

TUGAS AKHIR
TOPOLOGY OPTIMASI DESAIN KAKI ROBOT SAR 3
DOF BERBAHAN PET

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

REIHAN RAMADHAN
2107230139



PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025

HALAMAN PENGESAHAN

Laporan penelitian Tugas Akhir ini diajukan oleh:

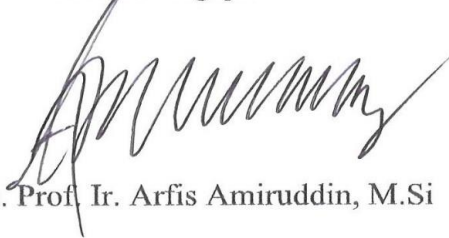
Nama : Reihan Ramadhan
NPM : 2107230139
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tugas Akhir : Topologi Optimasi Desain Kaki Robot Sar 3 Dof
Berbahan Pet
Bidang Ilmu : Konstruksi Manufaktur

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 09 September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Penguji I



Assoc. Prof. Ir. Arfis Amiruddin, M.Si

Dosen Penguji II



H. Muharnif M, S.T., M.Sc

Dosen Penguji III



Iqbal Tanjung, S.T., M.T

Program Studi Teknik Mesin

Ketua



Chandra A Siregar, S.T., M.T

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertandatangan di bawah ini :

Nama Lengkap : Reihan Ramadhan
NPM : 2107230139
Tempat / Tanggal Lahir : Medan, 2 November 2003
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Mesin

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul :

“TOPOLOGY OPTIMASI DESAIN KAKI ROBOT SAR 3 DOF BERBAHAN PET”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karna hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain yang pada hakikatnya bukan merupakan karya tulis tugas akhir secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia di proses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan / keserjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 9 September 2025



Reihan Ramadhan

ABSTRAK

Robot pencarian dan penyelamatan (Search and Rescue/SAR) memerlukan desain kaki yang ringan namun tetap memiliki kekuatan dan kekakuan tinggi agar mampu bergerak secara efektif di medan yang tidak rata. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi desain kaki robot SAR 3-DOF berbahan Polyethylene Terephthalate (PET) menggunakan metode *topology optimization* untuk memperoleh struktur yang efisien dari segi massa tanpa mengorbankan kekuatan mekanik. Proses penelitian diawali dengan perancangan model kaki robot, kemudian dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga (FEA) untuk memperoleh nilai deformasi total, regangan elastis ekuivalen, dan tegangan Von Mises. Selanjutnya, dilakukan topologi optimasi dengan variasi *percent to retain* sebesar 70%, 60%, dan 50%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengurangan material melalui topologi optimasi menyebabkan peningkatan nilai deformasi, regangan, dan tegangan. Namun demikian, seluruh nilai tegangan maksimum yang dihasilkan masih berada jauh di bawah kekuatan luluh material PET, sehingga struktur tetap aman digunakan. Dari ketiga variasi, kondisi retain 60% memberikan kompromi terbaik karena mampu menghasilkan pengurangan massa yang signifikan dengan tetap menjaga kekakuan dan integritas struktur. Dengan demikian, metode topologi optimasi terbukti efektif dalam menghasilkan desain kaki robot SAR yang ringan dan kuat, sehingga dapat mendukung performa robot dalam misi pencarian dan penyelamatan.

Kata kunci: Robot SAR, 3-DOF, Topology Optimization, PET, Simulasi FEA.

ABSTRACT

Search and Rescue (SAR) robots require leg designs that are lightweight yet capable of maintaining high strength and stiffness to effectively operate on uneven terrains. This study aims to optimize the design of a 3-DOF SAR robot leg made of Polyethylene Terephthalate (PET) using the topology optimization method in order to achieve a mass-efficient structure without compromising its mechanical strength. The research process began with the design of the robot leg model, followed by simulations using Finite Element Analysis (FEA) to obtain values of total deformation, equivalent elastic strain, and Von Mises stress. Subsequently, topology optimization was carried out with percent to retain variations of 70%, 60%, and 50%. The results indicate that material reduction through topology optimization leads to an increase in deformation, strain, and stress values. However, all maximum stress values obtained remain well below the yield strength of PET material, ensuring that the structure is still safe to use. Among the three variations, the 60% retain condition provides the best compromise, as it achieves significant mass reduction while maintaining adequate stiffness and structural integrity. Therefore, topology optimization has proven to be an effective method for producing lightweight yet strong robot leg designs, supporting the performance of SAR robots in search and rescue missions.

Keywords: SAR Robot, 3-DOF, Topology Optimization, PET, FEA Simulation.

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Topology Optimasi Desain Kaki Robot Sar 3 Dof Berbahan Pet” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terima kasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Iqbal Tanjung S.T., M.T, selaku dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Bapak Chandra A Siregar, S.T., M.T dan Bapak Ahmad Marabdi, S.T., M.T., selaku Ketua dan Sekretaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan nasehat dan bimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir penelitian penulis.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang terus mendukung seluruh kegiatan mahasiswa/i Fakultas Teknik dalam proses perkuliahan.
4. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah memberikan banyak ilmu keteknik mesin kepada penulis.
5. Orang tua penulis: Bapak (Rudiawan) dan Ibu (Sonya Widiastuti Yanti), selaku kedua orang tua penulis yang selalu memberikan doa terbaiknya yang tiada henti untuk kesuksesan, keberhasilan dan membiayai Studi penulis selama proses perkuliahan.
6. Bapak/Ibu Staff Administrasi di Biro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan administrasi selama proses perkuliahan.

7. Kakak dan Adik Penulis Suci Rahayu Ningsih dan Jhira Aliyyah Sebagai Tim Support Dari Awal Menempuh Studi Sampai Menyelesaikan Studi di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Raihan Syahputra Nasution, Muhammad Aulia, Risto Ramadhan Saragih, Dwiki Chandra,S.T dan rekan-rekan seperjuangan sebagai grup riset yang membantu penulis dalam melakukan riset.
9. Nayla Mahrani Sebagai Penyemangat dan Mendukung Dalam penulisan Tugas Akhir.
10. Raihan Syahputra Nasution, Muhammad Aulia, Sarhindi Jailani Tanjung, Rehan Surenra, Taufik Akbar Rambe, Risto Ramadhan Saragih, selaku teman-teman seperjuangan penulis selama berkuliah di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
11. Teman-teman penulis di kelas C1-Pagi Teknik Mesin yang terus bersama-sama menjaga solidaritas dan semangat selama proses perkuliahan.

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis dimasa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi Manufaktur Teknik Mesin.

Medan, 29 April 2025

Reihan Ramadhan

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2 TINJAIUAN PUSATAKA	4
2.1 Kaki Robot SAR	4
2.2 Jenis Jenis Robot SAR	4
2.3 Robot Beroda	5
2.4 Robot Berkaki	5
2.5 Robot Drone	6
2.6 Polyethylene terephthalate (PET)	7
2.7 SolidWork	8
2.8 Ansys	9
2.9 Topologi optimasi	11
BAB 3 METODE PENELITIAN	14
3.1 Tempat dan waktu	14
3.1.1 Tempat penelitian	14
3.1.2. Waktu penelitian	14
3.2 Bahan dan alat penelitian	15
3.2.1 Bahan yang di gunakan	15
3.2.2. Alat penelitian	15
3.2.3 Diagram alir	17
3.4 Rancangan Penelitian	18
3.5 Prosedur penelitian	18
3.5.1 Studi Lliteratur	18
3.5.2 Persiapn Material Uji	18
3.5.3 Mendesain Kaki Robot	18
3.5.4 Simulasi Optimasi Desain Kaki Robot	19
3.5.5 Validasi Hasil Simulasi	19
3.6 Variabel Yang Akan Diteliti	19
3.6.1 Variabel <i>Independent</i>	19

3.6.2	Variabel <i>Dependent</i>	20
-------	---------------------------	----

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	21
-----------------------------------	-----------

4.1	Hasil desain lengan robot 3-DOF	21
4.2	Analisis Hasil Pengujian Simulasi Menggunakan Ansys Leg 1, Leg 2, Leg 3	24
4.2.1	Uji Total <i>Deformation Leg 1</i>	24
4.2.2	Uji <i>Equivalent Elastic Strain</i>	24
4.2.3	Uji <i>von mises stress</i>	25
4.2.4	Uji Total <i>Deformation Leg 2</i>	26
4.2.5	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 2</i>	27
4.2.6	Uji <i>Von Mises Stressi Leg 2</i>	28
4.2.7	Uji Total <i>Deformation Leg 3</i>	29
4.2.9	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 3</i>	31
4.3	Hasil Optimasi Dan Simulasi Struktural Menggunakan Ansys <i>Leg 1, Leg 2, dan Leg 3</i>	32
4.3.1	Optimasi Dan Simulasi Struktural Desain <i>Leg 1</i>	32
4.3.2	Optimasi Dan Simulasi Struktural Desain <i>Leg 2</i>	34
4.3.3	Optimasi Dan Simulasi Struktural Desain <i>Leg 3</i>	36
4.4	Hasil Perbaikan Desain <i>Leg 1,2 dan 3</i>	38
4.4.1	Hasil Perbaikan Desain <i>Leg 1</i>	38
4.4.2	Hasil Perbaikan Desain <i>Leg 2</i>	40
4.4.3	Hasil Perbaikan Desain <i>Leg 3</i>	42
4.5	Analisis Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain <i>Leg 1, 2 Dan 3</i>	43
4.5.1	Uji Total <i>Deformation Leg 1 (Retain 70%)</i>	43
4.5.2	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 1 (Retain 70%)</i>	44
4.5.3	Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 1 (Retain 70%)</i>	45
4.5.4	Uji Total <i>Deformation Leg 1 (Retain 60%)</i>	46
4.5.6	Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 1 (Retain 60%)</i>	47
4.5.7	Uji Total <i>Deformation Leg 1 (Retain 50%)</i>	48
4.5.8	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 1 (Retain 50%)</i>	48
4.5.9	Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 1 (Retain 50%)</i>	49
4.5.10	Uji Total <i>Deformation Leg 2 (Retain 70%)</i>	49
4.5.11	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 2 (Retain 70%)</i>	50
4.5.12	Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 2 (Retain 70%)</i>	51
4.5.13	Uji Total <i>Deformation Leg 2 (Retain 60%)</i>	51
4.5.14	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 2 (Retain 60%)</i>	52
4.5.15	Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 2 (Retain 60%)</i>	53
4.5.16	Uji Total <i>Deformation Leg 2 (Retain 50%)</i>	54
4.5.17	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 2 (Retain 50%)</i>	54
4.5.18	Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 2 (Retain 50%)</i>	55
4.5.19	Uji Total <i>Deformation Leg 3 (Retain 70%)</i>	55
4.5.20	Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 3 (Retain 70%)</i>	56
4.5.21	Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 3 (Retain 70%)</i>	57
4.5.22	Uji Total <i>Deformation Leg 3 (Retain 60%)</i>	57

4.5.23 Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 3</i> (Retain 60%)	58
4.5.24 Uji <i>Equivalent (Von Mises) Stress Leg 3</i> (Retain 60%)	58
4.5.25 Uji <i>Total Deformation Leg 3</i> (Retain 50%)	59
2.5.26 Uji <i>Equivalent Elastic Strain Leg 3</i> (Retain 50%)	60
4.5 Perbandingan Analisis Sebelum dan Sesudah Optimasi	61
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	66
Lampiran 1. Sk Pembimbing	
Lampiran 2. Lembar Asistensi	
Lampiran 3. Berita Acara Seminar Hasil Penelitian	
Lampiran 4. Daftar Riwayat Hidup	
Lampiran 5. Hasil Assembly Kaki Robot Sar 3Dof Setelah Di lakukan Optimasi Dan Perbaikan Desain	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal dan kegiatan saat melakukan penelitian	13
Tabel 4.1 Analisis Perbandingan Sebelum dan Sesudah Optimasi	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Robot Beroda	5
Gambar 2.2 Robot Berkaki	6
Gambar 2.3 Drone Atau Quadcopter	6
Gambar 2.4 <i>Software Ansys</i>	9
Gambar 2.5 Tegangan Tarik	11
Gambar 2.6 Tegangan Tekan	12
Gambar 3.1. <i>Polyethylene Terephthalate</i>	14
Gambar 3.2. Komputer	14
Gambar 3.3. Software Solidworks	15
Gambar 3.4. <i>Software Ansys</i>	15
Gambar 3.5. Diagram alir penelitian	16
Gambar 4.1 Desain leg 1	21
Gambar 4.2 Desain leg 2	21
Gambar 4.3 Desain leg 3	21
Gambar 4.4 Spesifikasi dan Desain leg 3	23
Gambar 4.5 Hasil simulasi Total <i>deformation</i>	24
Gambar 4.6 Hasil Simulasi simulasi kekuatan struktur Leg 1 <i>Equivalent Elastic Strain</i>	25
Gambar 4.7 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 1 <i>Von Mises stress</i>	26
Gambar 4.8 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 2 Total <i>Deformation</i>	27
Gambar 4.9 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 2 Total <i>Equivalent Elastic Strain</i>	28
Gambar 4.10 Hasil simulasi <i>Von Mises stress</i>	29
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Total Deformation Leg 3	30
Gambar 4.12 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 1 <i>Von Mises stress</i>	31
Gambar 4.13 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 3 Total <i>Equivalent Elastic Strain</i>	31
Gambar 4.14 Hasil Topologi Optimasi Desain Leg 1 (a),(b) dan (c)	33
Gambar 4.15 Hasil Topologi optimasi Desain Leg 2 (a),(b) dan (c)	35
Gambar 4.16 Hasil Topologi optimasi Desain Leg 3 (a),(b) dan (c)	37
Gambar 4.17 Hasil Perbaikan Desain Leg 1 (a),(b) dan (c)	39
Gambar 4.18 Hasil Perbaikan Desain Leg 2 (a),(b) dan (c)	41
Gambar 4.19 Hasil Perbaikan Desain Leg 3 (a),(b) dan (c)	42
Gambar 4.20 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 70%)	44
Gambar 4.21 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 70%)	45
Gambar 4.22 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 70%)	45
Gambar 4.23 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 60%)	46
Gambar 4.24 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 60%)	47
Gambar 4.25 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 60%)	47
Gambar 4.26 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 50%)	48
Gambar 4.27 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 50%)	49
Gambar 4.28 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 50%)	49
Gambar 4.29 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 70%)	50

Gambar 4.30 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 70%)	51
Gambar 4.31 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 70%)	51
Gambar 4.32 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 60%)	52
Gambar 4.33 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 60%)	53
Gambar 4.34 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 60%)	53
Gambar 4.35 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 50%)	54
Gambar 4.36 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 50%)	55
Gambar 4.37 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 50%)	55
Gambar 4.38 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 70%)	56
Gambar 4.39 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 70%)	56
Gambar 4.40 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 70%)	57
Gambar 4.41 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 60%)	58
Gambar 4.42 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 60%)	58
Gambar 4.43 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 60%)	59
Gambar 4.44 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 50%)	60
Gambar 4.45 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 50%)	60
Gambar 4.46 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (Retain 50%)	61

DAFTAR NOTASI

P = Gaya atau beban yang bekerja pada suatu benda.

A = Luas penampang benda (m^2)

σ = Tegangan (N/m^2)

ε = Regangan

L = Panjang mula-mula (m)

ΔL = Perubahan panjang

F = Gaya aksial (N)

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi pada akhir-akhir ini semakin meningkatkan kreasi manusia dalam menciptakan peralatan dengan tujuan meningkatkan kualitas hidup. Manusia semakin berupaya membuat perangkat pembantu agar kerja manusia lebih cepat dan ringan. Sebagai contohnya, perancangan dan pembuatan robot yang semakin berkembang seiring tuntutan kebutuhan manusia. (Kusuma et al., 2017) Robot SAR (*Search and Rescue*) memiliki peran penting dalam misi penyelamatan, terutama di daerah yang sulit dijangkau oleh manusia. Desain kaki robot yang efisien dan efektif sangat krusial untuk meningkatkan mobilitas dan kemampuan robot dalam menjalankan tugasnya. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk meningkatkan performa desain kaki robot adalah melalui optimasi topologi. Optimasi topologi memungkinkan perancangan struktur yang lebih ringan dan kuat, sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi dan daya angkut robot (Bendsøe & Kikuchi, 1988a)

Tiga DOF (*Degree of Freedom*) berarti tiga derajat kebebasan dalam konteks robotika, ini mengacu pada sejumlah parameter independen yang menentukan konfigurasi sistem mekanis. Misalnya robot dengan 3 DOF dilengannya dapat bergerak dalam tiga cara berbeda, seperti atas/bawah, kiri/kanan, maju/mundur. Dalam kasus robot berkaki empat. Memiliki 3 dof di setiap kaki memungkinkan gerakan yang lebih kompleks dan alami, berkontribusi terhadap stabilitas dan ketangkasan (Amir et al., 2023)

Topologi optimasi telah terbukti efektif dalam mengurangi bobot struktur sambil mempertahankan kekuatan mekanisnya. Dalam studi yang dilakukan oleh (Sun et al. (2023), metode ini berhasil digunakan untuk mendesain kaki robot *compliant* yang ringan dengan fleksibilitas tinggi dan kinerja gerakan yang optimal. (Sun et al., 2023a) Selain itu, metode ini memungkinkan desain berbasis material ramah lingkungan seperti *Polyethylene Terephthalate* (PET), yang memiliki sifat mekanis

yang baik dan mudah dicetak(Monteiro et al., 2024)

Dalam latar belakang tersebut optimasi terhadap desain kaki robot SAR dengan 3 derajat kebebasan menjadi salah satu topik yang menarik untuk diteliti. Optimasi ini diharapkan menghasilkan desain kaki robot yang ringan dan efisien dengan tetap mempertahankan kekuatan struktur untuk menghadapi beban dinamis selama oprasi SAR.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian sebelumnya (SEMINAR HASIL PENELITIAN ANALISIS NUMERIK LENGAN ROBOT 3-DOF (DEGREE OF FREEDOM) UNTUK KEBUTUHAN ROBOT SAR, n.d.) telah dilakukan desain dan analisis numerik pada kaki robot SAR 3DOF. Namun, desain tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam hal optimasi material dan struktur untuk meningkatkan performa robot dalam operasi pencarian dan penyelamatan (SAR). Material *PET (Polyethylene Terephthalate)* dipilih sebagai alternatif karena sifatnya yang ringan, kuat, dan ramah lingkungan. Namun, belum ada penelitian yang secara khusus mengoptimasi desain kaki robot SAR 3DOF berbahan PET untuk menyeimbangkan antara kekuatan struktural, mobilitas, dan efisiensi energi.

