

# Optimasi Topologi Geometri *Hexapod Robot Legs* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Siti Nurzehan Maulidiawati<sup>a,1</sup>, Zaid Sulaiman<sup>a,2,\*</sup>.

<sup>a</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nusa Putra, Sukabumi, Jawa Barat, 43152, Indonesia

<sup>1</sup> [siti.maulidiawati\\_tm21@nusaputra.ac.id](mailto:siti.maulidiawati_tm21@nusaputra.ac.id); <sup>2</sup> [zaid.sulaiman@nusaputra.ac.id](mailto:zaid.sulaiman@nusaputra.ac.id);

\* Corresponding Author

## ABSTRAK

Desain kaki robot hexapod memiliki peran krusial dalam menentukan stabilitas dan efisiensi pergerakan, terutama pada aplikasi di medan berat seperti operasi penyelamatan. Penelitian ini menerapkan metode optimasi topologi berbasis metode elemen hingga untuk mengurangi massa kaki robot tanpa mengorbankan kekuatan struktural. Simulasi awal menunjukkan nilai tegangan maksimum von mises sebesar 0,0808 Mpa dengan nilai defleksi 0,0006 mm, serta safety factor yang tinggi sebesar 695. Melalui optimasi topologi dengan target pengurangan massa 60%, diperoleh hasil desain yang lebih ramping dengan pengurangan massa dari 55,92 gram menjadi 22,4 gram. Simulasi akhir menunjukkan peningkatan tegangan maksimum menjadi 0,093 Mpa dan defleksi 0,0011 mm, dengan nilai safety factor yang masih sangat aman di angka 604. Hasil ini menegaskan bahwa optimasi topologi cukup efektif meningkatkan efisiensi struktural, menghasilkan kaki robot yang jauh lebih ringan dengan tetap mempertahankan kekuatan strukturalnya.

## KATA KUNCI

Robot Hexapod  
Optimasi Topologi  
*Finite Element Method*  
Desain Struktural

## 1. Pendahuluan

Era Revolusi Industri 4.0 telah mendorong percepatan otomatisasi di berbagai sektor, salah satunya melalui pengembangan teknologi robotika. Permintaan global terhadap robot industri meningkat signifikan, dengan laporan dari *International Federation of Robotics* (IFR) tahun 2023 mencatat peningkatan instalasi robot industri sebesar 5% secara global, mencapai lebih dari 550.000 unit per tahun [1]. Kecenderungan ini menandakan semakin pentingnya inovasi dalam desain robot, terutama untuk meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan adaptabilitas terhadap berbagai lingkungan kerja. Dalam lanskap robotika mobile, hexapod robot menonjol sebagai platform yang andal dan stabil, khususnya dalam medan yang tidak rata [2]. Dengan enam kaki yang bergerak secara terkoordinasi, hexapod mampu mempertahankan kestabilan bahkan ketika dua kaki tidak menyentuh tanah. Karakteristik ini menjadikannya sangat berguna untuk eksplorasi medan berbahaya, aplikasi militer, termasuk dalam operasi pemadam kebakaran dan pencarian serta penyelamatan (SAR) [3].

Desain geometri kaki robot hexapod sangat mempengaruhi kinerja dinamis, stabilitas gerak robot, serta kekuatan struktural, terutama ketika robot digunakan untuk membawa beban tambahan seperti sensor termal, kamera, atau bahkan modul pemadam kebakaran ringan [4]. Kaki robot harus cukup kuat untuk menahan beban robot dan bergerak leluasa di lingkungan sekitarnya. Tetapi material kaki robot harus ringan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kecepatan gerak [5]. Oleh karena itu, desain yang tidak optimal dapat menyebabkan konsumsi energi yang tinggi dan mengurangi umur operasional robot. Dalam konteks ini, optimasi struktur dan bentuk geometri kaki menjadi aspek penting yang menentukan efektivitas manuver dan daya tahan terhadap beban dinamis. Pendekatan tradisional desain berbasis intuisi dan trial-and-error terbukti kurang efisien dan sulit untuk diadaptasi terhadap kebutuhan spesifik [5].

Untuk mengatasi tantangan tersebut, Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) menjadi alat yang sangat relevan karena mampu mensimulasikan respons struktur terhadap beban, tekanan, dan kondisi batas lainnya dengan presisi tinggi [6]. FEM telah digunakan secara luas dalam teknik mesin dan desain produk, termasuk dalam robotika, untuk mengevaluasi kekuatan dan kekakuan struktur secara numerik. Namun demikian, penggunaan FEM sebagai alat analisis perlu dikombinasikan dengan metode optimasi topologi agar menghasilkan desain yang tidak hanya kuat tetapi juga ringan dan efisien secara material. Optimasi topologi memungkinkan perancangan bentuk struktur dari nol berdasarkan kondisi beban dan batas, bukan hanya memodifikasi bentuk yang sudah ada [7]. Optimasi ini membantu mengurangi massa tanpa mengurangi kekuatan, yang penting dalam robot SAR dan *firefighting*. Untuk

objek yang digunakan ialah robot prototype milik Tim Robotika Genusian Nusa Putra yang ditujukan untuk perlombaan dibidang SAR.

