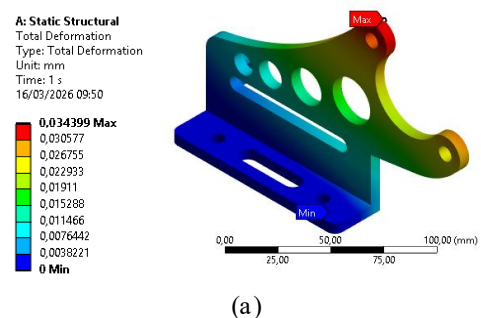
Gambar 8. (a) Desain 1 (b) Desain 2 (c) Desain 3 (d) Desain 4

desain 1 geometri yang diterapkan berupa lubang bentuk lingkaran dengan diameter kecil hingga besar. Pada desain 2 digunakan empat lubang geometri dengan bentuk lonjong. Desain 1 dan 2 bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh bentuk dan jumlah geometri terhadap hasil simulasi [32]. Sedangkan pada desain 3 geometri disesuaikan sama persis dengan bentuk geometri hasil topologi. Pada desain 4 juga menerapkan bentuk yang sama persis dengan hasil bentuk topologi namun diberi beberapa elemen penguat pada beberapa bagian struktur.

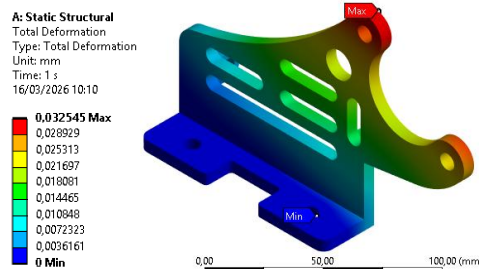
3.3 Hasil Simulasi Struktur Alternatif Desain

Hasil simulasi menggunakan metode FEA menunjukkan perbedaan kinerja pada setiap alternatif desain *bracket*. Hasil yang didapat dari simulasi adalah total deformasi, tegangan maksimum, dan *safety factor*. Visualisasi semua hasil simulasi desain dapat dilihat pada gambar berikut ini.

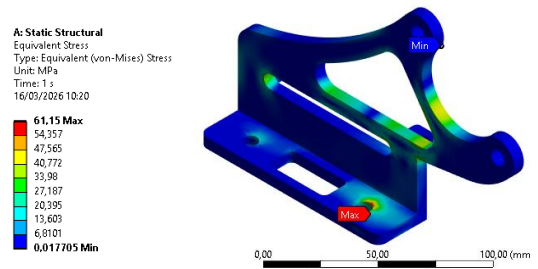
a) *Total Deformation*



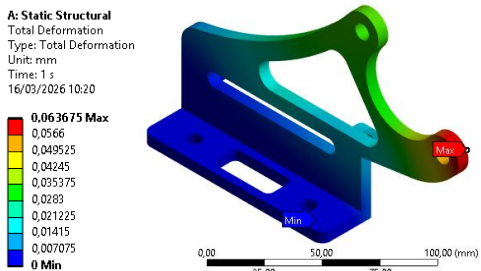
(a)



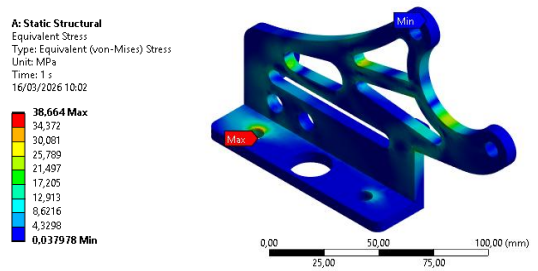
(b)



(c)

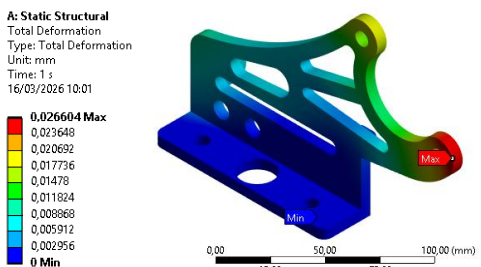


(c)