1.3 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup pada penelitian ini adalah riset berfokus pada aspek optimasi desain kaki robot SAR 3DOF (*Degree Of Freedom*) berbahan PET

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin di capai dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Merancang desain kaki robot SAR 3DOF yang optimal dengan memanfaatkan metode *topology optimization*.
2. Menganalisis performa desain kaki robot SAR berbahan PET dari segi kekuatan,bobot dan efisiensi material

3. Untuk melakukan evaluasi hasil optimasi desain kaki robot SAR 3DOF.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Didapatnya sebuah desain kaki robot yang optimal
2. Didapatnya performa kaki robot yang telah dioptimasi
3. Didapatnya evaluasi kaki robot yang telah dioptimalkan

BAB 2 TINJAUAN PUSATAKA

2.1 Kaki Robot SAR

Robot SAR (*Search and Rescue*) merupakan robot yang dirancang untuk membantu operasi penyelamatan di lingkungan yang berbahaya atau sulit dijangkau manusia. Perkembangan teknologi robot SAR semakin pesat, terutama dalam aspek mobilitas dan efisiensi desain kaki robot. Salah satu pendekatan yang digunakan untuk meningkatkan performa kaki robot adalah penggunaan desain berbasis optimasi topologi (Sun et al., 2023b)

Kaki robot merupakan salah satu komponen kunci dalam desain robotik, terutama untuk robot yang dirancang untuk bergerak di medan yang tidak rata atau sulit dijangkau, seperti robot pencarian dan penyelamatan (SAR). Desain kaki robot dapat bervariasi, mulai dari kaki yang menyerupai kaki hewan hingga desain yang lebih mekanis. Kaki robot yang efektif harus mampu menyesuaikan diri dengan berbagai jenis permukaan dan rintangan, serta memberikan stabilitas dan mobilitas yang optimal. (Raibert, 2008)

Derajat kebebasan gerak atau *Degree of Freedom (DOF)* dari sebuah sistem robotik dapat dibandingkan dengan bagaimana tubuh manusia bergerak. Sama halnya dengan manusia, untuk setiap derajat kebebasan gerak pada robot, dibutuhkan sebuah sendi. Secara umum total derajat kebebasan gerak yang dibutuhkan untuk menggerakkan sebuah lengan robot adalah enam buah. Terdapat tiga buah derajat kebebasan gerak yang terletak pada lengan, antara lain yaitu *rotational reverse*, *radial transverse*, dan *vertical transverse*. Terdapat pula tiga buah derajat kebebasan gerak yang terletak pada pergelangan tangan, antara lain yaitu *pitch*, *roll*, dan *yaw*. (Uchrowi et al., 2019)

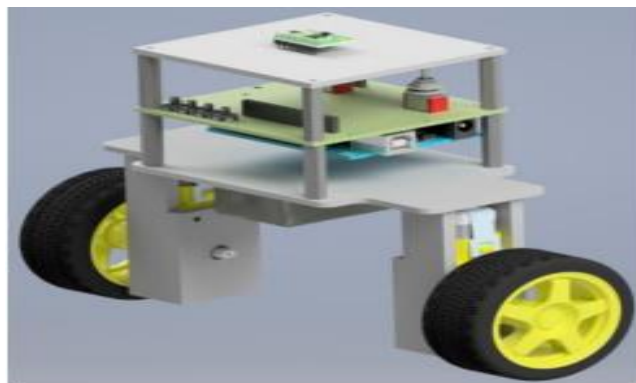
2.2 Jenis Jenis Robot SAR

Robot *Search And Rescue* (SAR) adalah jenis robot yang di rancang khusus untuk membantu dalam operasi pencarian dan penyelamatan di berbagai kondisi ekstrem, seperti bencana alam, kebakaran, runtuh bangunan, atau medan yang sulit di

jangkau oleh manusia. Secara umum, robot SAR dapat dikategorikan menjadi tiga jenis utama, yaitu robot beroda, robot berkaki, dan robot drone. Setiap jenis robot tersebut memiliki keunggulan dan keterbatasannya masing-masing dalam menjalankan misi penyelamatan.

2.3 Robot Beroda

Robot beroda adalah jenis robot yang menggunakan roda sebagai alat gerak utamanya. Robot ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari industry, medis, hingga penelitian. Secara umum, robot beroda memiliki bobot yang relatif ringan, yaitu berkisar antara 5–30 kg, tergantung material dan kelengkapan sensornya. Bobot yang ringan ini memberikan keuntungan dari sisi kecepatan gerak dan efisiensi energi, sehingga sangat sesuai untuk misi pencarian di medan yang relatif datar (*J T I I K Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, n.d.).

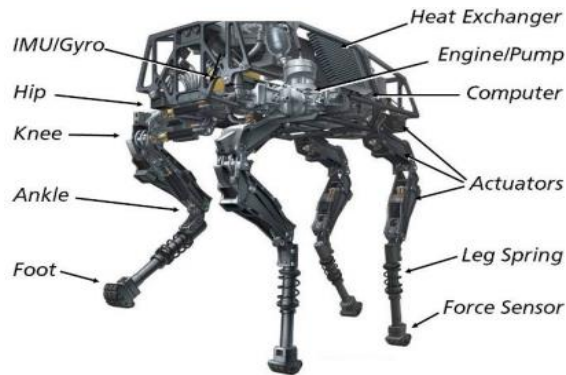


Gambar 2. 1 Robot Beroda(*J T I I K Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, n.d.)

2.4 Robot Berkaki

Robot berkaki adalah jenis robot yang menggunakan kaki sebagai alat gerak utamanya, mirip dengan cara hewan bergerak. Robot ini dirancang untuk meniru gerakan hewan, seperti berjalan, berlari, atau melompat, dan sering digunakan dalam penelitian biomekanik, kebutuhan SAR (*Search and Rescue*), eksplorasi, dan aplikasi militer. Salah satu contoh robot berkaki yang terkenal adalah Cheetah, yang dikembangkan oleh MIT dan mampu berlari dengan kecepatan tinggi. Robot berkaki umumnya memiliki bobot yang lebih berat dibanding robot beroda, yakni sekitar **30–**

70 kg, karena dilengkapi dengan sistem aktuator yang kompleks untuk meniru gerakan kaki hewan. Meskipun bobotnya lebih besar, robot berkaki tetap unggul dalam kemampuan menjelajah medan yang tidak rata atau penuh rintangan (Raibert, 2008)



Gambar 2. 2 Robot Berkaki (Raibert, 2008)

2.5 Robot Drone

Drone atau Quadrotor merupakan salah satu jenis pesawat tanpa awak yang memiliki empat buah rotor sebagai penggerak utamanya. Quadrotor memiliki kelebihan jika dibandingkan pesawat tanpa awak sayap tetap karena dapat melakukan lepas landas secara vertikal. Kemampuan ini biasa dikenal dengan istilah Vertical Take-off and Landing (VTOL)(AL TAHTAWI et al., 2020). Drone merupakan pesawat tanpa awak. Pesawat ini dikendalikan secara otomatis melalui program komputer yang dirancang, atau melalui kendali jarak jauh dari pilot yang terdapat di daratan. drone atau yang lebih dikenal *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) awalnya dikembangkan untuk kebutuhan militer. Perkembangan teknologi membuat drone juga mulai banyak diterapkan untuk kebutuhan sipil, terutama di bidang bisnis, industri, dan logistik. Bobot robot drone bervariasi, mulai dari 1–25 kg, tergantung ukuran dan kapasitas baterai yang digunakan. Drone dengan bobot ringan lebih fleksibel untuk manuver cepat, sementara drone dengan bobot lebih besar mampu membawa beban tambahan seperti kamera termal atau sensor lain yang dibutuhkan dalam operasi SAR.



Gambar 2. 3 Drone Atau Quadcopter(Yuda & Airlangga, 902)

2.6 Polyethylene terephthalate (PET)

PET atau singkatan dari (*Polyethylene terephthalate*) merupakan salah satu jenis poliester yang paling umum digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk kemasan, tekstil, dan produk konsumen. PET memiliki sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap kelembapan, dan stabilitas termal yang tinggi, menjadikannya pilihan yang populer dalam industri (Awaja & Pavel, 2005). Oleh karena itu penelitian terbaru juga mengeksplorasi penggunaan PET dalam aplikasi yang lebih inovatif, seperti dalam bidang medis dan elektronik. Misalnya, PET dapat digunakan dalam pembuatan implan medis dan perangkat elektronik fleksibel.

Pemilihan bahan *Polyethylene Terephthalate* (PET) untuk pembuatan kaki robot SAR (Search and Rescue) didasarkan pada sifat-sifat mekanik dan kimia yang dimiliki oleh PET. PET memiliki kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan terhadap benturan, dan bobot yang relatif ringan, sehingga cocok untuk aplikasi robotik yang membutuhkan mobilitas dan ketahanan dalam kondisi ekstrem. Selain itu, PET juga memiliki ketahanan kimia yang baik terhadap air, minyak, dan bahan kimia lainnya, yang penting untuk operasi SAR di lingkungan yang beragam (Awaja & Pavel, 2005)

Keunggulan dari PET adalah kemampuannya untuk didaur ulang. PET merupakan termoplastik semikristalin dan transparan yang memiliki kekakuan tinggi, kekuatan mekanik, dan ketahanan kimia yang baik. Karena sifat ketahanan mekanik dan kimianya yang sangat baik, PET banyak digunakan untuk membuat botol

minuman ringan dan botol air, serat sintetis, kaset video dan audio, kemasan makanan, Permintaan jumlah PET pada tahun 2016 sebanyak 8.400 kiloton dan diperkirakan akan meningkat 6,9% pada periode 2017- 2025 akibat meningkatnya populasi manusia di dunia Meskipun PET sangat berguna dan berkontribusi pada kehidupan sehari-hari, keberadaan limbah PET di lingkungan sekitar akan menimbulkan masalah serius karena produk akhir yang diperoleh dari PET membutuhkan waktu sekitar 300–450 tahun untuk terurai secara alami (Wahyu Utomo & Susi Arfiana, 2023)

Oleh karenanya penulis memilih filament plastic berbahan PET (*Polyethylene Terephthalate*) untuk bahan dasar pembuatan serta desain kaki robot SAR (*Search and Rescue*).

2.7 SolidWork

SolidWorks merupakan salah satu perangkat lunak CAD yang dikembangkan oleh *DASSAULT SYSTEMES* yang berfungsi untuk mendesain bagian-bagian mesin atau susunan bagian mesin yang berupa perakitan dengan visualisasi 3D untuk menggambarkan komponen sebelum pembuatan bagian fisiknya, serta tampilan 2D (gambar) untuk proses penggambaran mesin.

SolidWorks diperkenalkan pada tahun 1995 sebagai pesaing untuk program CAD seperti *Pro / ENGINEER*, *NX Siemens*, *I-Deas*, *Unigraphics*, *Autodesk Inventor*, *Autodeks AutoCAD* dan *CATIA*, dengan harga yang lebih murah. *SolidWorks Corporation* didirikan pada tahun 1993 oleh *Jon Hirschtick*, dengan merekrut tim insinyur untuk membangun sebuah perusahaan yang mengembangkan perangkat lunak CAD 3D, dengan kantor pusatnya di *Concord, Massachusetts*, dan merilis produk pertama, *SolidWorks 95*, pada tahun 1995. Pada tahun 1997 *Dassault Systèmes*, yang terkenal dengan *CATIA CAD software*, mengakuisisi perusahaan dan sekarang ini memiliki 100% dari saham *SolidWorks*. *SolidWorks* dipimpin oleh *John McEleney* dari tahun 2001 hingga Juli 2007, dan sekarang dipimpin oleh *Jeff Ray*

Seperti aplikasi lainnya, *SolidWorks* juga beroperasi di sistem operasi *Windows*. Antarmuka *Windows* dalam *SolidWorks* terbagi menjadi dua panel utama. Satu panel menampilkan data yang tidak bersifat grafis, sementara panel lainnya menyajikan

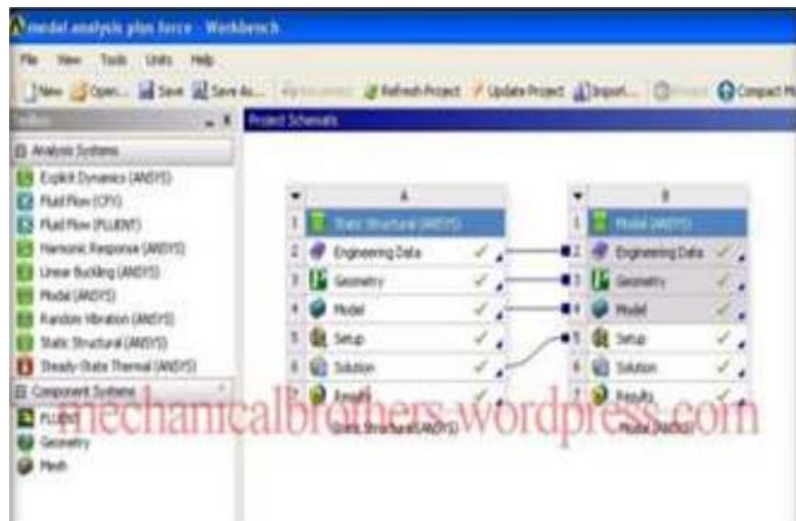
informasi serta representasi dari bagian, perakitan, dan gambar.(PENDAHULUAN MENGENAL SOLIDWORKS, n.d.)

2.8 Ansys

Ansys adalah suatu perangkat lunak komputer khusus Engineering yang mampu menyelesaikan persoalan-persoalan elemen hingga dari pemodelan hingga analisis. *Ansys* ini digunakan untuk mensimulasikan semua disiplin ilmu fisika baik statis maupun dinamis, analisis struktural (keduanya linier dan nonlinier), perpindahan panas, dinamika fluida, dan elektromagnetik untuk para engineer. *ANSYS* dapat mengimpor data CAD dan juga memungkinkan untuk membangun geometri dengan kemampuan yang "*preprocessing*". Setelah mendefinisikan beban dan melakukan analisis, hasil dapat dilihat sebagai numerik dan grafis. Hasil yang diperoleh dari *ANSYS* ini berupa pendekatan dengan menggunakan analisa-numerik. Tahapan Ini merupakan panduan umum yang dapat digunakan untuk menghitung analisis elemen hingga (Harahap, 2020)

Ansys Workbench adalah salah satu perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang dipakai untuk menganalisa masalah-masalah rekayasa (*engineering*). *Ansys Workbench* menyediakan fasilitas untuk berinteraksi antar *solvers family Ansys*. *Ansys Workbench* juga dapat berintegrasi dengan perangkat lunak CAD sehingga memudahkan pengguna dalam membangun model geometri dengan berbagai perangkat lunak CAD. Sependek pengetahuan saya, beberapa perangkat lunak tersebut adalah *Catia* dan *Solidwork*. *Ansys* dapat berjalan di platform *Windows* dan *Linux*(Darianto et al., 2019)

Ansys Workbench berisi beberapa fasilitas, diantaranya: *Mechanical, Fluid Flow, Engineering Data, Design Modeler, Meshing Application, BladeGen*. Bentuk tampilan software ini diperlihatkan pada gambar



Gambar 2. 4 *Software Ansys* (Darianto et al., 2019)

2.9 Topologi optimasi

Topologi optimasi adalah metode komputasi canggih yang digunakan untuk menentukan distribusi material yang optimal dalam suatu ruang desain, dengan mempertimbangkan beban, batasan, dan tujuan tertentu. Metode ini bertujuan untuk meminimalkan atau memaksimalkan fungsi objektif (seperti kekakuan, berat, atau frekuensi resonansi) dengan mengatur distribusi material dalam domain desain. Topologi optimasi banyak digunakan dalam bidang teknik, seperti *aerospace*, *otomotif*, dan *biomekanik*, untuk menghasilkan desain yang ringan, kuat, dan efisien. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh (Bendsøe & Kikuchi, 1988b) dalam konteks optimasi struktur homogen. Mereka mengembangkan pendekatan matematis untuk menentukan distribusi material yang optimal.

Topologi optimasi telah digunakan secara luas dalam desain komponen robot, termasuk kaki robot. Kaki robot 3 DOF (*Degree of Freedom*) memerlukan desain yang optimal untuk memastikan mobilitas, stabilitas, dan kekuatan. Material seperti PET (*Polyethylene Terephthalate*) dipilih karena sifatnya yang ringan, tahan korosi, dan mudah diproduksi (Huang & Xie, 2007).