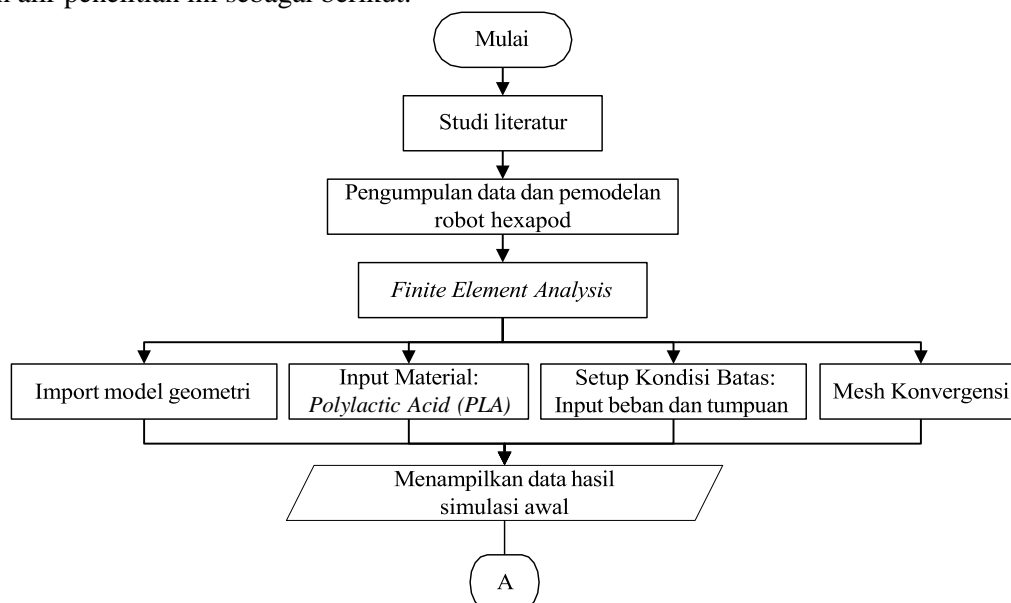
Penerapan metode ini pada desain kaki robot hexapod tidak hanya berpotensi mengurangi berat keseluruhan robot, tetapi juga meningkatkan kinerja mekanisnya [8]. Pengurangan massa pada kaki robot dapat mengurangi konsumsi energi selama operasi, meningkatkan kecepatan, dan memperpanjang masa pakai baterai, yang sangat penting dalam aplikasi lapangan [9]. Selain itu, optimasi topologi juga memungkinkan desain yang lebih inovatif dan kompleks yang sulit dicapai dengan metode desain konvensional seperti dalam studi oleh Yüksel (2019), disebutkan bahwa aplikasi optimasi topologi pada kaki robot menunjukkan peningkatan efisiensi struktural hingga 30% dibandingkan desain konvensional [10]. Struktur yang dihasilkan dapat memiliki bentuk organik yang efisien secara struktural, memberikan keunggulan tambahan dalam hal estetika dan fungsionalitas. Hal ini menunjukkan potensi besar untuk diterapkan lebih lanjut pada struktur hexapod, terutama dalam konteks medan ekstrem yang memerlukan kekuatan dan fleksibilitas tinggi. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa asumsi teknis untuk menyederhanakan pemodelan dan analisis, yaitu distribusi beban robot dianggap merata pada keenam kaki saat kondisi statik, Setiap kaki robot menahan 1/6 dari total berat robot, Simulasi menggunakan analisis statik linier, dianggap cukup untuk merepresentasikan beban dominan selama pergerakan lambat atau saat diam, dan material cetak 3D (PLA) dianggap homogen dan isotropik.

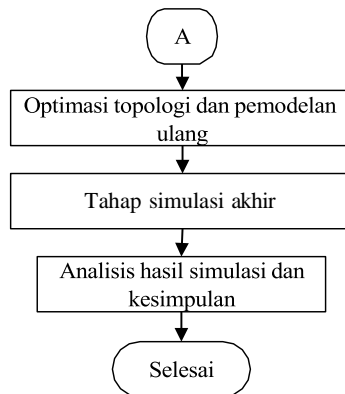
Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode optimasi topologi berbasis FEM pada desain kaki robot hexapod. Dengan fokus pada pengurangan massa tanpa mengorbankan kekuatan, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan robot hexapod yang lebih efisien dan andal. Penelitian ini mengeksplorasi secara sistematis bagaimana pendekatan optimasi berbasis FEM mampu menjawab tantangan desain struktural robot berkaki enam dalam konteks fleksibilitas. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat dihasilkan desain kaki robot yang lebih ringan dan kuat, yang tidak hanya meningkatkan performa robot tetapi juga membuka peluang baru dalam desain struktur robotika di masa depan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Diagram Alir Penelitian

Metode penelitian secara langsung berkaitan dengan bagaimana mengetahui sesuatu. Adapun diagram alir penelitian ini sebagai berikut.