(d)

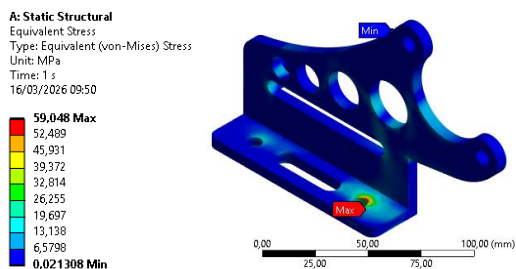
Gambar 10. *Equivalent Stress* (a) Desain 1 (b) Desain 2 (c) Desain 3 (d) Desain 4



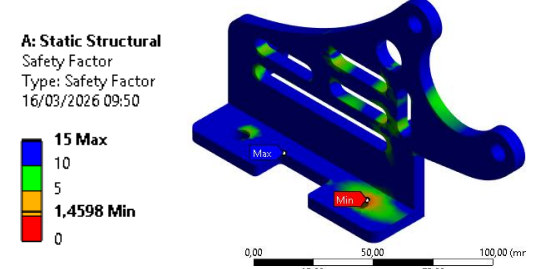
(d)

Gambar 9. *Total Deformation* (a) Desain 1 (b) Desain 2 (c) Desain 3 (d) Desain 4

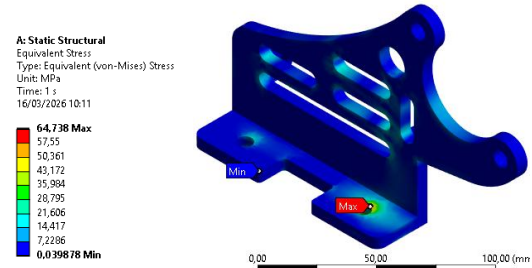
b) *Equivalent Stress*



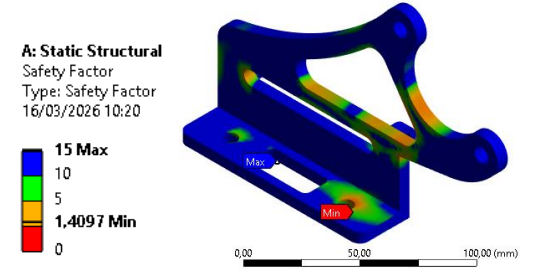
(a)



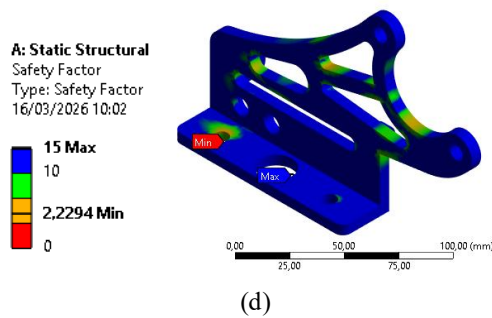
(b)



(b)



(c)



Gambar 11. *Safety Factor* (a) Desain 1 (b) Desain 2 (c) Desain 3 (d) Desain 4

Berdasarkan visualisasi hasil simulasi, Deformasi desain 3 meningkat karena bentuk geometri mengikuti hasil *topology optimization* secara langsung sehingga beberapa bagian struktur kehilangan kekakuan akibat berkurangnya area penampang. Sementara itu, Tegangan maksimum pada desain 2 lebih tinggi dibandingkan desain lainnya karena penggunaan empat lubang berbentuk lonjong mengurangi luas penampang efektif di sekitar area sambungan ke sasis sehingga terjadi konsentrasi tegangan yang lebih besar. Desain 4 Penambahan elemen penguat pada desain 4 meningkatkan momen inersia lokal sehingga distribusi beban menjadi lebih merata dan konsentrasi tegangan berkurang. Semua spesifikasi alternatif desain ditunjukkan oleh Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Spesifikasi Desain Alternatif *Bracket*