Material PET memiliki sifat mekanik yang cocok untuk aplikasi robotik, termasuk kekakuan, ketahanan terhadap beban dinamis, dan kemudahan produksi menggunakan teknologi manufaktur aditif. Penelitian oleh (Allaire et al., 2004) menunjukkan bahwa integrasi material PET dengan topologi optimasi dapat menghasilkan desain yang optimal untuk komponen struktural seperti kaki robot. Selain itu, penggunaan PET juga mengurangi berat keseluruhan robot, yang sangat penting untuk aplikasi SAR di medan yang sulit.

Topologi optimasi merupakan metode yang sangat efektif untuk merancang kaki robot SAR 3 DOF berbahan PET, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti berat, kekuatan, dan kemudahan produksi.

3.0 Tegangan

Ketika beberapa sistem gaya atau beban eksternal bekerja pada suatu benda, gaya internal (sama dan berlawanan) dipasang di berbagai bagian benda, yang menahan gaya eksternal. Gaya internal per satuan luas pada setiap bagian tubuh ini dikenal sebagai tegangan. Ini dilambangkan dengan huruf Yunani sigma (σ). Secara matematis (Dan Regangan Pada Batang, n.d.)

$$\text{Tegangan, } \sigma = \frac{P}{A}$$

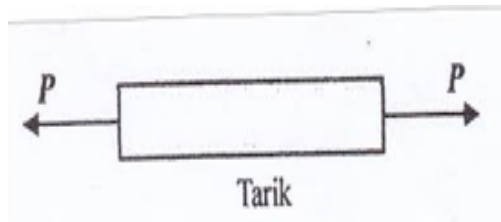
dimana P = Gaya atau beban yang bekerja pada suatu benda.

A = Luas penampang benda.

σ = Tegangan (N/m^2)

1. Tegangan Tarik

Gaya Tarik terjadi pada batang, apabila terdapat gaya aksial menarik suatu batang dan akibatnya batang akan cenderung menjadi meregang dan bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal pada sumbunya.



Gambar 2.5 Tegangan Tarik

2. Tegangan Tekan

Apabila terdapat sepasang gaya tekan aksial mendorong suatu bidang, akibatnya bidang tersebut akan cenderung memendek. Maka gaya tekan aksial tersebut menghasilkan tegangan tekan pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal pada sumbunya.

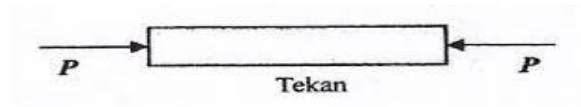
Tegangan normal yang bekerja diasumsikan mempunyai distribusi terbagi rata diseluruh permukaan penampang dan garis kerja gaya aksial melalui pusat berat penampang melintang batang. Sehingga diperoleh rumus

$$\sigma = F / A$$

Dimana : σ = Tegangan (N/m^2)

F = Gaya aksial (N)

A = Luas (m^2)



Gambar 2.6 Tegangan Tekan.

3.1 Regangan

Regangan merupakan perubahan bentuk persatuan panjang pada suatu batang. Misalnya pada suatu batang yang sebagai penopang yang diberikan beban aksial, akibatnya batang tersebut akan tertekan atau memendek, maka (Ramadhana, 2024).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Dimana : ε = Regangan

L = Panjang mula-mula (m)

ΔL = Perubahan panjang

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan waktu

3.1.1 Tempat penelitian

Tempat dan pembuatan penelitian ini dilakukan di laboratorium Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan.

3.1.2. Waktu penelitian

Waktu Penerapan tugas akhir ini direncanakan selama 6 bulan dari disetujuinya penulisan proposal tugas akhir, proses mendesain kaki robot, proses optimasi kaki robot, seminar proposal, seminar hasil sampai sidang akhir yang menghabiskan waktu kurang lebih 6 bulan.

Tabel 3.1 Jadwal dan kegiatan saat melakukan penelitian

No	Kegiatan	Waktu(Bulan)					
		1	2	3	4	5	6
1	Studi literature						
2	Penyediaan alat dan bahan						
3	Penulisan proposal						
4	Pengujian Simulasi						
5	Pengambilan data						
6	Analisa data						
7	Penulisan laporan akhir						
8	Sidang sarjana						

3.2 Bahan dan alat penelitian

3.2.1 Bahan yang di gunakan

1. *Polyethylene Terephthalate* (PET)

Material yang digunakan pada penelitian ini filament plastic berbahan *Polyethylene Terephthalate* (PET). PET adalah salah satu bahan yang paling umum digunakan dalam pencetakan 3D. Digunakan untuk komponen mekanik, casing elektronik, dan barang-barang yang memerlukan kekuatan tinggi. Adapun bahan pembuatan dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

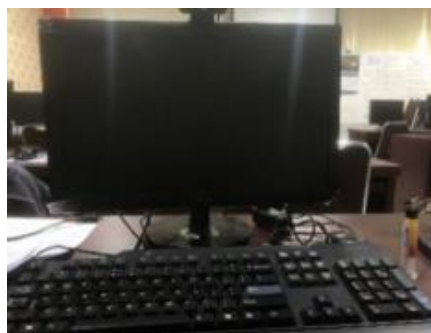


Gambar 3.1. *Polyethylene Terephthalate*

3.2.2. Alat penelitian

1. Komputer

Dalam studi ini, perangkat komputer berperan sebagai sarana untuk melakukan tugas dan memproses kata-kata atau informasi, seperti pada gambar 3.2



Gamabar 3.2. Komputer

2. *Software Solidworks*

Dalam studi ini, perangkat lunak *SolidWorks* digunakan untuk merancang model 3D dari penelitian, seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Software Solidworks

3. *Software Ansys*

Dalam studi ini, perangkat lunak Ansys digunakan untuk menganalisis model tiga dimensi dari penelitian serta data yang dihasilkan dari riset, seperti pada gambar 3.4

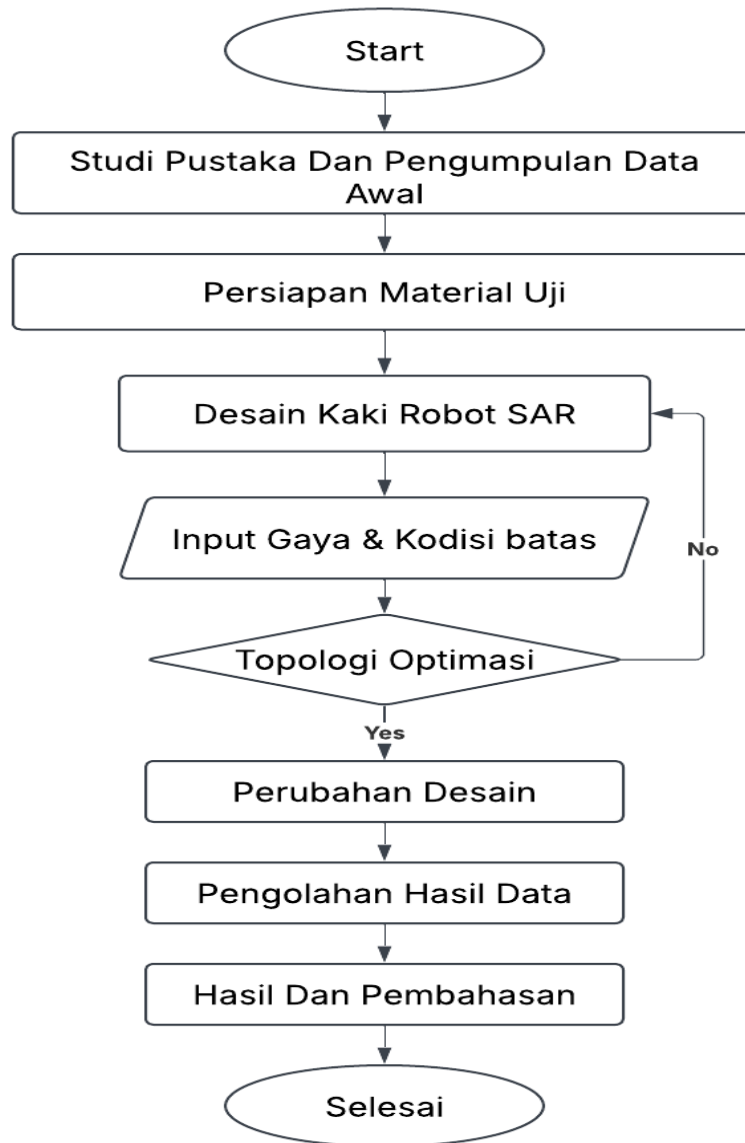


Gambar 3.4. Software Ansys

Penelitian ini dilakukan pada area pusat kota medan yaitu UMSU selama 6 bulan dimulai dari bulan Januari 2025 sampai JUNI 2025.

3.2.3 Diagram alir

Penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan literatur yaitu metode, analisis dan pemelihan bahan, yang selanjutnya disusun menjadi prosedur penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5. Diagram alir penelitian

3.4 Rancangan Penelitian

Desain kaki robot 3 DOF berbahan PET yang diteliti dalam studi ini didasarkan pada perhitungan teoretis awal dan memiliki ukuran yang sesuai dengan variabel yang diinginkan. Perhitungan ini dapat dijelaskan dengan informasi asumsi yang sudah dipilih dan ditentukan. Untuk hasil optimasi awal kaki robot, dilakukan secara manual dan dengan bantuan program yang dibuat untuk optimasi desain dan hasil penelitian

3.5 Prosedur penelitian

3.5.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan teknik pengumpulan informasi dengan melakukan serangkaian aktivitas seperti membaca, mencatat, dan memproses data untuk memperdalam materi mengenai topik yang akan dibahas. Pada tahap ini, aktivitas yang dilakukan adalah mencari jurnal, skripsi, dan juga buku-buku yang relevan dengan penelitian ini sebagai acuan dan dasar pelaksanaan penelitian ini.

3.5.2 Persiapan Material Uji

Pemilihan material uji yang digunakan adalah PET atau singkatan dari (polyethylene terephthalate). Keunggulan dari PET adalah kemampuannya untuk didaur ulang. PET merupakan termoplastik semikristalin dan transparan yang memiliki kekuatan tinggi, kekuatan mekanik, dan ketahanan kimia yang baik.

3.5.3 Mendesain Kaki Robot

Pada tahap desain pengembang memverifikasi media pembelajaran dan metode pengujian yang tepat. Langkah yang harus ditempuh dalam mendesain yaitu (1) menyusun kebutuhan yang diperlukan; (2) menyusun desain yang tepat dan sesuai dengan tujuan; (3) membuat instrumen.

3.5.4 Simulasi Optimasi Desain Kaki Robot

Simulasi *topology optimization* dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti ANSYS. Proses optimasi dimulai dengan mendefinisikan batasan desain, seperti

beban maksimum, volume material yang diizinkan, dan faktor keamanan. Algoritma optimasi kemudian mengidentifikasi distribusi material yang optimal untuk meminimalkan berat sambil memenuhi persyaratan kekuatan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain kaki robot 3DOF berbahan *PET* yang dioptimasi menggunakan *topology optimization* mampu mengurangi berat hingga 30% dibandingkan dengan desain konvensional, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang diperlukan. Distribusi tegangan yang merata dan deformasi minimal menunjukkan bahwa desain ini memenuhi kriteria keamanan dan kinerja

3.5.5 Validasi Hasil Simulasi

Validasi hasil simulasi dilakukan melalui eksperimen fisik dan analisis lebih lanjut menggunakan metode seperti Finite Element Analysis (FEA). Hasil validasi menunjukkan kesesuaian yang tinggi antara simulasi dan eksperimen, dengan margin error kurang dari 5%. Hal ini membuktikan keakuratan metode *topology optimization* dalam menghasilkan desain yang optimal

3.6 Variabel Yang Akan Diteliti

Adapun variabel pada penelitian ini terdiri dari 2 bagian, yaitu:

3.6.1 Variabel *Independent*

Variabel *Independent* adalah variabel yang memengaruhi variabel lainnya dan tidak bergantung pada variabel lainnya. Variabel *Independent* dalam penelitian ini adalah geometri awal desain kaki robot, sifat mekanik material PET, parameter beban dan gaya yang bekerja pada struktur, serta batasan desain seperti volume material maksimum dan displacement yang diizinkan.

3.6.2 Variabel *Dependent*

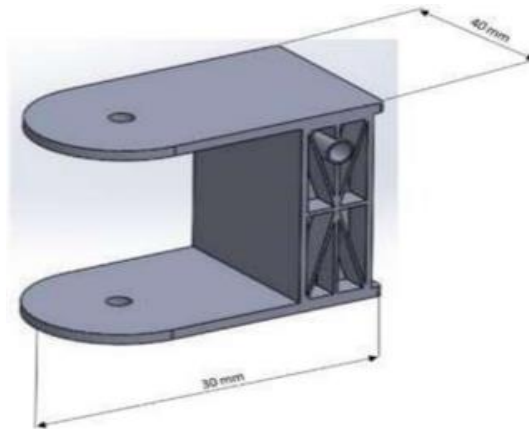
Variabel *Dependent* adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat. Mengingat penelitian ini dilakukan untuk menguji desain kaki Robot, variabel *Dependent* dalam penelitian ini mencakup massa desain akhir dengan percent to retain 70%,60% dan 50%, distribusi stres dan strain, displacement, frekuensi natural, efisiensi material, dan kinerja mekanis

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

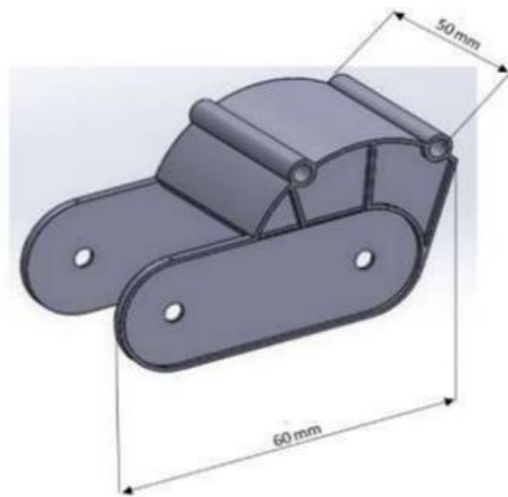
Berdasarkan tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendesain dan menganalisis struktur kaki robot SAR dengan tiga derajat kebebasan (3 *DOF*) yang menggunakan bahan PET (*Polyethylene Terephthalate*). Tujuan utama optimasi ini adalah mengurangi massa material dengan tetap mempertahankan kekuatan struktural sesuai beban kerja yang dihadapi di lapangan bencana.

4.1 Hasil desain lengan robot 3-DOF

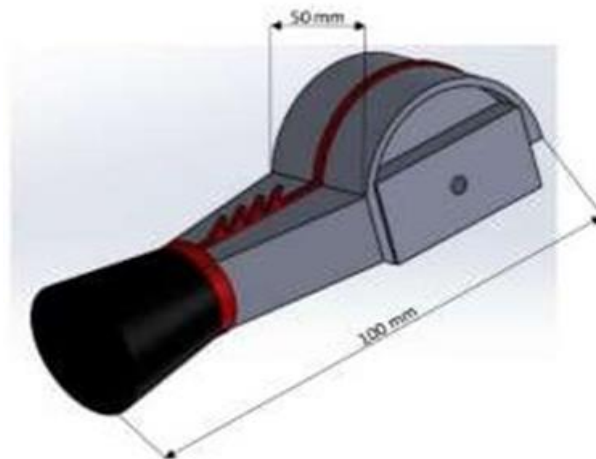
Dalam desain perancangan robot SAR dengan mekanisme berkaki. Robot SAR memiliki enam kaki dengan masing-masing memiliki tiga sendi pada masing-masing kaki. Kedua sendi pada masing-masing kaki memungkinkan robot untuk melakukan banyak manuver gerak. Sehingga robot dapat berjalan, memanjat, berbelok, memutar, dan sebagainya. Tiap-tiap sendi robot memiliki derajat perputaran sebesar 0° - 180° , hal ini dikarenakan untuk pergerakan sendi-sendi tersebut digunakan motorservo yang memiliki kemampuan putar hingga 180° . Adapun Desain lengan robot SAR sebelum dilakukannya topologi optimasi dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4,1 Desain leg 1



Gambar 4.2 Desain leg 2



Gambar 4.3 Desain leg 3

Lengan Robot ini menggunakan bahan material yang terbuat dari PET (*Polietilena tereftalat*). Berdasarkan hasil analisis menggunakan perangkat lunak CAD (*SolidWorks*), lengan robot ini memiliki massa total sebesar 2026,46 gram atau sekitar 2,02 kg. Bobot tersebut sudah termasuk material PET, Pada kaki atas (*leg 1*) memiliki dimensi $60,4 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, pada kaki bawah (*leg 2*) memiliki dimensi $63 \text{ mm} \times 17 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, Leg 3 berukuran $50 \times 15 \times 5 \text{ mm}$ Sistem penggerak pada lengan robot yang dimana pada leg 1 diwakili satu servo dan pada leg 2 diwakili satu servo, leg 3 diwakili satu servo.