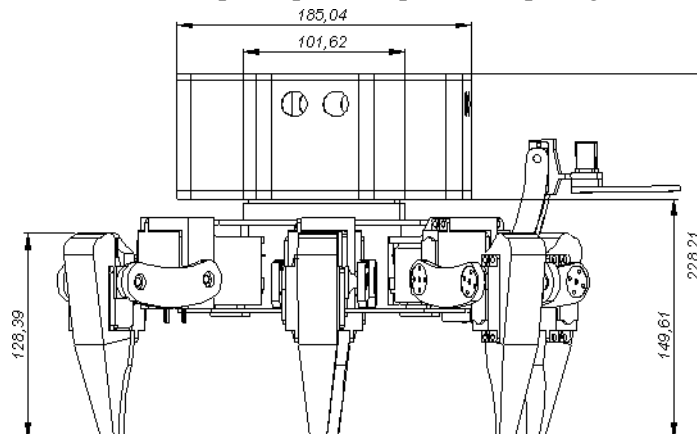




Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## 2.2 Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi Literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkaitan dengan pengumpulan data pustaka yang bertujuan untuk memperdalam landasan teori yang digunakan didalam penelitian yang dilakukan. Studi literatur dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui serta mempelajari mengenai robot hexapod, software elemen hingga, optimasi desain struktur (optimasi topologi), sifat mekanik material serta dasar dalam teknik mesin terkait dengan mekanika kekuatan material. Untuk menunjang penelitian ini juga dilakukan pengumpulan data berupa data geometri robot serta berat setiap part robot hexapod tersebut untuk selanjutnya dilakukan pemodelan menggunakan software CAD Solidworks. Adapun model yang dibuat serta data berat setiap komponen dapat dilihat pada gambar 2 dan tabel 1 berikut.



Gambar 2. Model Robot Hexapod

Tabel 1. Data Kondisi Operasi Pompa dan Motor Penggerak

No	Komponen	Qty	Berat total (gram)
1	Cover atas	1	110
2	Gripper	1	60
3	Kamera	1	40
4	Motor servo	18	1080
5	Kontroler dan <i>mid body</i>	1	370
6	Dudukan servo	6	150
7	Kaki bawah	6	240
8	Kaki tengah	6	150
9	<i>Base plate</i>	1	40
		Total	2240

### 2.2.1 Landasan Teori Perhitungan

Dalam proses analisis dan optimasi topologi pada kaki robot hexapod, diperlukan pemahaman dasar terkait teori perhitungan tegangan, defleksi, faktor keamanan, serta hubungan antara massa, volume, dan densitas material yang digunakan. Landasan teori ini menjadi dasar dalam pemodelan simulasi menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) serta dalam memvalidasi hasil simulasi dengan perhitungan manual sederhana. Tegangan ( $\sigma$ ) merupakan besaran penting untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan gaya yang bekerja pada suatu penampang. Tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan (Pa atau N/m<sup>2</sup>)

F = Gaya yang bekerja (N)

A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

Dengan mengetahui nilai tegangan, dapat dibandingkan terhadap nilai tegangan luluh (*yield strength*) material untuk memastikan komponen dapat bekerja dengan aman. Pada tabel 2 tertera bahwa material PLA memiliki nilai tegangan luluh 56, 192 MPa, sehingga hasil tegangan yang diperoleh dari simulasi maupun perhitungan manual harus lebih kecil dari nilai tersebut.

Selain tegangan, faktor keamanan (*Safety Factor*) digunakan untuk memastikan desain memiliki cadangan kekuatan dan aman saat digunakan. Faktor keamanan dapat dihitung dengan rumus:

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{max}}$$

Keterangan:

SF = Faktor keamanan

$\sigma_{yield}$  = Tegangan luluh material (Pa)

$\sigma_{max}$  = Tegangan maksimum akibat beban kerja (Pa)

Nilai FOS (*Factor of Safety*) yang umum digunakan adalah minimal 1,5 untuk kondisi lingkungan yang stabil dan data material yang akurat, nilai FOS >1 menandakan bahwa desain berada dalam batas aman [12]. Dalam perancangan robot hexapod yang digunakan untuk medan berat seperti misi Search and Rescue (SAR) atau pemadam kebakaran, faktor keamanan yang dianjurkan > 2 agar desain tetap andal dalam kondisi penggunaan kritis [13].

Dengan memahami teori dan rumus-rumus tersebut, proses analisis menggunakan metode elemen hingga dapat dilakukan dengan pemahaman yang lebih komprehensif dan hasil simulasi dapat divalidasi dengan pendekatan manual, memastikan desain kaki robot hexapod yang dioptimasi memiliki massa lebih ringan namun tetap kokoh dan aman digunakan.

### 2.3 Finite Element Analysis

Simulasi yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah simulasi statik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*) menggunakan software Solidworks. Pada tahap ini dilakukan simulasi statik desain sebelum dilakukan optimasi topologi, dimana analisis ini dilakukan sebagai data acuan untuk membandingkan dengan variasi model setelah di optimasi topologi. Adapun langkah dalam simulasi tahap awal ini setelah pembuatan model dilakukan dengan lima tahap yaitu input material, input beban, input kondisi batas, pembuatan mesh dan analisis hasil simulasi.