Desain	Massa (Kg)	Total Deformasi (mm)	Von Mises Stress (MPa)	Safety Factor (ul)
1	0,860	0,0343	59,049	1,459
2	0,812	0,0325	64,738	1,331
3	0,741	0,0636	61,15	1,409
4	0,752	0,0266	38,664	2,229

Berbeda dengan penelitian Sariski et al. [6] dan Tyflopoulos et al. [16] yang memanfaatkan hasil *topology optimization* untuk menghasilkan satu konfigurasi desain, penelitian ini mengembangkan empat alternatif geometri berdasarkan hasil optimasi kemudian mengevaluasi masing-masing menggunakan analisis FEA. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa

perubahan geometri memberikan pengaruh yang berbeda terhadap deformasi, tegangan, dan *safety factor*, sehingga pemilihan desain terbaik tidak hanya ditentukan oleh massa terendah, tetapi juga oleh keseimbangan antara kekuatan struktur dan kekakuan.

3.4 Kinerja Perbandingan Desain

Untuk menentukan alternatif desain terbaik, seluruh hasil simulasi dievaluasi menggunakan metode *weighted scoring* berdasarkan empat parameter, yaitu massa, tegangan maksimum (*von Mises stress*), deformasi maksimum, dan *safety factor*. Setiap parameter dinormalisasi sesuai jenis kriterianya (*cost* dan *benefit*) kemudian dikalikan dengan bobot yang telah ditentukan pada Bab 2.6. Hasil normalisasi ditunjukkan pada Tabel 6, sedangkan hasil perhitungan *Weighted Scoring* disajikan pada Tabel 7.

Tabel 6. Hasil Normalisasi Parameter Evaluasi

Desain	1	2	3	4
Massa	0,862	0,913	1,000	0,985
Tegangan	0,652	0,597	0,632	0,985
Deformasi	0,775	0,818	0,418	0,985
Safety Factor	0,654	0,597	0,632	0,985

Tabel 7. Hasil perhitungan *Weighted Scoring*

Desain	Skor	Ranking
1	0,735	3
2	0,715	4
3	0,735	2
4	0,995	1

Berdasarkan hasil perhitungan *weighted scoring*, desain 4 memperoleh skor tertinggi sebesar 0,995 sehingga dipilih sebagai alternatif desain terbaik. Meskipun massa desain 4 bukan yang paling rendah, desain ini menghasilkan tegangan maksimum paling kecil sebesar 38,664 MPa, deformasi terkecil sebesar 0,0266 mm, serta safety factor tertinggi sebesar 2,229. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan desain terbaik harus mempertimbangkan keseimbangan antara pengurangan massa, kekuatan struktur, kekakuan, dan keamanan. Dengan karakteristik tersebut, desain 4 berpotensi meningkatkan keandalan sistem

penopang poros dan kaliper rem sekaligus mendukung capaian bahan bakar kendaraan *Urban Concept Shell Eco-marathon*.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan desain *bracket* terintegrasi yang menggabungkan fungsi *bracket* poros dan *bracket* kaliper rem melalui kombinasi pemilihan material Aluminium 6061, penyesuaian ketebalan, *topology optimization*, FEA, serta evaluasi menggunakan metode *weighted scoring*. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada pengembangan satu komponen terintegrasi yang dievaluasi melalui empat alternatif desain sehingga memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan optimasi *bracket* yang umumnya dilakukan secara terpisah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain 4 merupakan alternatif terbaik dengan skor *weighted scoring* sebesar 0,995, karena memberikan keseimbangan paling baik antara massa, tegangan, deformasi, dan *safety factor*. Desain tersebut mampu menurunkan massa *bracket* sebesar 43,9% dibandingkan desain awal, dengan tegangan maksimum 38,664 MPa, deformasi maksimum 0,0266 mm, dan *safety factor* sebesar 2,229. Secara praktis, desain *bracket* terintegrasi yang lebih ringan dan ringkas berpotensi mengurangi massa kendaraan serta mendukung peningkatan efisiensi energi pada kendaraan *Urban Concept Shell Eco-marathon*.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena evaluasi dilakukan berdasarkan simulasi FEA dengan pembebanan statis sehingga belum mempertimbangkan pengaruh pembebanan dinamis, getaran, maupun fatigue. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi eksperimental pada prototipe *bracket* serta mengembangkan analisis pembebanan dinamis dan fatigue

untuk mengevaluasi keandalan struktur pada kondisi operasi yang lebih mendekati kondisi aktual kendaraan.