Mass properties of Assem1
Configuration: Default
Coordinate system: -- default --

Mass = 2052.46 grams

Volume = 1445392.54 cubic millimeters

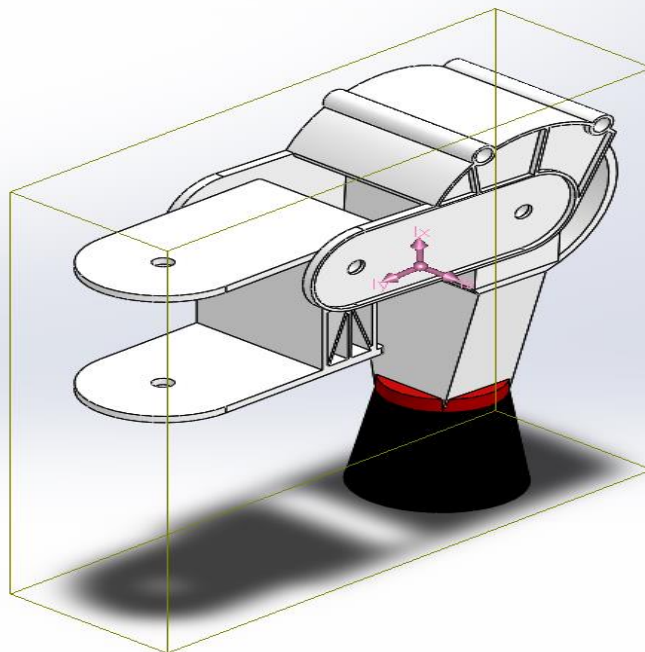
Surface area = 250704.43 square millimeters

Center of mass: (millimeters)
X = -26.62
Y = -7.62
Z = -125.97

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeter)
Taken at the center of mass.
I_x = (0.00, 1.00, 0.05) P_x = 6306593.92
I_y = (0.00, -0.05, 1.00) P_y = 14494913.05
I_z = (1.00, 0.00, 0.00) P_z = 19014085.39

Moments of inertia: (grams * square millimeters)
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.
L_{xx} = 19014085.39 L_{xy} = 0.00 L_{xz} = 0.00
L_{yx} = 0.00 L_{yy} = 6324803.46 L_{yz} = 385712.24
L_{zx} = 0.00 L_{zy} = 385712.24 L_{zz} = 14476703.5

Moments of inertia: (grams * square millimeters)
Taken at the output coordinate system.
I_{xx} = 51700711.08 I_{xy} = 416466.53 I_{xz} = 6882134.65
I_{yx} = 416466.53 I_{yy} = 40346501.18 I_{yz} = 2356498.69
I_{zx} = 6882134.65 I_{zy} = 2356498.69 I_{zz} = 16050296.4



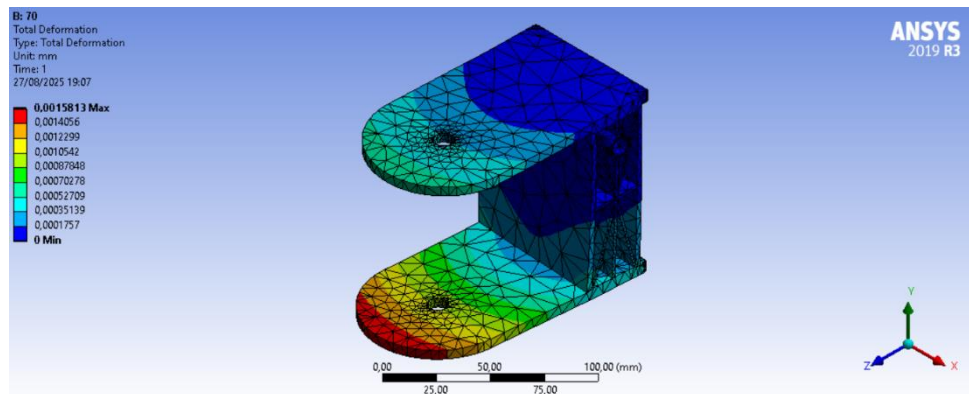
Gambar 4.4 Spesifikasi dan Desain leg 3

4.2 Analisis Hasil Pengujian Simulasi Menggunakan Ansys Leg 1, Leg 2, Leg 3

Hasil simulasi pada Lengan Robot 3-DOF dengan 3 Output dapat dilihat dalam pengujian dibawah ini.

4.2.1 Uji Total *Deformation* Leg 1

Dari hasil simulasi total *deformation* ditunjukkan pada gambar 4.5 Pada Gambar tersebut dilihat dengan pembebanan torsi 1 N untuk material tersebut dan arah gaya yang mengarah ke sumbu z, dapat diketahui hasil *deformation* maksimum terjadi pada bagian depan sebesar 0,0015813 mm, sedangkan *deformation* minimum terjadi pada kaki depan sebesar 0 mm. Maka Hasil simulasi untuk *deformasi* yang terjadi pada Material sistem penggerak dapat dilihat jelas pada Gambar (b) bahwa *deformation* paling tinggi terjadi pada Material penggerak lebih tepatnya pada permukaan atau face part penggerak tersebut, dengan menandakan titik-titik yang lebih banyak menerima beban atau tegangan. Hal ini dikarenakan part penggerak tersebut hanya bekerja sendirian atau bisa dikatakan sebagai satu – satunya penggerak yang ada.



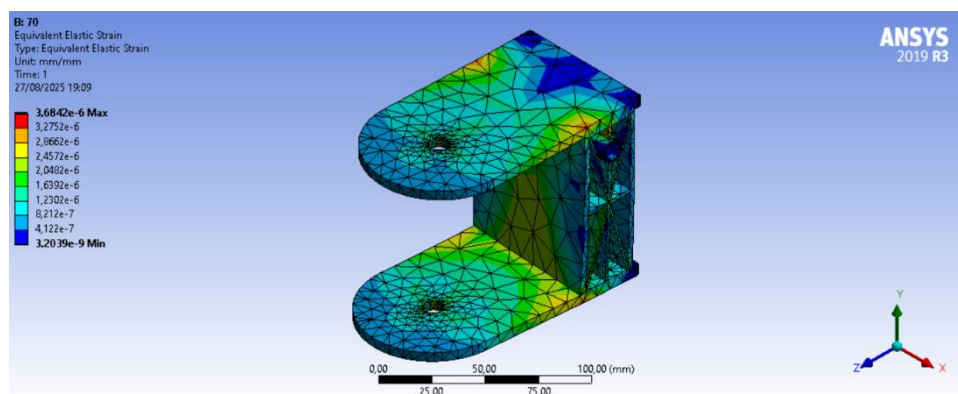
Gambar 4.5 Hasil simulasi Total *deformation*

4.2.2 Uji *Equivalent Elastic Strain*

Dari Dari hasil simulasi pada model yang dibangun diketahui bahwa regangan maksimum berada pada area sekitar lubang atau titik penumpuan komponen

sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6 Pada simulasi ini gaya yang diberikan sebesar 1 N dengan arah gaya menuju sumbu tertentu sesuai pembebanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai regangan tertinggi terkonsentrasi pada bagian sekitar lubang, yang ditandai dengan warna merah pada gambar hasil analisis. Nilai regangan maksimum yang dihasilkan dalam simulasi adalah sebesar 3,6842 mm sedangkan regangan minimum bernilai 3,2039 mm yang ditandai dengan warna biru.

Distribusi warna pada model memperlihatkan bahwa sebagian besar area komponen berada pada kondisi regangan yang rendah (ditunjukkan dengan warna biru hingga hijau), yang berarti daerah tersebut tidak mengalami perubahan bentuk yang signifikan. Sementara itu, konsentrasi regangan hanya terjadi di sekitar lubang penumpuan akibat adanya konsentrasi tegangan pada titik tersebut. Dengan demikian, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa desain masih berada dalam batas aman karena nilai regangan maksimum relatif kecil dibandingkan batas regangan ijin material PET.



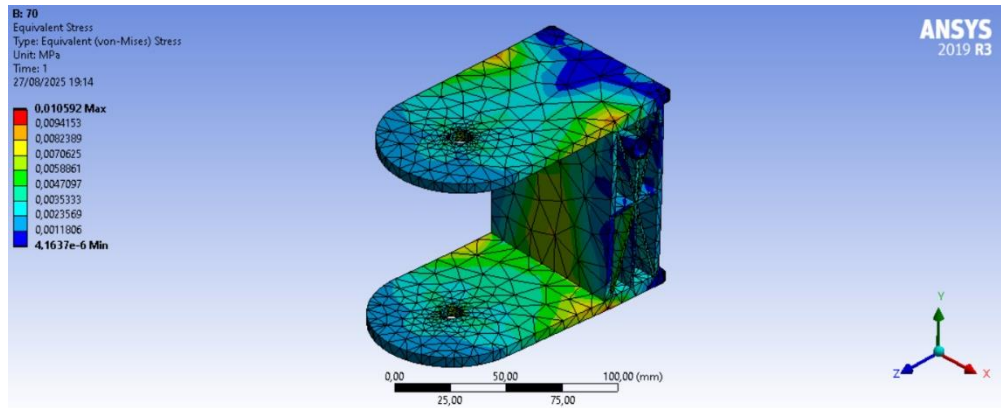
Gambar 4.6 Hasil Simulasi simulasi kekuatan struktur Leg 1 *Equivalent Elastic Strain*

4.2.3 Uji von mises stress

Dari hasil simulasi pada model yang dibangun diketahui bahwa tegangan maksimum berada pada area sekitar lubang atau titik penumpuan komponen sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada simulasi ini gaya pembebanan diberikan sebesar 1 N dengan arah tertentu sesuai skenario pengujian. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan tertinggi terkonsentrasi pada bagian sekitar lubang,

yang ditandai dengan warna merah pada hasil analisis. Nilai tegangan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 1,0592 MPa, sedangkan tegangan minimum bernilai 4,1637 MPa yang ditunjukkan dengan warna biru.

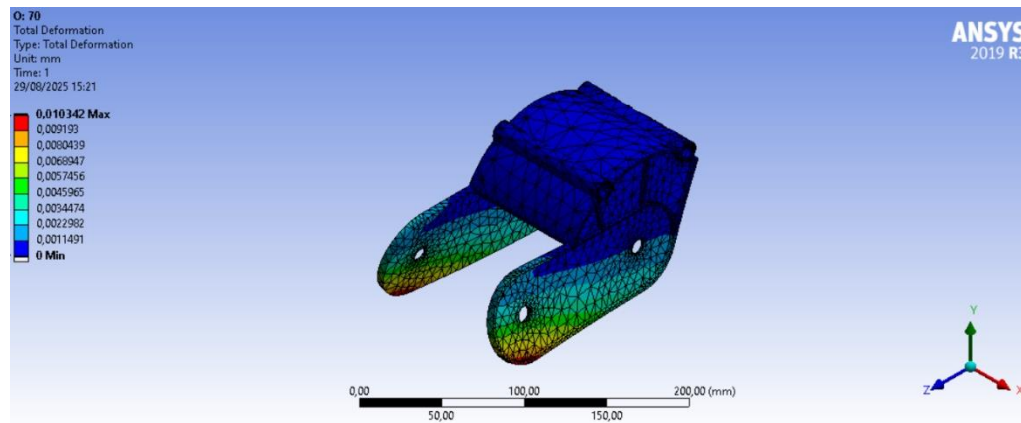
Distribusi warna dari hasil simulasi memperlihatkan bahwa sebagian besar area komponen berada pada tingkat tegangan rendah (biru hingga hijau), yang berarti tegangan yang bekerja pada daerah tersebut relatif kecil dan tidak menyebabkan deformasi berlebih. Sementara itu, konsentrasi tegangan hanya terjadi pada bagian lubang atau titik penumpuan akibat adanya konsentrasi gaya di daerah tersebut.



Gambar 4.7 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 1 *Von Mises stress*

4.2.4 Uji Total *Deformation Leg 2*

Hasil uji statis yang diperoleh dari simulasi kekuatan struktur menggunakan program Ansys 2019 R3 terlihat pada Gambar 4.8 *Workbench* adalah berupa respon dari specimen dalam bentuk tegangan, regangan dan Total *Deformation*. Kemudian perubahan yang dialami komponen adalah perubahan bentuk spesimen saat dikenai gaya.



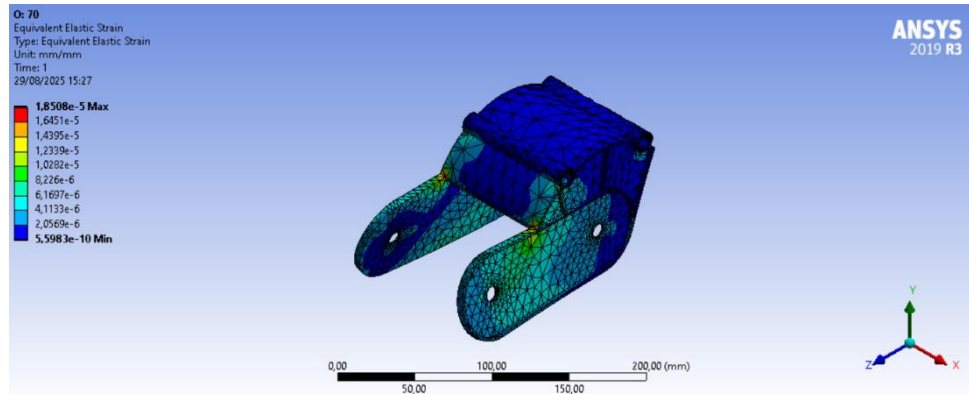
Gambar 4.8 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 2 Total *Deformation*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa Leg 2 pada komponen mengalami perubahan bentuk yang sangat kecil, dengan nilai deformasi maksimum sebesar 0,010342 mm dan nilai minimum 0 mm. Dengan pembebanan gaya statis sebesar 1 N pada arah tertentu, beban diterapkan pada area penumpuan/lubang komponen sehingga menghasilkan deformasi yang terdistribusi pada bagian kaki bawah. Distribusi warna pada hasil simulasi menunjukkan bahwa sebagian besar area komponen ditandai dengan warna biru tua, yang berarti mengalami deformasi mendekati 0 mm atau sangat rendah. Warna hijau hingga merah terlihat hanya pada bagian ujung kaki dengan lubang, yang mengindikasikan adanya konsentrasi deformasi pada titik penumpuan. Secara keseluruhan, nilai deformasi total yang terjadi masih berada dalam batas aman, sehingga komponen dapat dikatakan relatif kaku dan tidak mengalami perubahan bentuk signifikan di bawah beban yang diberikan. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa desain masih dapat diandalkan, meskipun terdapat area tertentu yang mengalami deformasi lebih tinggi dan mungkin menjadi fokus perbaikan pada pengembangan desain berikutnya.

4.2.5 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 2

Hasil simulasi kekuatan struktur menggunakan program Ansys 2019 R3 terlihat pada Gambar 4.9 *Workbench* adalah berupa respon dari specimen dalam bentuk tegangan, regangan dan *Von Mises Stress* dan kondisi batas pada simulasi

sudah ditetapkan maka langkah selanjutnya adalah melakukan running simulasi menggunakan *software* Ansys Workbench 2019 R3. Gambar 4.8 merupakan hasil simulasi kekuatan struktur yang didapatkan, hasil yang didapatkan sebagai berikut



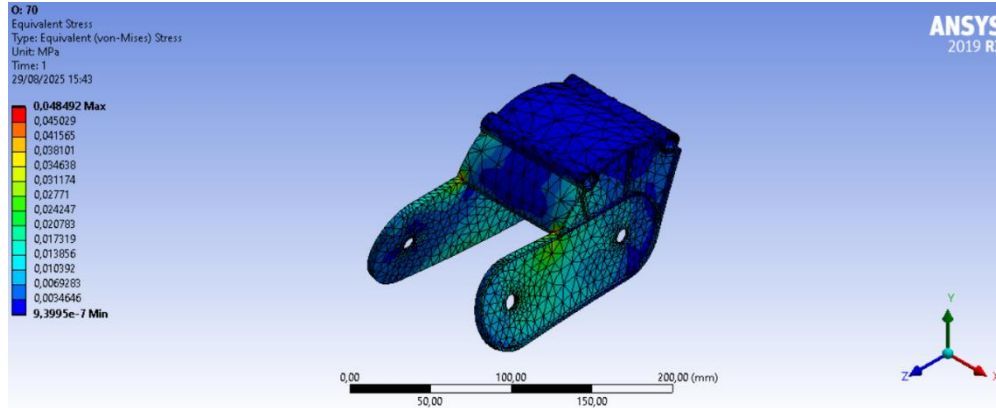
Gambar 4.9 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 2 Total *Equivalent Elastic Strain*

Hasil simulasi pada Gambar 4.9 menunjukkan distribusi regangan elastis ekuivalen (*Equivalent Elastic Strain*) pada komponen kaki robot ketika dikenai gaya sebesar 0,1 N yang bekerja ke arah sumbu Y. Dari hasil analisis diperoleh nilai regangan maksimum sebesar 1,8508 mm, sedangkan nilai minimumnya mencapai 5,5983 mm. Distribusi regangan yang terjadi ditampilkan melalui peta kontur dengan variasi warna, di mana warna merah hingga kuning menunjukkan area dengan konsentrasi regangan tertinggi, sedangkan warna biru menandakan area dengan regangan paling rendah. Pada hasil simulasi terlihat bahwa regangan tertinggi terkonsentrasi di sekitar lubang penghubung dan pertemuan antar bagian yang menjadi titik tumpuan beban, sementara bagian lain dari komponen mengalami regangan yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa daerah tersebut merupakan titik kritis yang perlu diperhatikan dalam evaluasi kekuatan dan keandalan desain.