### 2.3.1 Input Material

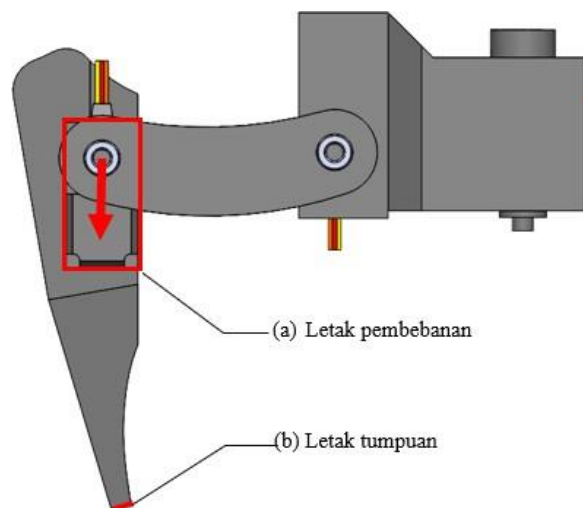
Langkah pertama dalam metode *finite element analysis* ini adalah menentukan jenis dan properti material yang akan digunakan pada simulasi. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah material 3D printer *Polylactic Acid (PLA)*, dikarenakan pada perpustakaan atau *database software* tidak terdapat properti material yang digunakan, maka harus mendefinisikan material secara manual dengan memasukan nilai properti sifat mekaniknya seperti modulus elastisitas, *yield strength*, *ultimate strength*, *tensile strength*, *poison ratio*, dan sifat lainnya. Properti material yang diinput pada software dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Properti Material Polylactic Acid (PLA)

No	Properti	Nilai
1	Density ( $\rho$ )	1300 kg/m <sup>3</sup>
2	Young Modulus	3,5 GPa
3	Flexural Modulus	6,0 %
4	Flexural Strength	80 MPa
5	Shear Modulus	2,4 GPa
6	Poison Ratio	0,23
7	Yield Strength	56,192 Mpa
8	Ultimate Tensile Strength	65,5 MPa
9	Thermal Conductivity	0,13 W/m – K

### 2.3.2 Setup Kondisi Batas

Penentuan kondisi batas merupakan langkah untuk menentukan bagian permukaan pada model seperti menentukan letak tumpuan dan letak pembebanan. Letak pembebanan pada model yang akan disimulasikan terletak pada permukaan dimana motor servo ditempatkan yang dapat dilihat pada gambar 3 (a) dengan nilai pembebanan diinput berdasarkan berat total robot yang dibagi rata ke setiap kaki-kakinya yang menyentuh tanah. Sedangkan penempatan letak tumpuan ditunjukkan pada gambar 3 (b).



Gambar 3. Kondisi Batas Letak Pembebanan dan Letak Tumpuan

Karena robot hexapod memiliki enam kaki, dan analisis yang dilakukan adalah *static structure*, maka berat total robot akan dibagi ke enam kaki. Untuk menentukan berat pada setiap kaki dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$W = m \cdot g$$

$$W = 2,24 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 22\text{N}$$

Untuk setiap kaki :

$$F_{kaki} = \frac{W}{N}$$

$$F_{kaki} = \frac{22N}{6} = 3,66N$$

### 2.3.3 Mesh Konvergensi

Proses pembuatan mesh merupakan proses membagi domain komputasi menjadi sel-sel kecil yang tidak tumpang tindih. Pada studi ini digunakan *unstructured mesh* berbentuk tetrahedrons karena lebih fleksibel untuk geometri kompleks. Akurasi simulasi bergantung pada kualitas dan jumlah sel dalam mesh. Semakin banyak sel, semakin akurat, namun juga meningkatkan waktu komputasi. Oleh karena itu, perlu disesuaikan dengan kapasitas perangkat. Sebelum simulasi statik dilakukan, perlu dilakukan uji konvergensi mesh untuk memastikan hasil simulasi valid dan minim kesalahan, dengan memvariasikan ukuran mesh seperti pada tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi dan Variasi Mesh

No	Setup	Detail
1	Mesh type	Solid mesh
2	Mesh used	Standard mesh
3	Automatic transition	On
4	Element size variation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7,01 mm</li> <li>• 5,69 mm</li> <li>• 4,38 mm</li> <li>• 3,06 mm</li> <li>• 1,75 mm</li> </ul>
5	Mesh quality	Coarse to High

### 2.3.4 Optimasi Topologi dan Pemodelan Ulang

Proses optimasi topologi dilakukan untuk mengurangi massa kaki robot berbahan PLA dengan pengurangan massa sebesar 60% sambil mempertahankan area penting seperti tempat baut dan motor servo (*exclusion region*). Pengurangan massa sebesar 60% dipilih berdasarkan batasan pengurangan massa yang pada umumnya 30% - 60% dengan kaitannya ke tegangan, defleksi, dan safety factor yang tidak boleh melebihi dari hasil simulasi [14][15]. Nantinya hasil optimasi ini menjadi acuan desain ulang. Tahapan optimasi topologi ini meliputi impor model pada software, menentukan jenis material, menetapkan kondisi batas, mengatur persentase pengurangan massa, menentukan *exclusion region*, melakukan meshing serta menjalankan simulasi.