Referensi

- [1] Holechek, J. L. et al., 2022. A Global Assessment : Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050. MDPI. 1–22.
<https://doi.org/10.3390/su14084792>
- [2] Permatasari, F. D. et al., 2021. Emisi CO2 Kendaraan Bermotor Periode Kebijakan Pembatasan Sosial Berskala Besar (Studi Kasus: Ruas Jalan di Jakarta Pusat). RISTEKDIKTI. 31–44.
<https://doi.org/10.20886/jklh.2021.15.1.31-44>
- [3] Mađziel, M., 2023. Vehicle Emission Models and Traffic Simulators. MDPI.
<https://doi.org/10.3390/en16093941>
- [4] Lelieveld, J. et al., 2023. Air Pollution Deaths Attributable to Fossil Fuels: Observational and Modelling Study. NLOM. 1–10.
<https://doi.org/10.1136/bmj-2023-077784>
- [5] Adji, E. et al., 2024. Perancangan Desain dan Analisa Chassis Mobil Hemat Energi Tipe Prototype dengan Material Aluminium 6061. Jurnal Rekayasa Energi Manufaktur.
<http://doi.org/10.21070/rem.v9i2.1706>
- [6] Sariski, M. et al., 2020. Rancang Bangun dan Simulasi Pembebanan Statik pada Sasis Mobil Hemat Energi Kategori Prototype. Jurnal ENGINE. 53–58.
<https://doi.org/10.30588/jeemm.v4i2.753>
- [7] Wilujeng, A. D. et al., 2025. Optimization of Caliper Bracket Design as an Effort to Improve Fuel Efficiency. Jurnal Rekayasa Mesin UB. 469–476.

- <https://doi.org/10.21776/jrm.v16i1.1911>
- [8] Weiss, M. et al., 2020. Energy Efficiency Trade-Offs in Small to Large Electric Vehicles. ESEU. 1-17. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>
- [9] Saurabh, S. et al., 2023. Topology Optimization of Engine Bracket Arm Using BESO. IJSMDO. 1-10. <https://doi.org/10.1051/smdo/2023003>
- [10] Tristanto, D. A. et al., 2023. Analisis Optimasi Topologi Desain Support Bracket pada Steering Main Shaft Mobil TITEN EV-2. Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro. 63–69. <https://doi.org/10.24127/trb.v12i1.2388>
- [11] Topaç, M. M. et al., 2020. Lightweight Design of a Rear Axle Connection Bracket for a Heavy Commercial Vehicle by Using Topology Optimisation: A Case Study. MECHANIKA. 64–72. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.26.1.23141>
- [12] Oneil, B. et al., 2025. Pengaruh Penggunaan Modifikasi Komponen pada Sistem Pengereman Motor terhadap Behavior Pengendara Motor Berkapasitas Mesin 150–250 Cc. Jurnal Metris. 78–88. <https://doi.org/10.25170/metris.v26i01.7194>
- [13] Fathi, H. et al., 2024. Modeling and Validation of a Passenger Car Tire Using Finite Element Analysis. MDPI. 384–402.
- [14] Yadav, R., 2022. Finite Element Analysis Using MATLAB. IJERT. 764-769. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.39902>
- [15] Nugraha, M. H. et al., 2025. Weight Reduction of Rear Wheel Bracket in FSAE Electric Vehicles Using Topology Optimization. SINTEK Jurnal. 42–50. <https://doi.org/10.24853/sintek.19.1.42-50>
- [16] Tyflopoulos, E. et al., 2021. Optimization of Brake Calipers Using Topology Optimization for Additive Manufacturing. MDPI. 1-21 <https://doi.org/10.3390/app11041437>
- [17] Raffic, N. M. et al., 2025. Material Selection for Automotive Engine Mounting Bracket Using Multiple MCDM Techniques and Numerical Simulation. IJIDem. 7061-7076. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02267>
- [18] Risaliti, E. et al., 2025. Optimizing Lightweight Material Selection in Automotive Engineering: A Hybrid Methodology Incorporating Ashby's Method and VIKOR Analysis. MDPI. 1-23. <https://doi.org/10.3390/machines13010063>
- [19] Amalia, Y., 2022. Paduan Aluminium Berdasarkan Sifat Mekanik: Studi Literatur Singkat. Sang Pencerah. 722–732. <https://doi.org/10.35326/pencerah.v8i3.2479>
- [20] Firdaus et al., 2025. Perbandingan Pengaruh Kecepatan Arus Air terhadap Laju Korosi dan Kekerasan pada Alumunium dan Baja Karbon sebagai Prototipe Plat Body Kapal. Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro. 165–171. <https://doi.org/10.24127/trb.v13i1.3285>
- [21] Agarwal dan Mthembu, L., 2022. Structural Analysis and Optimization of Heavy Vehicle Chassis Using Aluminium P100/6061 Al and Al GA 7-230 MMC. MDPI. 1-14.