4.2.6 Uji *Von Mises Stress* Leg 2

Hasil simulasi pada Gambar 4.10 menunjukkan distribusi pada komponen kaki robot saat diberi gaya sebesar 1 N ke arah sumbu Y. Dari analisis diperoleh nilai tegangan maksimum sebesar 0,048492 MPa, sedangkan nilai minimum tercatat 9,3995

MPa. Variasi distribusi tegangan ditampilkan melalui peta kontur warna, di mana warna merah hingga kuning menandakan daerah dengan konsentrasi tegangan tertinggi, sementara warna biru menunjukkan daerah dengan tegangan rendah.



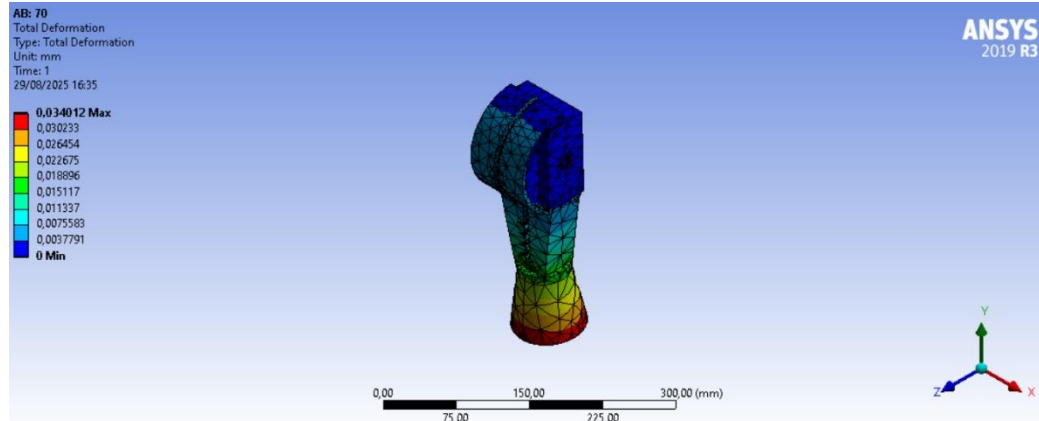
Gambar 4.10 Hasil simulasi *Von Mises stress*

Berdasarkan hasil simulasi, tegangan maksimum terkonsentrasi pada area lubang penghubung dan bagian sekitar sambungan, yang merupakan titik kritis akibat konsentrasi gaya. Sementara itu, bagian lain dari komponen menunjukkan tegangan yang relatif kecil dan merata. Nilai *von-Mises stress* yang dihasilkan masih jauh di bawah batas luluh material PET, sehingga komponen dapat dikategorikan aman terhadap kegagalan plastis pada kondisi pembebanan 1 N.

4.2.7 Uji Total *Deformation Leg 3*

Hasil analisis total *deformation* ditunjukkan pada Gambar 4.11 Pada simulasi ini diberikan beban sebesar 1 N pada arah sumbu tertentu sesuai dengan skenario pembebanan. Dari hasil simulasi diperoleh nilai deformasi maksimum sebesar 0,034012 mm, sedangkan nilai minimum adalah 0 mm. Distribusi deformasi dapat diamati melalui kontur warna pada model. Area dengan deformasi tertinggi ditandai dengan warna merah, yang berada pada bagian bawah komponen, sedangkan bagian atas ditunjukkan dengan warna biru yang menandakan deformasi sangat kecil hingga nol. Hal ini sesuai dengan kondisi batas dimana bagian atas komponen diberikan *fixed support*, sehingga tidak mengalami perpindahan. Nilai deformasi yang dihasilkan masih tergolong sangat kecil dibandingkan dengan ukuran geometrinya, yaitu hanya

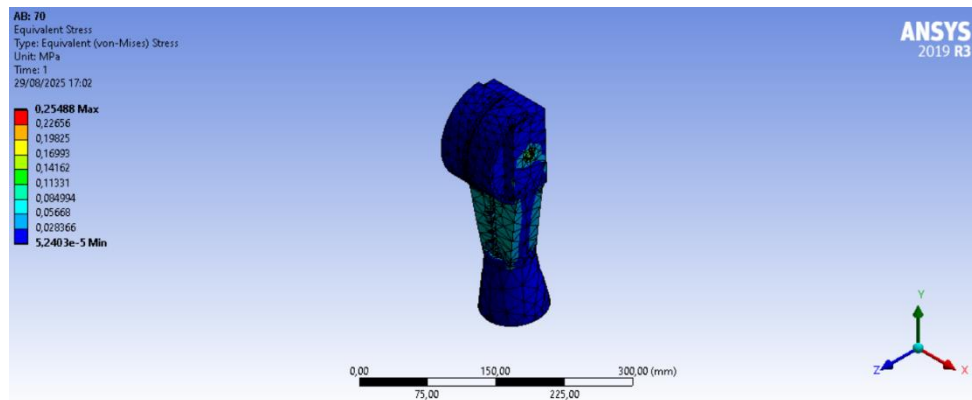
0,034 mm. Dengan demikian, material PET yang digunakan masih mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi berlebih yang dapat merusak struktur kaki robot SAR 3 DOF.



Gambar 4.11 Hasil Simulasi Total Deformation Leg 3

4.2.8 Uji Von Mises Stressi Leg 3

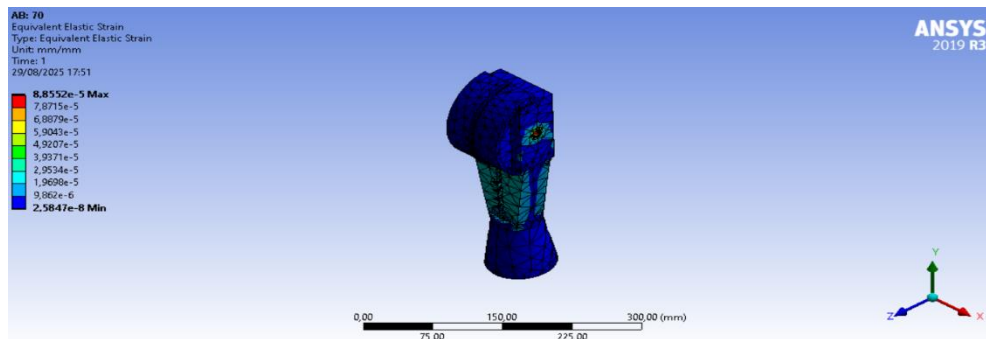
Hasil simulasi analisis tegangan setara (*Equivalent Stress* / von Mises Stress) ditunjukkan pada Gambar 4.12. Dari hasil perhitungan numerik dengan pembebanan sebesar 1 N, diperoleh nilai tegangan maksimum sebesar 0,25488 MPa, sedangkan nilai minimum sebesar 5,2403 MPa. Distribusi tegangan dapat diamati dari sebaran kontur warna pada model. Area dengan warna merah menunjukkan konsentrasi tegangan tertinggi (0,25488 MPa), sedangkan bagian yang berwarna biru menunjukkan tegangan yang sangat rendah mendekati nol. Dari hasil simulasi terlihat bahwa konsentrasi tegangan terbesar terjadi pada bagian sambungan/geometri dengan perubahan bentuk yang signifikan, sedangkan bagian lain yang relatif jauh dari titik pembebanan cenderung menerima tegangan yang lebih kecil. Jika dibandingkan dengan kekuatan tarik material PET PET (sekitar 55–75 MPa), nilai tegangan maksimum sebesar 0,25488 MPa masih jauh berada di bawah batas kekuatan material. Hal ini menunjukkan bahwa desain kaki robot SAR 3 DOF masih aman menahan beban yang diberikan tanpa mengalami kegagalan material.



Gambar 4.12 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 1 *Von Mises stress*

4.2.9 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 3

Hasil simulasi kekuatan struktur menggunakan program Ansys 2019 R3 terlihat pada Gambar 4.13 *Workbench* adalah berupa respon dari specimen dalam bentuk tegangan, regangan dan *Von Mises Stress* dan kondisi batas pada simulasi sudah ditetapkan maka langkah selanjutnya adalah melakukan running simulasi menggunakan software Ansys *Workbench* 2019 R3. Gambar 4.12 merupakan hasil simulasi kekuatan struktur yang didapatkan, hasil yang didapatkan sebagai berikut



Gambar 4.13 Hasil simulasi kekuatan struktur Leg 3 Total *Equivalent Elastic Strain*

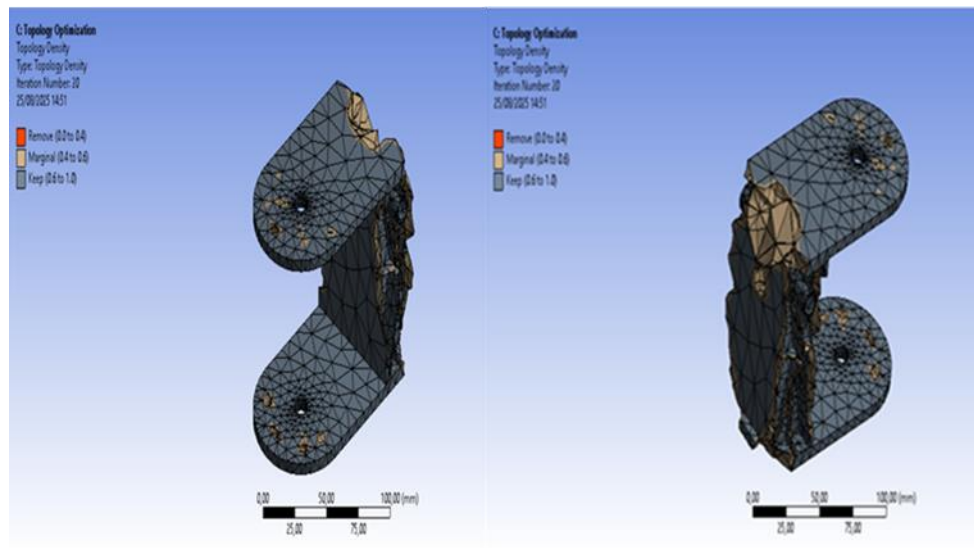
Hasil simulasi pada Gambar 4.12 menunjukkan distribusi regangan elastis ekuivalen (*Equivalent Elastic Strain*) pada komponen kaki robot ketika dikenai gaya sebesar 0,1 N yang bekerja ke arah sumbu Y. Dari hasil analisis diperoleh nilai regangan maksimum sebesar 8,8552 mm, sedangkan nilai minimumnya mencapai 2,5847 mm. Distribusi regangan yang terjadi ditampilkan melalui peta kontur dengan

variasi warna, di mana warna merah hingga kuning menunjukkan area dengan konsentrasi regangan tertinggi, sedangkan warna biru menandakan area dengan regangan paling rendah. Pada hasil simulasi terlihat bahwa regangan tertinggi terkonsentrasi di sekitar lubang penghubung dan pertemuan antar bagian yang menjadi titik tumpuan beban, sementara bagian lain dari komponen mengalami regangan yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa daerah tersebut merupakan titik kritis yang perlu diperhatikan dalam evaluasi kekuatan dan keandalan desain.

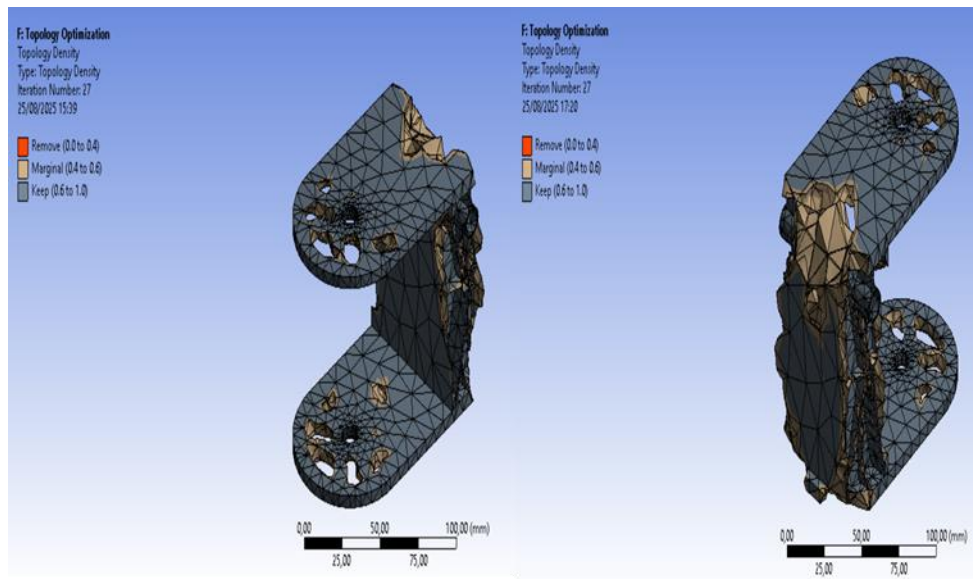
4.3 Hasil Optimasi Dan Simulasi Struktural Menggunakan *Ansys Leg 1, Leg 2, dan Leg 3*

Hasil optimasi pada lengan robot 3 DOF dapat dilihat dalam pengujian di bawah ini:

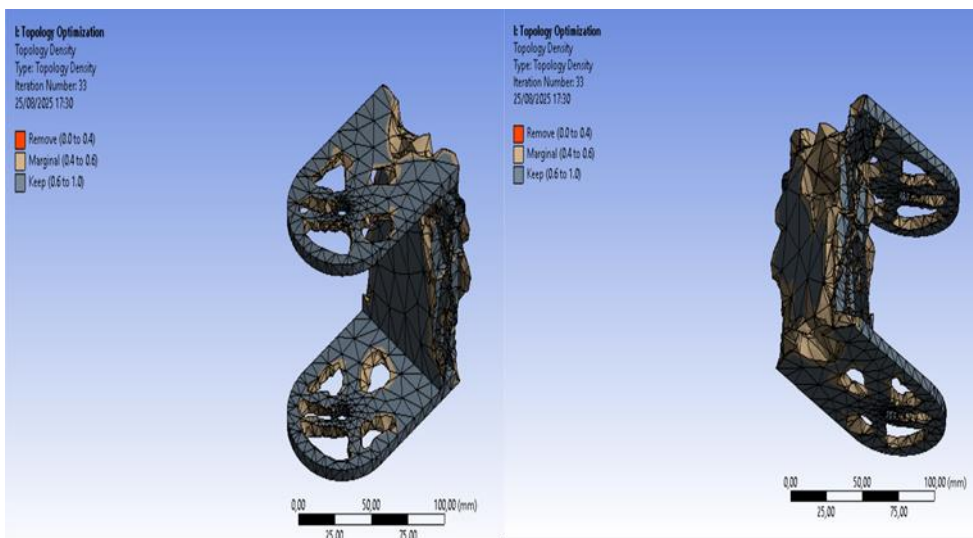
4.3.1 Optimasi Dan Simulasi Struktural Desain *Leg 1*



(a)



(b)



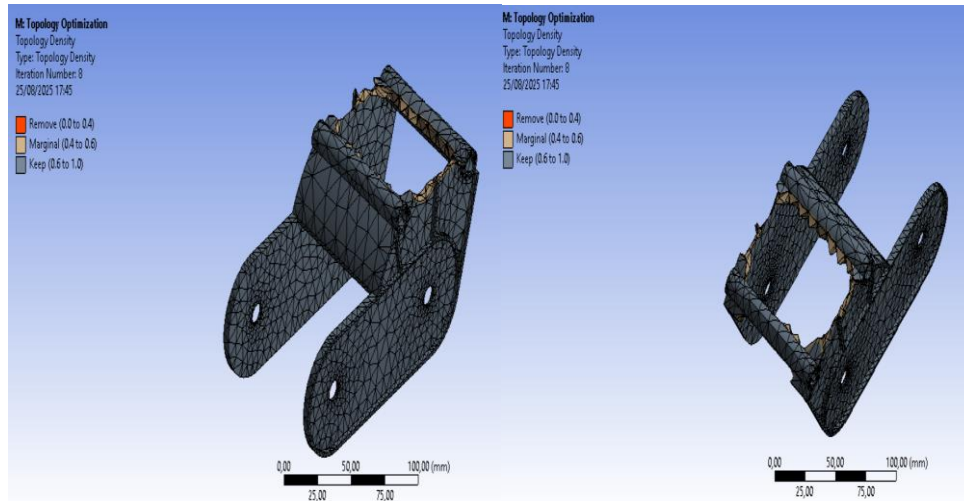
(c)

Gambar 4.14 Hasil Topologi Optimasi Desain Leg 1 (a),(b) dan (c)

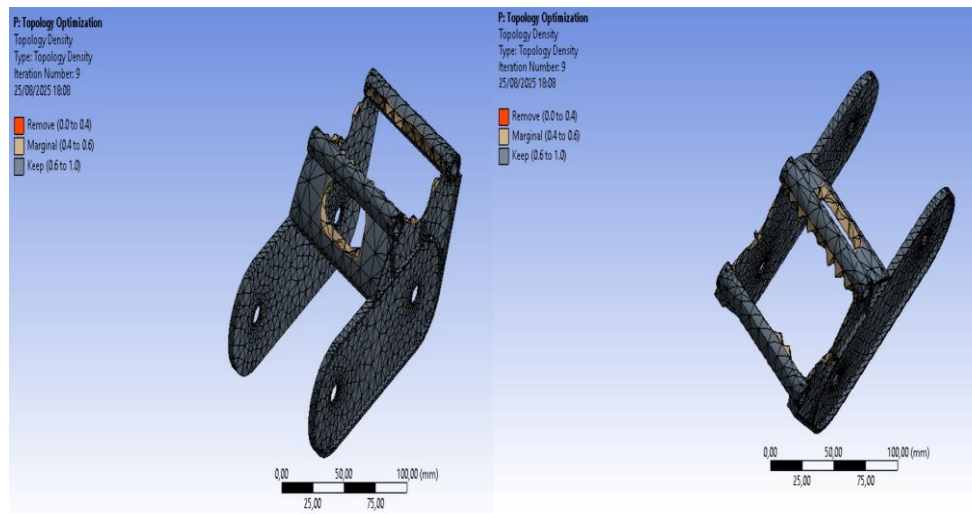
Hasil topologi optimasi pada desain Leg 1 dengan variasi persentase material yang dipertahankan sebesar 70%, 60%, dan 50% dapat dilihat pada Gambar 4.14. Pada kondisi retain 70% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (a), struktur masih

mempertahankan sebagian besar material dari desain awal sehingga bentuk komponen belum banyak mengalami perubahan. Material yang dieliminasi hanya berada pada area yang tidak signifikan dalam menahan beban, sehingga kekakuan struktur tetap terjaga dengan baik. Pada kondisi retain 60% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (b), jumlah material yang dihilangkan semakin banyak dan mulai terlihat terbentuknya pola rongga di bagian dalam struktur. Distribusi material pada tahap ini lebih menekankan pada jalur utama penyaluran beban (*load path*), sehingga desain menjadi lebih ringan namun masih memiliki integritas struktural yang memadai. Sementara itu, pada kondisi retain 50% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (c), eliminasi material dilakukan secara lebih agresif, di mana area-area yang tidak kritis hampir sepenuhnya dihilangkan. Hal ini membuat desain menjadi jauh lebih ringan, namun bentuknya berbeda signifikan dari desain awal dan kekakuan struktur juga mulai berkurang. Secara keseluruhan, hasil optimasi menunjukkan bahwa semakin kecil persentase material yang dipertahankan, maka semakin besar pengurangan massa yang diperoleh, namun di sisi lain berpotensi menurunkan kekuatan dan kekakuan struktur.