### 2.3.4 Analisis Hasil Simulasi Akhir dan Kesimpulan

Tahap ini merupakan simulasi akhir untuk menganalisis model hasil optimasi topologi dari berbagai variasi pengurangan massa yang telah dimodelkan ulang. Simulasi *static structure* dilakukan untuk mengetahui tegangan, regangan, defleksi, dan faktor keamanan. Hasilnya dibandingkan dengan model awal untuk menentukan desain paling optimal berdasarkan massa, tegangan, dan defleksi, yang disajikan dalam grafik hubungan antara persentase pengurangan massa dengan nilai deformasi dan tegangan.

## 3. Hasil dan Pembahasan

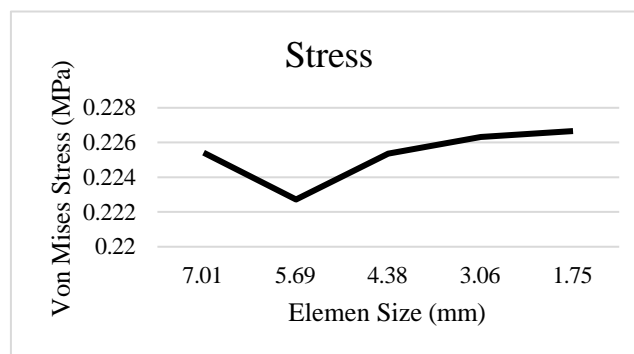
### 3.1 Mesh Konvergensi

Untuk meningkatkan akurasi dari hasil simulasi optimasi topologi pada kaki robot hexapod, total dari 5 set mesh dilakukan dengan ukuran mesh yang berbeda. Dari gambar 4 terlihat bahwa saat ukuran mesh semakin kecil, nilai tegangan von mises semakin konvergen dengan variasi perubahan nilai yang semakin kecil. Perubahan nilai (error) tegangan pada jumlah mesh dengan elemen 3,06 mm hanya sebesar 0,42% dari nilai sebelumnya, yang didapatkan dari selisih error mesh ukuran 3,06 mm dan 4,38 mm yang menunjukkan error dibawah 1%. Untuk lebih jelasnya perhitungan error tersebut bisa dilihat

pada tabel 4 di bawah. Oleh karena itu ukuran mesh 3,06 mm dipilih sebagai hasil simulasi akhir, karena telah memenuhi kriteria akurasi dengan perubahan nilai yang kurang dari 1% [16].

**Tabel 4.** Nilai eror dari tiap element size

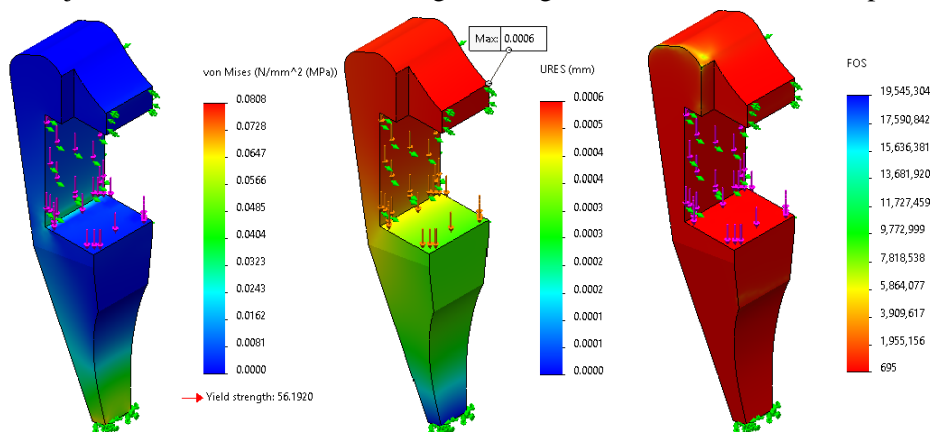
Element Size	Stress	Error(%)
7,01	0,22542	-
5,69	0,22272	1,21
4,38	0,22537	1,18
3,06	0,22632	0,42
1,75	0,22666	0,15



**Gambar 4.** Grafik Mesh Konvergensi

### 3.2 Hasil Simulasi Awal

Sebelum dilakukan optimasi topologi, dilakukan simulasi lebih dulu pada desain awal yang dapat dilihat pada gambar 5, dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan von mises yang relatif rendah, dengan nilai maksimum sebesar 0,0808 Mpa. Defleksi (*displacement*) yang tercatat sangat kecil yaitu 0,0006 mm, menunjukkan bahwa desain awal sangat kaku dengan nilai *safety factor* yang sangat tinggi di angka 695. Ini menunjukkan bahwa kaki robot secara struktural sangat aman, karena massa awal sebesar 55,92 gram masih sangat besar. Hasil dari simulasi ini menjadi acuan awal untuk dibandingkan dengan hasil desain setelah di optimasi topologi.