- [22] Jufriyanto, M. et al., 2020. Analysis of Load Variations on ST 60 Steel Using Vickers Method. IJECS. 231-235.
<https://doi.org/10.21107/ijseit.v5i1.8940>
- [23] Al, T. et al., 2023. Perancangan dan Analisis Bracket Baterai Pack Bis Listrik Menggunakan Metode Elemen Hingga. Jurnal Teknik Mesin UNDIP. 488–493.
- [24] Lubis, D. Z. et al., 2021. Clearance Effect on the Sheared Edge Characteristics of Key Chain Cranioplasty Plate in the Punching Process. The Electrochemical Society. 1-7.
- [25] Muhajir, A. N. et al., 2025. Studi Pengaruh Jumlah, Ukuran, Bentuk Mesh terhadap Hasil Simulasi Rangka Sepeda Motor Listrik Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA). Jurnal Media Informatika. 2720–2731.
<https://doi.org/10.55338/jumin.v6i6.6168>
- [26] Febrianto, P. et al., 2024. Studi Komparatif Mesh Hexahedral dan Tetrahedral pada Analisis Statis Crane Hook dengan ANSYS. SINERGI. 63–76.
<https://doi.org/10.31963/sinergi.v22i1.4834>
- [27] Hotma, L. et al., 2024. Mesh Convergence Test by Using Finite Element Analysis (FEA) in Shaft Loading of 2 KW Induction. Jurnal Rekayasa Mesin UB. 1271–1280.
<https://doi.org/10.21776/jrm.v15i3.1516>
- [28] Procopenco, G. et al., 2023. Topological Optimization Using Neuronal Algorithm. 37–40.
<https://doi.org/10.35219/mms.2023.1.06>
- [29] Taherdoost, H., 2023. Analysis of Simple Additive Weighting Method as a Multi-Attribute Decision Making Technique: A Step-by-Step Guide. Journal of Management Science & Engineering Research. 21-24.
<https://doi.org/10.30564/jmser.v6i1.5400>
- [30] Setiawan, S. & Suryanto, 2025. Kombinasi Metode ROC-SAW Untuk Analisis Efisiensi Bahan Bakar Kendaraan LSUV. Jurnal Infortech, 7(2).
- [31] Huzni, S. et al., 2019. Shape and Geometry of Hip Stem Prosthesis Produced by Topology Optimization: Evaluation of Pre-Reconstruction. SNTTM. 9–10.
- [32] Zulfikar, T. R. M. P. et al., 2024. Simulasi Pengaruh Bentuk Piston Bowl dan Dome terhadap Perubahan Sifat Mekanik Menggunakan Software Ansys dengan Metode Finite Element Analysis. Dinamika Teknik Mesin. 88–97.
<https://doi.org/10.29303/dtm.v14i1.720>