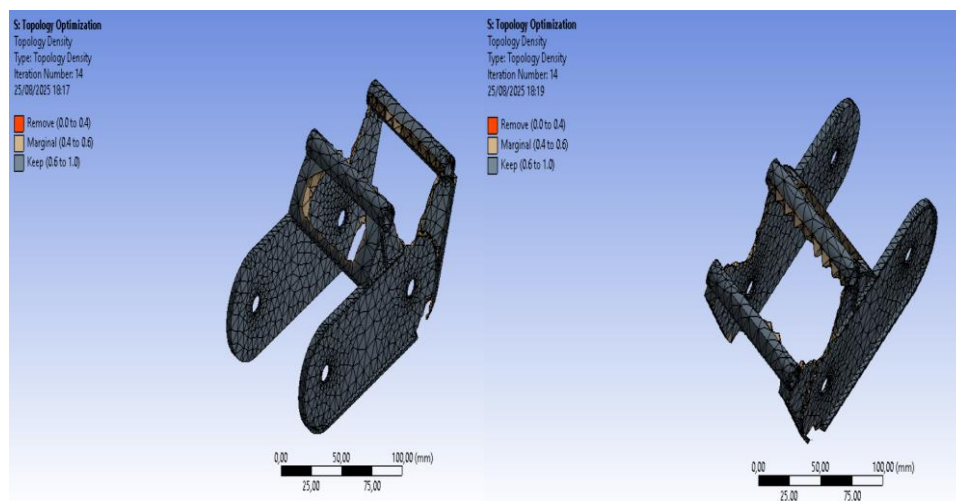
4.3.2 Optimasi Dan Simulasi Struktural Desain Leg 2



(a)



(b)



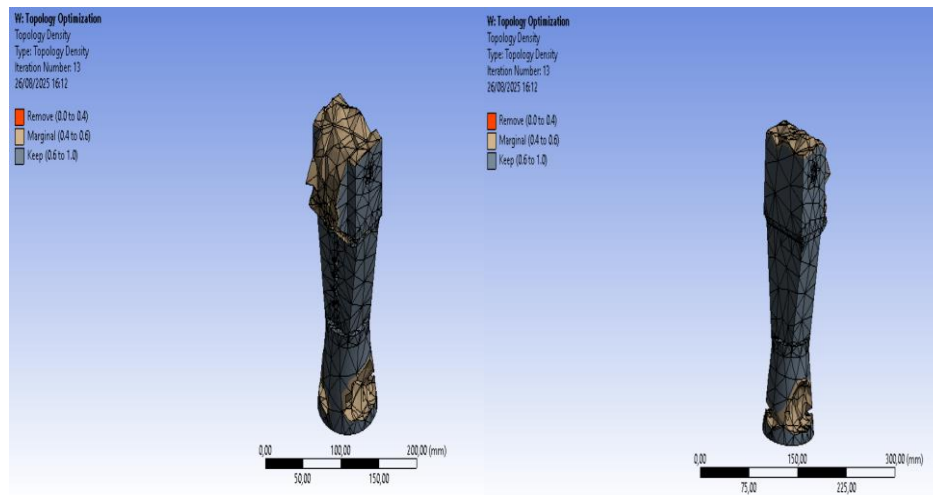
(c)

Gambar 4.15 Hasil Topologi optimasi Desain Leg 2 (a),(b) dan (c)

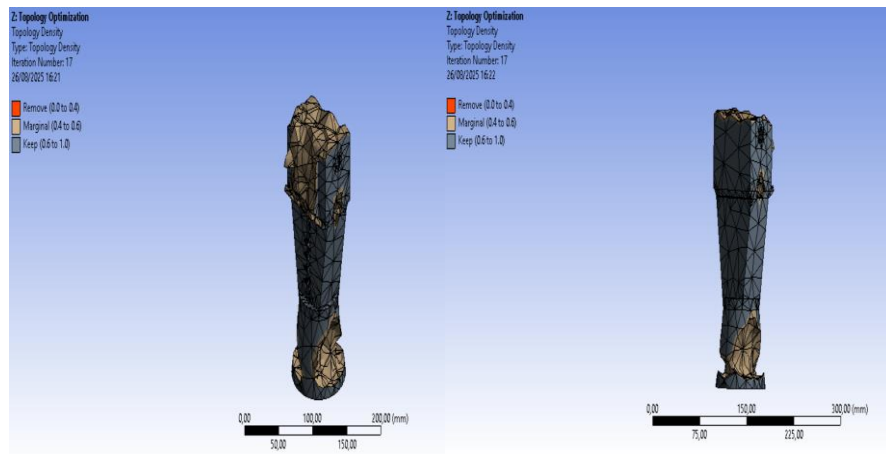
Hasil topologi optimasi pada desain Leg 2 dengan variasi persentase material yang dipertahankan sebesar 70%, 60%, dan 50% dapat dilihat pada Gambar 4.15. Pada kondisi retain 70% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (a), struktur masih mempertahankan sebagian besar bentuk awal, dengan eliminasi material hanya terjadi pada area tertentu yang tidak memiliki kontribusi besar terhadap distribusi tegangan. Bentuk desain masih terlihat cukup solid, sehingga kekakuan dan kekuatan komponen

relatif masih terjaga. Selanjutnya, pada kondisi retain 60% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (b), terjadi pengurangan material yang lebih signifikan. Beberapa bagian dalam struktur mulai membentuk rongga, dan distribusi material lebih menekankan pada jalur utama penyaluran beban. Hal ini menghasilkan desain yang lebih ringan dibandingkan retain 70%, namun masih mampu menjaga integritas struktural pada area yang menerima tegangan tinggi. Sedangkan pada kondisi retain 50% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (c), proses optimasi menghilangkan sebagian besar material yang dianggap tidak esensial, sehingga bentuk desain semakin menyisakan hanya elemen-elemen penting sebagai penopang beban. Desain menjadi jauh lebih ringan, tetapi perubahan bentuknya terlihat cukup signifikan dibandingkan kondisi awal, dan berpotensi mengalami penurunan kekakuan.

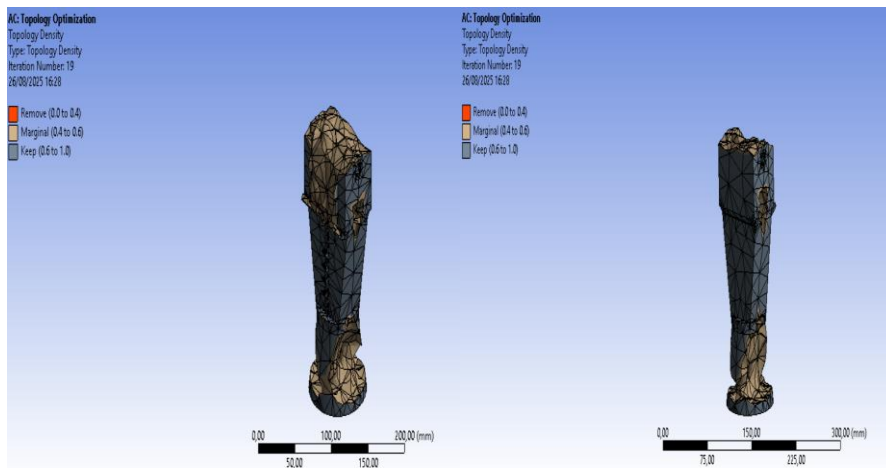
4.3.3 Optimasi Dan Simulasi Struktural Desain Leg 3



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.16 Hasil Topologi optimasi Desain Leg 3 (a),(b) dan (c)

Hasil topologi optimasi pada desain Leg 3 dengan variasi persentase material yang dipertahankan sebesar 70%, 60%, dan 50% ditunjukkan pada Gambar 4.16 Pada kondisi retain 70% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (a), struktur masih mempertahankan sebagian besar material awal, di mana pengurangan material hanya terjadi pada area yang tidak berperan besar dalam penyaluran beban. Bentuk desain masih cukup utuh dan kekakuan struktur relatif tetap terjaga. Selanjutnya, pada kondisi retain 60% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (b), proses eliminasi material

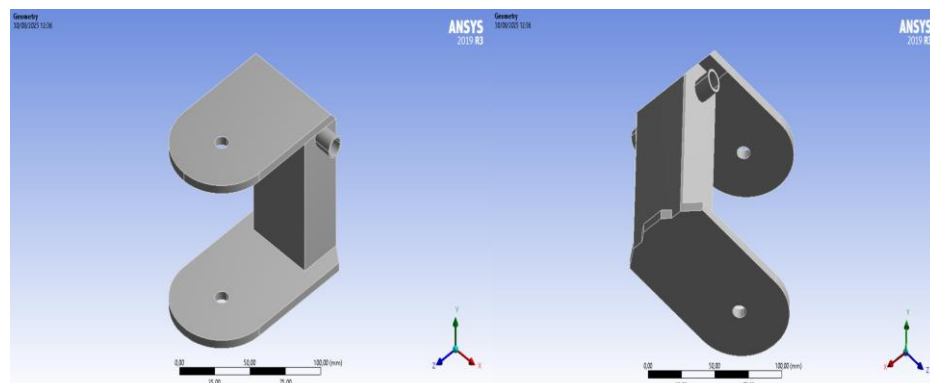
semakin terlihat signifikan. Beberapa bagian pada sisi luar dan area tertentu mulai membentuk rongga, yang menunjukkan jalur utama distribusi tegangan. Hal ini menghasilkan struktur yang lebih ringan dibandingkan retain 70%, namun masih memiliki integritas kekuatan karena material tetap dipertahankan pada area yang menerima beban dominan. Sementara itu, pada kondisi retain 50% pada hasil simulasi terlihat pada gambar (c), eliminasi material dilakukan lebih agresif sehingga banyak bagian non-kritis yang dihilangkan. Bentuk desain menjadi lebih ramping dan efisien dari segi massa, namun terjadi perubahan bentuk yang cukup signifikan dibandingkan desain awal. Hal ini berpotensi menyebabkan penurunan kekakuan, sehingga perlu diperhatikan dalam kaitannya dengan faktor keamanan.

Secara keseluruhan, hasil optimasi desain Leg 3 menunjukkan kecenderungan yang sama dengan desain sebelumnya, yaitu semakin kecil persentase material yang dipertahankan, semakin besar reduksi massa yang diperoleh. Namun, pengurangan material secara berlebihan juga berdampak pada penurunan kekuatan dan kekakuan struktur. Oleh karena itu, pemilihan persentase retain yang tepat perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi massa dengan kebutuhan ketahanan struktural agar desain dapat berfungsi optimal dalam kondisi beban yang sebenarnya.

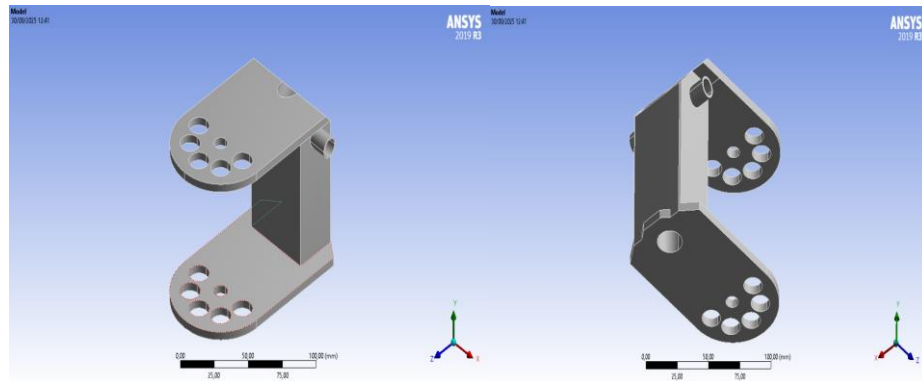
4.4 Hasil Perbaikan Desain Leg 1,2 dan 3

Hasil perbaikan desain pada kaki robot 3 DOF dapat dilihat dalam pengujian di bawah ini:

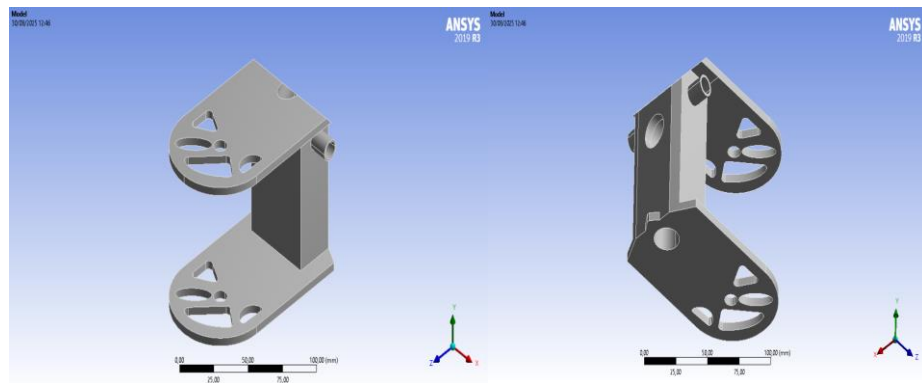
4.4.1 Hasil Perbaikan Desain Leg 1



(a)



(b)



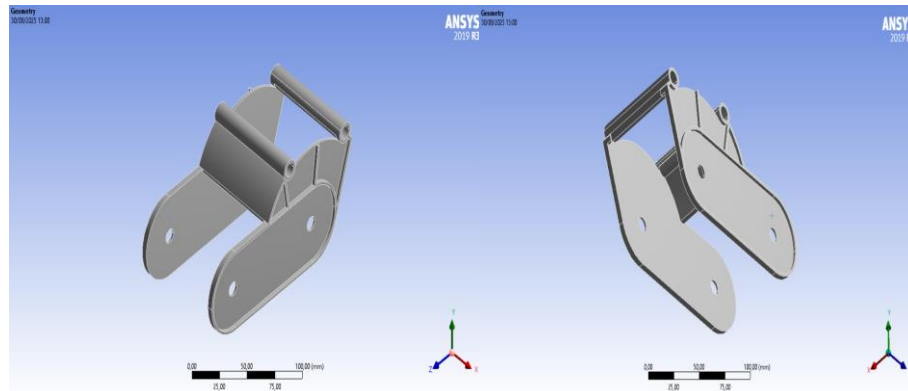
(c)

Gambar 4.17 Hasil Perbaikan Desain Leg 1 (a),(b) dan (c)

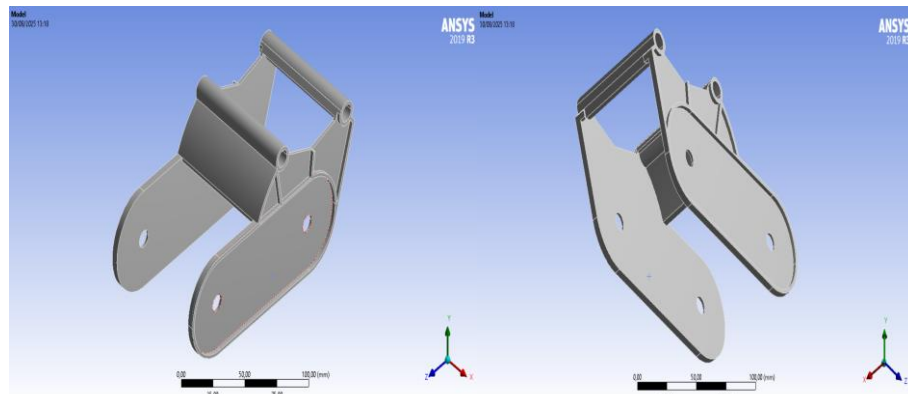
Gambar 4.17. menunjukkan hasil perbaikan desain Leg 1 setelah dilakukan proses topologi optimasi dengan variasi persentase material yang dipertahankan, yaitu 70%, 60%, dan 50%. Pada kondisi retain 70% (a), struktur masih mempertahankan sebagian besar material dari desain awal sehingga bentuk desain relatif tidak banyak berubah. Pengurangan material hanya terjadi pada area yang tidak signifikan terhadap penyaluran beban, sehingga kekakuan struktur tetap terjaga dengan baik. Selanjutnya, pada kondisi retain 60% (b), pengurangan material semakin banyak dan mulai membentuk rongga pada beberapa bagian komponen. Eliminasi ini menghasilkan desain yang lebih ringan namun tetap mempertahankan material pada jalur utama

penyaluran beban, sehingga integritas struktural masih terjaga. Sementara itu, pada kondisi retain 50% (c), proses optimasi dilakukan secara lebih agresif dengan menghilangkan sebagian besar material non-kritis. Desain menjadi jauh lebih ringan dan bentuknya mengalami perubahan yang cukup signifikan dibandingkan desain awal. Meskipun demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang timbul masih berada di bawah kekuatan material PET, sehingga desain pada retain 50% tetap aman digunakan meskipun terjadi penurunan kekakuan.