**Gambar 5.** Hasil Simulasi Awal, (a)Tegangan Von Mises, (b)Displacement, dan (c)Safety Factor

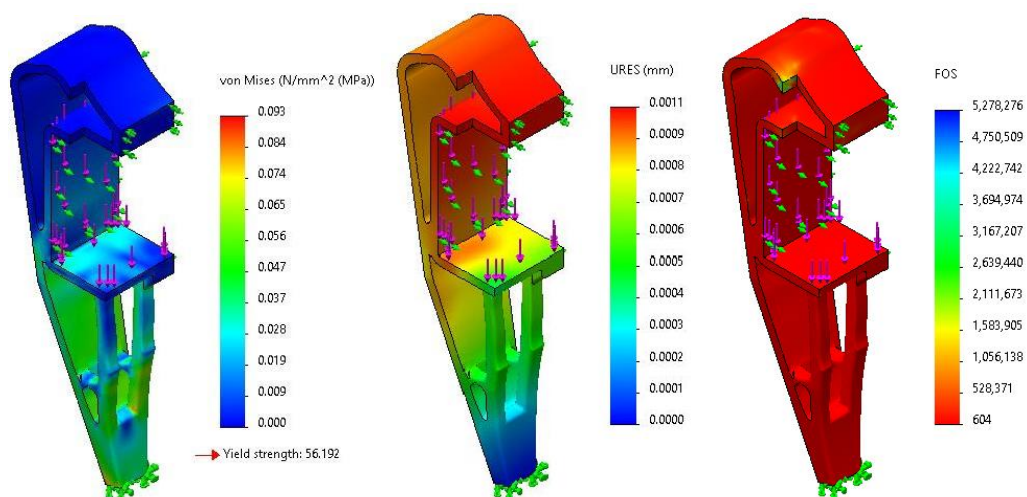
### 3.3 Hasil Optimasi Topologi

Hasil optimasi topologi pada desain kaki robot ditunjukkan pada gambar 6 yang menampilkan bentuk geometri kaki robot yang sudah di optimasi dengan pengurangan massa sebesar 60%. Optimasi tersebut mempertahankan area penting (seperti titik baut atau tempat motor servo) sebagai *exclusion region* agar tidak kehilangan kekuatan struktural di area kritis. Desain hasil optimasi terlihat memiliki struktur yang lebih ramping dengan bentuk yang organik, menunjukkan area-area yang tidak efektif secara struktural telah di eliminasi yang selanjutnya desain hasil optimasi di desain ulang sesuai bentuk dari desain yang sudah di optimasi sebelum dilakukan analisis statik lanjutan.



Gambar 6. Hasil Optimasi Topologi dan Desain Ulang

Hasil simulasi akhir (simulasi statik) pada model kaki robot hasil optimasi topologi dapat dilihat pada gambar 7. Dari gambar tersebut menunjukkan nilai tegangan maksimum Von Mises yang meningkat menjadi 0,093 Mpa, lebih tinggi dibanding desain awal. Hal ini wajar karena massa berkurang secara signifikan sehingga area penampang juga menjadi lebih kecil. Nilai defleksi juga mengalami peningkatan menjadi 0,0011 mm, namun nilainya masih dalam batas aman. Dan nilai safety factor turun menjadi 604, namun tetap menunjukkan desain yang sangat aman digunakan, artinya optimasi topologi berhasil mengurangi massa tanpa menyebabkan kegagalan struktural pada beban yang sama.



Gambar 7. Hasil Simulasi Akhir, (a)Tegangan Von Mises, (b)Displacement, dan (c)Safety Factor

Pada tabel 4 disajikan perbandingan antara desain awal dengan desain setelah optimasi. Tabel tersebut menunjukkan massa kaki robot berhasil dikurangi dari 55,92 gram menjadi 22,4 gram (60%). Meskipun nilai tegangan meningkat dan nilai safety factor menurun, nilai defleksi yang tetap kecil. Hal

ini menegaskan bahwa optimasi topologi sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi struktural tanpa mengorbankan kekuatannya.

**Tabel 5.** Perbandingan Desain Awal dan Optimasi

Hasil Simulasi Statik	Desain Awal	Desain Optimasi
Massa	55.92 gram	22,4 gram
Von Mises Stress	0,0808 MPa	0,093 MPa
Displacement	0,0006 mm	0,0011 mm
Safety Factor	695	604

Berdasarkan hasil simulasi statik yang telah dilakukan pada desain kaki robot hexapod, terjadi penurunan massa yang signifikan dari 55,92 gram pada desain awal menjadi 22,4 gram setelah dilakukan optimasi topologi. Penurunan massa ini mencapai sekitar 60%, menunjukkan bahwa optimasi topologi berhasil mengurangi bobot kaki robot secara signifikan. Pengurangan massa ini penting untuk mendukung efisiensi energi pada aktuator servo, meningkatkan kelincahan gerakan robot, serta mengurangi beban keseluruhan saat digunakan di medan lapangan.

Nilai von Mises stress mengalami kenaikan dari 0,0808 MPa pada desain awal menjadi 0,093 MPa setelah optimasi. Peningkatan ini merupakan konsekuensi wajar dari pengurangan material pada struktur sehingga distribusi tegangan menjadi lebih besar. Namun demikian, nilai tegangan tersebut masih sangat jauh di bawah nilai tegangan luluh material PLA yang berkisar 56,192 MPa, sehingga desain kaki robot tetap aman untuk digunakan.