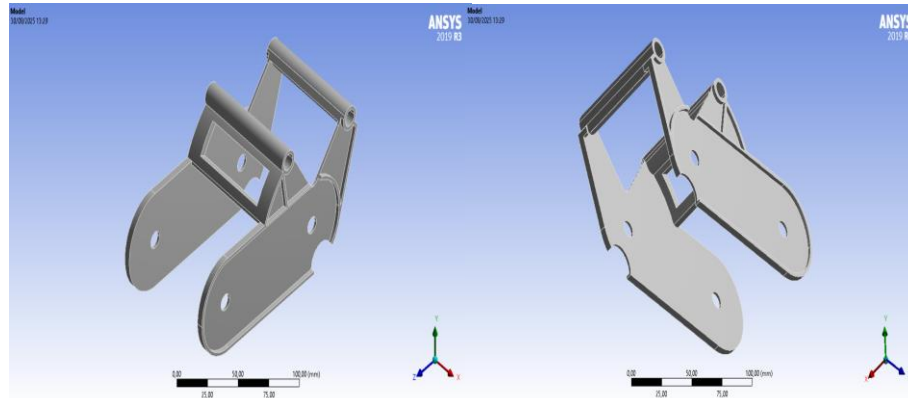
4.4.2 Hasil Perbaikan Desain Leg 2



(a)



(b)

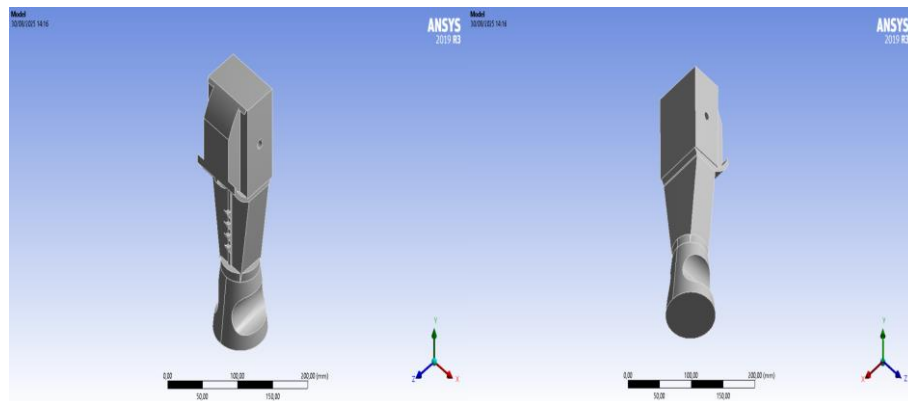


(C)

Gambar 4.18 Hasil Perbaikan Desain Leg 2 (a),(b) dan (c)

Gambar 4.18 memperlihatkan hasil perbaikan desain Leg 2 setelah dilakukan topologi optimasi dengan variasi persentase material yang dipertahankan, yaitu 70%, 60%, dan 50%. Pada kondisi retain 70% (a), struktur masih mempertahankan sebagian besar bentuk aslinya, sehingga pengurangan material hanya terjadi pada area-area non-kritis yang tidak banyak berpengaruh terhadap kekuatan. Desain pada tahap ini tetap terlihat solid dan kokoh, sehingga kekakuan serta kemampuan menahan beban relatif terjaga. Selanjutnya, pada kondisi retain 60% (b), pengurangan material semakin signifikan dengan terbentuknya rongga pada beberapa bagian. Eliminasi material diarahkan pada daerah yang memiliki kontribusi kecil terhadap penyaluran beban, sementara material utama tetap dipertahankan pada jalur distribusi gaya. Desain ini menghasilkan struktur yang lebih ringan tanpa mengurangi kekuatan secara drastis. Sedangkan pada kondisi retain 50% (c), optimasi dilakukan lebih agresif dengan menghilangkan sebagian besar material non-esensial. Desain terlihat jauh lebih ramping dan ringan, namun perubahan bentuknya cukup signifikan dibandingkan desain awal. Meskipun demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum yang dihasilkan masih berada di bawah kekuatan luluh material PET, sehingga struktur Leg 2 tetap aman digunakan, walaupun kekakuannya sedikit berkurang akibat pengurangan material yang lebih besar.

4.4.3 Hasil Perbaikan Desain *Leg 3*



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.19 Hasil Perbaikan Desain Leg 3 (a),(b) dan (c)

Gambar 4.19 menunjukkan hasil perbaikan desain Leg 3 setelah dilakukan topologi optimasi dengan variasi persentase material yang dipertahankan sebesar 70%, 60%, dan 50%. Pada kondisi retain 70% (a), struktur Leg 3 masih mempertahankan hampir seluruh bentuk asli, dengan pengurangan material hanya pada area-area non-struktural yang tidak berkontribusi besar terhadap penyaluran beban. Hal ini membuat bentuk desain tetap terlihat solid dan kekakuan struktur masih tinggi. Selanjutnya, pada kondisi retain 60% (b), proses optimasi mulai mengurangi material secara lebih signifikan, terutama di area sisi luar dan bagian tertentu dari geometri kaki. Eliminasi material menghasilkan struktur yang lebih ringan namun tetap menjaga distribusi material pada jalur utama penyaluran gaya, sehingga integritas kekuatan tetap terjaga. Sementara itu, pada kondisi retain 50% (c), pengurangan material dilakukan secara agresif dengan menghilangkan sebagian besar area non-esensial. Bentuk desain menjadi lebih ramping dan ringan, tetapi perubahan bentuknya cukup signifikan dibandingkan desain awal. Walaupun terjadi potensi penurunan kekakuan, hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang dihasilkan masih berada jauh di bawah kekuatan luluh material PET. Dengan demikian, ketiga variasi retain tetap aman digunakan, namun retain 60% dapat dianggap sebagai kondisi paling optimal karena mampu memberikan pengurangan massa dengan tetap mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang memadai.

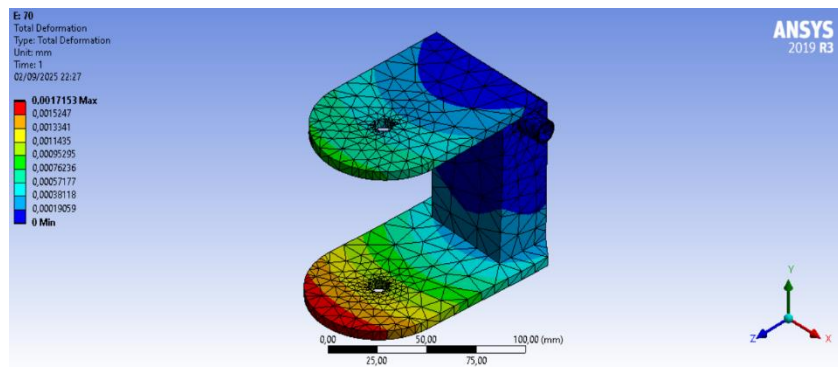
4.5 Analisis Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1, 2 Dan 3

Hasil simulasi pada Lengan Robot 3-DOF setelah dilakukan optimasi desain dengan 3 Output dapat dilihat dalam pengujian dibawah ini.

4.5.1 Uji *Total Deformation Leg 1* (Retain 70%)

Dari hasil simulasi total *deformation* pada Leg 1 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 70%, diperoleh nilai deformasi maksimum sebesar 1,7153 mm sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.20. Deformasi terbesar terjadi pada bagian ujung

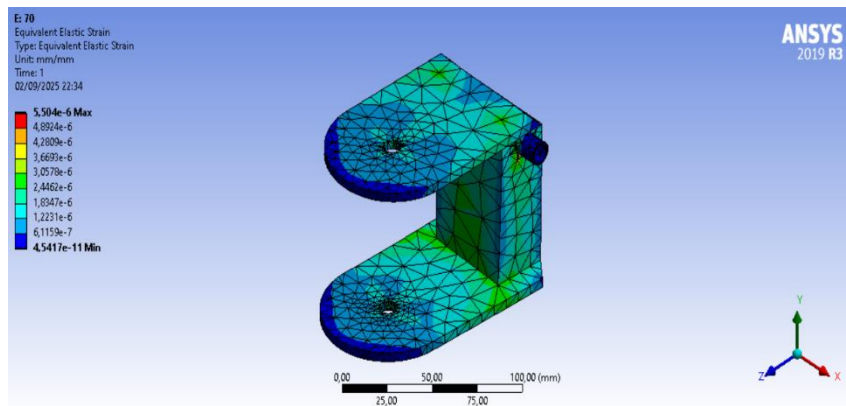
komponen yang menerima beban langsung, sedangkan deformasi minimum terjadi pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Distribusi deformasi lebih dominan pada area luar yang jauh dari titik tumpu, menandakan bahwa bagian tersebut merupakan daerah paling kritis dalam menahan gaya. Meskipun terjadi peningkatan deformasi akibat pengurangan material, nilainya masih tergolong kecil sehingga struktur tetap dapat bekerja dengan baik tanpa mengalami kegagalan fungsional.



Gambar 4.20 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 70%)

4.5.2 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 1 (Retain 70%)

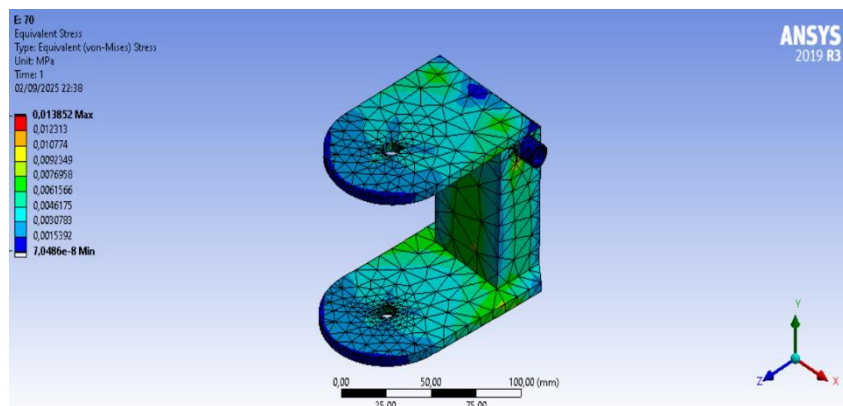
Hasil simulasi regangan elastis ekuivalen (*equivalent elastic strain*) pada Leg 1 menunjukkan nilai maksimum sebesar 5,504 mm/mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.21. Nilai regangan terbesar terjadi pada area yang sama dengan deformasi maksimum, yaitu di bagian ujung komponen yang menerima gaya paling tinggi. Distribusi regangan tampak menyebar secara bertahap dari area beban menuju ke bagian tumpuan, dengan nilai minimum sebesar 0 mm/mm. Hal ini menunjukkan bahwa material PET masih mampu menahan regangan yang terjadi tanpa melewati batas kemampuan elastisnya. Dengan demikian, pada kondisi retain 70%, struktur masih aman karena regangan yang muncul tidak menimbulkan risiko kerusakan permanen.



Gambar 4.21 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 70%)

4.5.3 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress* Leg 1 (Retain 70%)

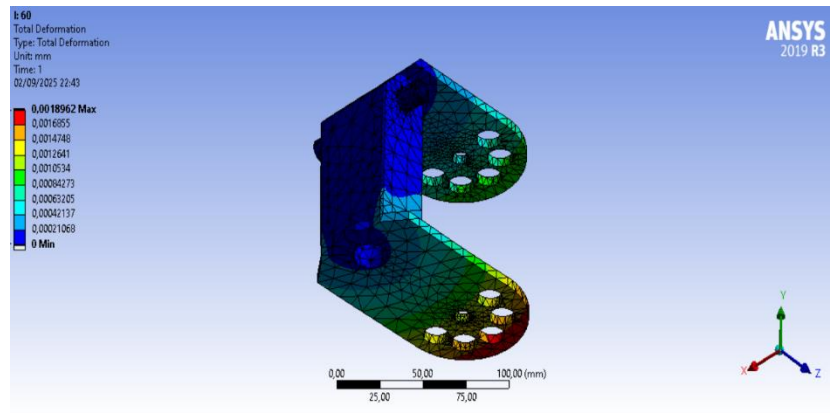
Dari hasil simulasi tegangan ekuivalen menggunakan kriteria Von Mises, diperoleh nilai maksimum sebesar 1,3852 MPa pada Leg 1 dengan kondisi retain 70% (Gambar 4.22). Tegangan tertinggi terjadi pada bagian yang menerima beban terbesar, sedangkan tegangan minimum terjadi di area tumpuan. Nilai tegangan Von Mises ini jauh berada di bawah kekuatan tarik material PET yang berkisar antara 55–75 MPa, sehingga dapat disimpulkan bahwa struktur masih berada dalam kondisi aman terhadap kegagalan plastis. Distribusi tegangan yang merata pada bagian utama struktur menunjukkan bahwa optimasi berhasil mengurangi material pada area non-struktural tanpa mengorbankan kekuatan keseluruhan komponen.



Gambar 4.22 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 70%)

4.5.4 Uji *Total Deformation Leg 1* (Retain 60%)

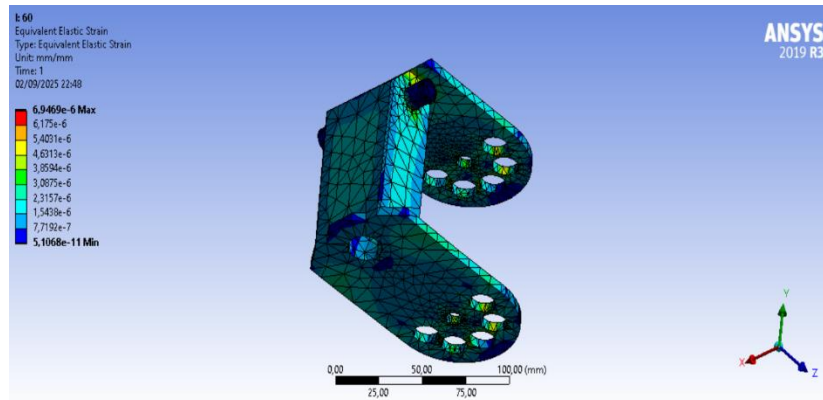
Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 1 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 60% ditunjukkan pada Gambar 4.23. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 1,8962 mm, sedangkan deformasi minimum terjadi pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Distribusi deformasi terlihat lebih menyebar dibandingkan kondisi retain 70%, terutama pada area ujung dan sisi luar komponen yang mengalami pengurangan material. Hal ini menunjukkan bahwa semakin sedikit material yang dipertahankan, maka deformasi yang dihasilkan cenderung meningkat. Meskipun demikian, nilai deformasi ini masih tergolong kecil sehingga struktur masih mampu berfungsi dengan baik.



Gambar 4.23 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 60%)

4.5.5 Uji *Equivalent Elastic Strain Leg 1* (Retain 60%)

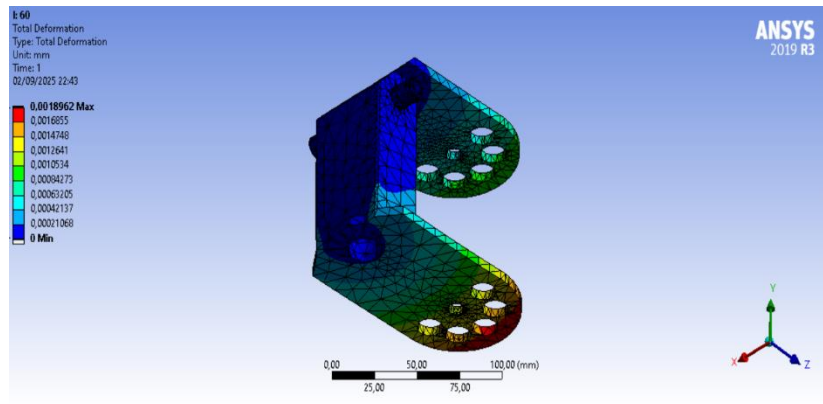
Dari hasil simulasi regangan elastis ekuivalen, diperoleh nilai maksimum sebesar 6,9469 mm/mm pada Leg 1 dengan kondisi retain 60% (Gambar 4.24). Nilai regangan ini lebih tinggi dibandingkan kondisi retain 70%, yang menunjukkan bahwa pengurangan material berdampak pada meningkatnya regangan pada bagian yang menerima beban langsung. Distribusi regangan paling besar terjadi pada area luar yang jauh dari tumpuan, sedangkan nilai minimum berada di area yang tertahan. Walaupun terjadi peningkatan regangan, nilai ini masih dapat ditoleransi oleh material PET yang memiliki sifat elastisitas cukup baik.