Selain itu, displacement atau defleksi juga mengalami peningkatan dari 0,0006 mm menjadi 0,0011 mm setelah optimasi. Peningkatan defleksi ini terjadi akibat struktur menjadi lebih ringan, namun nilai defleksi yang terjadi tetap sangat kecil dan tidak mempengaruhi stabilitas serta fungsi kaki robot saat digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun massa berkurang secara signifikan, desain kaki robot tetap memiliki kekakuan dan stabilitas yang baik.

Nilai safety factor mengalami penurunan dari 695 pada desain awal menjadi 604 setelah optimasi. Penurunan ini adalah hal yang wajar mengingat adanya peningkatan tegangan akibat berkurangnya luas penampang. Namun, nilai safety factor tersebut masih sangat tinggi jika dibandingkan dengan standar industri yang biasanya berada pada kisaran  $> 1$ , sehingga desain kaki robot ini dapat dikatakan memiliki tingkat keamanan yang sangat baik.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa optimasi topologi yang dilakukan telah berhasil mengurangi massa kaki robot secara signifikan dengan tetap menjaga tegangan, displacement, dan faktor keamanan dalam batas aman. Hal ini membuktikan bahwa penerapan metode optimasi topologi pada desain kaki robot hexapod dapat meningkatkan efisiensi energi, performa, dan ketahanan struktur tanpa mengorbankan integritas struktural, sehingga siap untuk diterapkan dalam penggunaan robot hexapod pada medan berat seperti misi Search and Rescue (SAR) atau pemadaman kebakaran.

### 3.4 Perhitungan Manual sebagai Verifikasi Hasil Simulasi

Untuk memverifikasi hasil simulasi metode elemen hingga (FEM) pada kaki robot hexapod, dilakukan perhitungan manual menggunakan rumus dasar mekanika teknik. Hal ini untuk memastikan bahwa hasil simulasi sesuai dengan teori dasar dan untuk meningkatkan kepercayaan terhadap hasil optimasi topologi yang telah dilakukan.

#### 3.4.1 Perhitungan Tegangan

Tegangan pada penampang kaki dapat dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan (Pa atau N/m<sup>2</sup>)

F = Gaya yang bekerja (N)

A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

**Diketahui:**

- Berat total robot = 2,24 kg
- Tegangan luluh PLA ( $\sigma_{yield}$ ) = 56, 192 MPa =  $56,192 \times 10^6$  Pa
- Tegangan maksimum PLA ( $\sigma_{max}$ ) = 65,5 MPa =  $65,5 \times 10^6$  Pa
- Gaya berat total (W):

$$W = m \cdot g$$
$$W = 2,24 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 22\text{N}$$

- Beban terbagi rata pada 6 kaki

$$F_{kaki} = \frac{W}{N}$$
$$F_{kaki} = \frac{22\text{N}}{6} = 3,66\text{N}$$

- Luas penampang

$$A = \frac{F}{\sigma}$$

Sehingga untuk mendapatkan luas penampang dengan faktor keamanan:

$$A = \frac{F}{\sigma_{max}} = \frac{3,66 \text{ N}}{65,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2} = 5,587 \times 10^{-8} \text{ m}^2 = 0,05587 \text{ mm}^2$$

Perhitungan ini menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan faktor keamanan yang sesuai dan nilai tegangan maksimum material, luas penampang minimum yang dibutuhkan sangat kecil secara teoritis. Namun, dalam praktik rekayasa, nilai ini akan disesuaikan dengan batas manufaktur minimum, kekakuan, dan standar keamanan desain agar struktur tetap kokoh dan dapat diproduksi secara efektif. Selanjutnya, untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada penampang kaki robot:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$\sigma = \frac{3,66 \text{ N}}{0,05587 \text{ mm}^2} = 65, 509 \text{ Pa} = 0,0655 \text{ MPa}$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai tegangan sebesar 0,0655 MPa, nilai ini lebih kecil dari nilai tegangan maksimum material PLA, yang menunjukkan bahwa kaki robot akan bekerja dengan aman di bawah kapasitas materialnya. Selain itu, nilai ini mendekati hasil tegangan dari simulasi FEM yaitu 0,0808 MPa, sehingga hasil perhitungan manual ini dapat memverifikasi bahwa distribusi beban pada kaki robot sudah sesuai dengan asumsi desain yang direncanakan.

### 3.4.2 Perhitungan Safety Factor

Faktor keamanan dihitung dengan rumus:

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{max}}$$

Keterangan:

SF = Faktor keamanan

$\sigma_{yield}$  = Tegangan luluh material (Pa)

$\sigma_{max}$  = Tegangan maksimum akibat beban kerja (Pa)

**Diketahui:**

- Tegangan luluh PLA ( $\sigma_{yield}$ ) = 56, 192 MPa

- Tegangan maksimum hasil simulasi = 0,0808 MPa (sebelum optimasi) dan 0,093 MPa (setelah optimasi)  
Sebelum optimasi:

$$SF = \frac{56,192}{0,0808} = 695,44$$

Nilai faktor keamanan sebelum optimasi adalah 695,44, yang menunjukkan tingkat keamanan struktur yang sangat tinggi. Sehingga ini memungkinkan dilakukannya optimasi untuk pengurangan massa agar lebih efisien dalam penggunaan energi.

Setelah optimasi:

$$SF = \frac{56,192}{0,093} = 604,21$$

Nilai faktor keamanan setelah optimasi turun menjadi 604,21. Penurunan ini wajar mengingat pengurangan massa dan penampang akibat optimasi topologi. Meskipun demikian, nilai ini masih sangat tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa kaki robot hasil optimasi tetap aman untuk digunakan, dengan keuntungan tambahan berupa pengurangan massa yang signifikan sehingga mendukung efisiensi energi dan performa robot hexapod secara keseluruhan.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil optimasi, dapat disimpulkan bahwa optimasi topologi dengan metode elemen hingga berhasil mengurangi massa kaki robot hexapod hingga 60% dengan tetap mempertahankan kekuatan strukturalnya, dengan nilai tegangan yang tercatat setelah optimasi sebesar 0,093 Mpa, nilai defleksi 0,0011mm dan nilai safety factor sebesar 604. Nilai tegangan, defleksi dan safety factor pasca optimasi masih dalam batas aman, membuktikan bahwa desain hasil optimasi yang cukup efektif dalam meningkatkan efisiensi struktural tanpa banyak mengorbankan kekuatan strukturalnya.

#### Daftar Pustaka

- [1] I. F. of Robotics, "World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas." Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas?utm\\_source=](https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas?utm_source=)
- [2] L. Fućek, Z. Kovačić, and S. Bogdan, "Analytically founded yaw control algorithm for walking on uneven terrain applied to a hexapod robot," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1177/1729881419857997.
- [3] Y. Liu, C. Wang, H. Zhang, and J. Zhao, "Research on the posture control method of hexapod robot for rugged terrain," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 19, pp. 1–22, 2020, doi: 10.3390/app10196725.
- [4] Y. G. Zhu, B. Jin, W. Li, and S. T. Li, "Optimal design of hexapodwalking robot leg structure based on energy consumption and workspace," *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 305–317, 2014, doi: 10.1139/tcsme-2014-0022.
- [5] F. Tedeschi and G. Carbone, "Design issues for hexapod walking robotsdesign issues for hexapod walking robots," *Robotics*, vol. 3, no. 2, pp. 181–206, 2014, doi: 10.3390/robotics3020181.
- [6] S. Engineering, "Understanding loads, boundary conditions and time-steps." Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [https://www.simulaxengineering.com/post/loads-and-boundary-conditions?utm\\_source=](https://www.simulaxengineering.com/post/loads-and-boundary-conditions?utm_source=)
- [7] S. Nishiwaki and K. Terada, "Advanced topology optimization," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 113, no. 8, 2017, doi: 10.1002/nme.5703.
- [8] R. C. Batista *et al.*, "Topological and lattice-based AM optimization for improving the structural efficiency of robotic arms," *Front. Mech. Eng.*, vol. 10, no. June, pp. 1–12, 2024, doi: 10.3389/fmech.2024.1422539.
- [9] Q. He, "Topology Optimization of Quadruped Robot Limbs based on Buckling Analysis," *Highlights Sci. Eng. Technol.*, vol. 106, pp. 188–197, 2024, doi: 10.54097/ndk16t06.
- [10] O. YUKSEL, "an Overview on Topology Optimization Methods Employed in Structural Engineering," *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilim. Derg.*, vol. 5, no. 2, pp. 159–

- 175, 2019, doi: 10.34186/klujes.606666.
- [11] W. Lv, H. Wen, G. Shi, and S. Wang, “Analyzing the Inlet Gas Void Fraction on the Flow Characteristics for a Multiphase Pump Based on Cavitation Cases,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.3390/jmse11010130.
- [12] F. Hardiputra, A. Djafar, and Sulistijono, “Perancangan As Roda Troli Pemanjat Tangga Berdasarkan Analisis Tegangan Dan Faktor Keamanan,” *SNITT- Politek. Negeri Balikpapan*, vol. 3, pp. 312–316, 2018.
- [13] M. S, “Pengaruh Variasi Material dan Beban Terhadap Tegangan dan Faktor Keamanan pada Desain Pencakar Inner Puller Bearing Berbasis Simulasi Menggunakan Solidworks.,” Universitas Negeri Semarang, 2019.
- [14] Q. He, “Topology Optimization of Quadruped Robot Limbs based on Buckling Analysis,” 2024.
- [15] R. C. Batista *et al.*, “Topological and lattice-based AM optimization for improving the structural efficiency of robotic arms,” *Front Mech Eng*, vol. 10, 2024, doi: 10.3389/fmech.2024.1422539.
- [16] A. Leonardo Johanis, “PEMODELAN PEMBEBANAN PADA BATANG BERONGGA DAN PIPA MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK ABAQUS,” 2019.