Gambar 4.24 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 60%)

4.5.6 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress Leg 1* (Retain 60%)

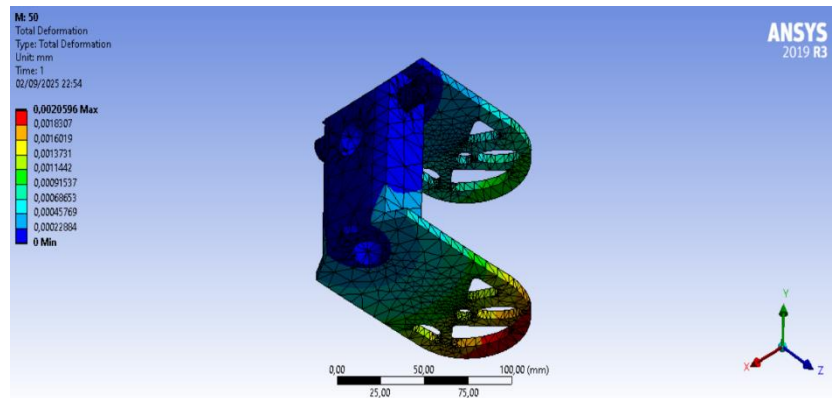
Simulasi tegangan ekuivalen menggunakan kriteria Von Mises pada Leg 1 dengan retain 60% menghasilkan nilai maksimum sebesar 1,9912 MPa (Gambar 4.25). Nilai tegangan ini lebih besar dibandingkan kondisi retain 70%, akibat berkurangnya luas penampang material yang menahan beban. Tegangan maksimum terjadi pada bagian yang mengalami konsentrasi gaya terbesar, sedangkan tegangan minimum terdapat pada bagian tumpuan. Meskipun meningkat, nilai tegangan Von Mises ini masih jauh di bawah kekuatan tarik material PET (55–75 MPa), sehingga dapat dinyatakan bahwa struktur tetap aman terhadap risiko kegagalan plastis.



Gambar 4.25 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 60%)

4.5.7 Uji *Total Deformation Leg 1* (Retain 50%)

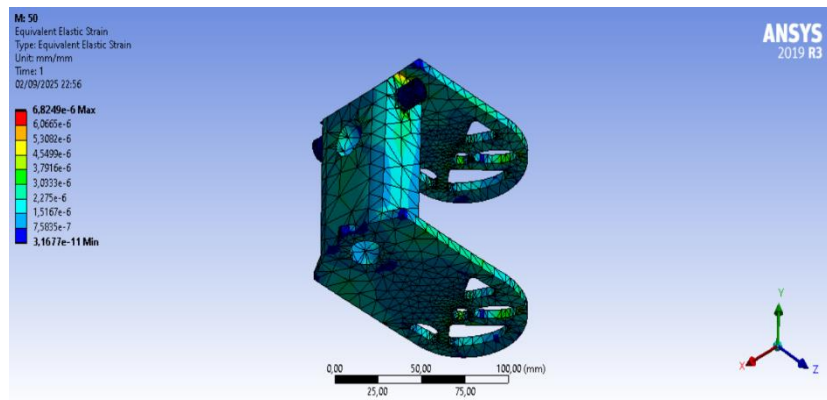
Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 1 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 50% ditunjukkan pada Gambar 4.26. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 2,0596 mm, sedangkan deformasi minimum berada pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Dibandingkan dengan kondisi retain 70% dan 60%, nilai deformasi pada retain 50% mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Distribusi deformasi terlihat menyebar pada area luar dan ujung komponen, menandakan bahwa semakin sedikit material yang dipertahankan, maka kemampuan struktur dalam menahan beban semakin menurun. Meskipun begitu, deformasi yang terjadi masih dalam batas yang dapat ditoleransi oleh material PET.



Gambar 4.26 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 50%)

4.5.8 Uji *Equivalent Elastic Strain Leg 1* (Retain 50%)

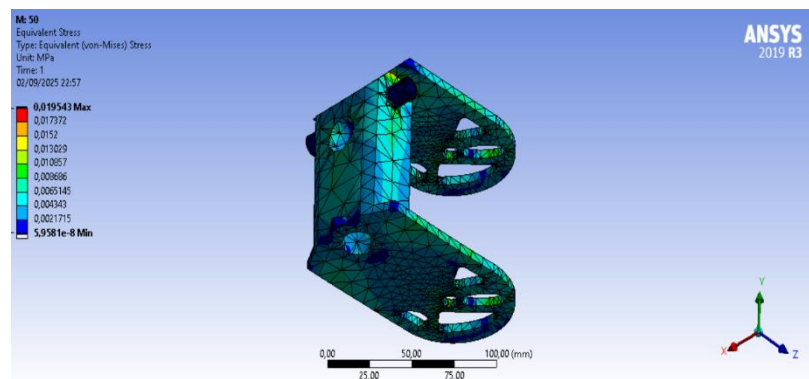
Pada simulasi *equivalent elastic strain*, diperoleh nilai maksimum sebesar 6,8249 mm/mm (Gambar 4.27). Nilai regangan ini sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kondisi retain 60%, tetapi lebih tinggi daripada kondisi retain 70%. Regangan terbesar terjadi pada bagian yang langsung menerima gaya, sedangkan nilai minimum terdapat pada area tumpuan. Distribusi regangan menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi pada beberapa titik akibat berkurangnya material penahan beban. Hal ini menggambarkan bahwa desain retain 50% cenderung lebih rentan terhadap deformasi, meskipun masih dalam batas kemampuan elastis material PET.



Gambar 4.27 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 50%)

4.5.9 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress Leg 1* (Retain 50%)

Hasil simulasi tegangan ekuivalen menggunakan kriteria Von Mises menunjukkan nilai maksimum sebesar 1,9543 MPa pada Leg 1 dengan kondisi retain 50% (Gambar 4.28). Nilai ini sedikit lebih rendah dibandingkan kondisi retain 60%, namun tetap lebih tinggi daripada kondisi retain 70%. Tegangan terbesar terjadi pada area yang menerima beban utama, sedangkan tegangan minimum berada pada titik tumpuan. Walaupun terjadi peningkatan dibandingkan kondisi awal, nilai tegangan Von Mises ini masih jauh di bawah kekuatan tarik material PET (55–75 MPa), sehingga struktur tetap aman terhadap risiko kegagalan plastis.

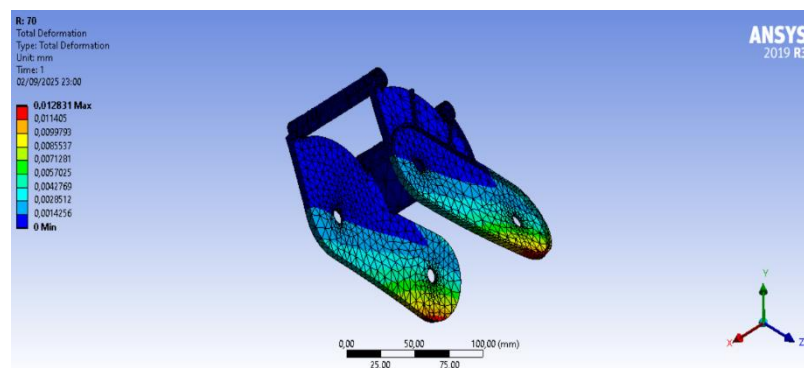


Gambar 4.28 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 1 (Retain 50%)

4.5.10 Uji *Total Deformation Leg 2* (Retain 70%)

Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 2 dengan kondisi *percent to retain*

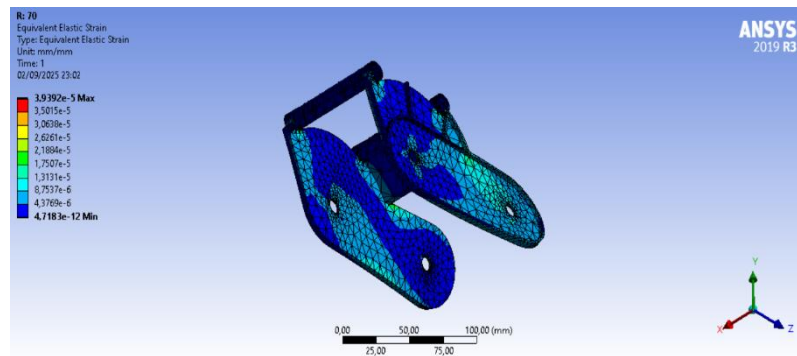
sebesar 70% ditunjukkan pada Gambar 4.29. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 1,2831 mm, sedangkan deformasi minimum terjadi pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Nilai deformasi ini lebih kecil dibandingkan pada Leg 1, menunjukkan bahwa bentuk geometri Leg 2 mampu memberikan distribusi beban yang lebih baik. Distribusi deformasi terlihat dominan pada area ujung komponen yang langsung menerima gaya, sementara area lain relatif stabil. Dengan demikian, struktur Leg 2 pada kondisi retain 70% masih dapat menahan beban dengan baik.



Gambar 4.29 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 70%)

4.5.11 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 2 (Retain 70%)

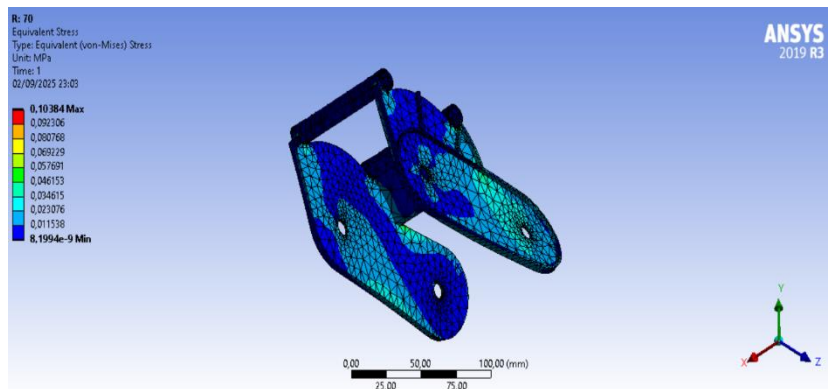
Dari hasil simulasi regangan elastis ekuivalen (*equivalent elastic strain*), diperoleh nilai maksimum sebesar $3,9392 \times 10^{-5}$ mm/mm pada Leg 2 dengan retain 70% (Gambar 4.30). Nilai ini sangat kecil dibandingkan dengan Leg 1, yang menunjukkan bahwa desain geometri Leg 2 lebih efisien dalam menahan regangan. Distribusi regangan menyebar secara merata di area tengah hingga ujung komponen, namun nilainya tetap berada pada batas aman. Hal ini membuktikan bahwa material PET masih mampu mempertahankan sifat elastisnya tanpa melewati batas deformasi permanen.



Gambar 4.30 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 70%)

4.5.12 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress* Leg 2 (Retain 70%)

Hasil simulasi tegangan ekuivalen menggunakan kriteria Von Mises pada Leg 2 dengan kondisi retain 70% menunjukkan nilai maksimum sebesar 0,10384 MPa (Gambar 4.31). Nilai tegangan ini sangat rendah jika dibandingkan dengan kekuatan tarik PET (55–75 MPa), sehingga struktur dipastikan aman dari kegagalan plastis. Tegangan terbesar terjadi pada bagian ujung yang menerima gaya langsung, sedangkan bagian lain relatif stabil. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi pada Leg 2 berhasil mengurangi material tanpa mengorbankan kekuatan struktural.

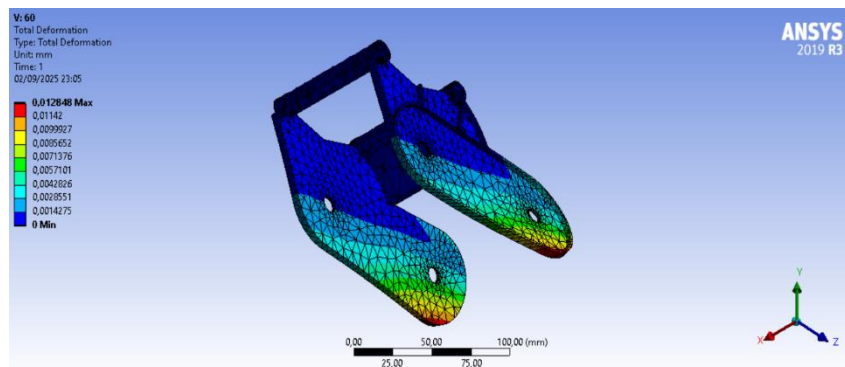


Gambar 4.31 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 70%)

4.5.13 Uji Total *Deformation* Leg 2 (Retain 60%)

Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 2 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 60% ditunjukkan pada Gambar 4.32. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 1,2848 mm, sedangkan deformasi minimum berada pada

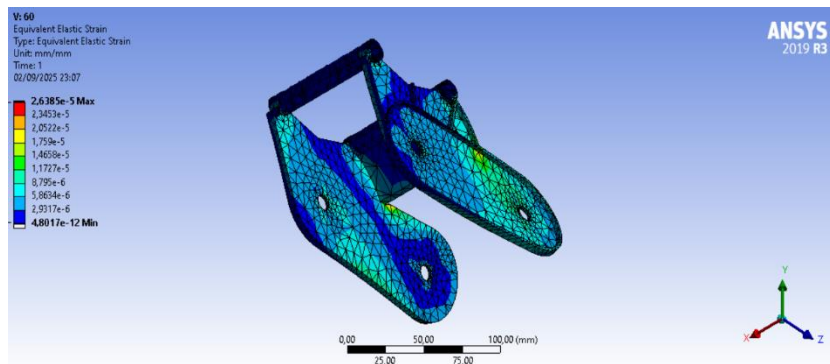
bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Nilai deformasi ini hanya sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi retain 70%, sehingga pengurangan material sebesar 10% tidak berpengaruh signifikan terhadap deformasi keseluruhan. Distribusi deformasi terlihat dominan pada ujung komponen yang menerima gaya, sementara bagian lain tetap stabil. Hal ini menunjukkan bahwa struktur Leg 2 masih cukup kokoh meskipun material yang dipertahankan lebih sedikit.



Gambar 4.32 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 60%)

4.5.14 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 2 (Retain 60%)

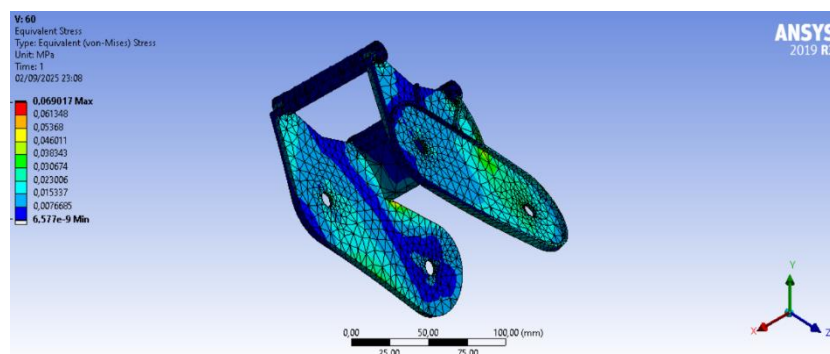
Dari hasil simulasi *equivalent elastic strain* diperoleh nilai maksimum sebesar 2,6385 mm/mm pada Leg 2 dengan retain 60% (Gambar 4.33). Nilai regangan ini meningkat signifikan dibandingkan kondisi retain 70%, menandakan bahwa pengurangan material menyebabkan bagian tertentu lebih mudah mengalami regangan. Distribusi regangan terbesar terjadi pada area ujung komponen, sedangkan nilai minimum terdapat pada bagian tumpuan. Meskipun demikian, nilai regangan ini masih dapat ditoleransi oleh material PET sehingga struktur tetap aman untuk digunakan.



Gambar 4.33 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 60%)

4.5.15 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress Leg 2* (Retain 60%)

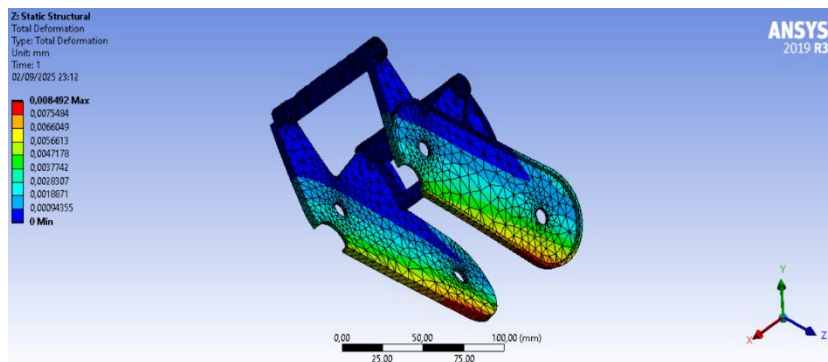
Hasil simulasi tegangan ekuivalen berdasarkan kriteria Von Mises menunjukkan nilai maksimum sebesar 6,9017 MPa pada Leg 2 dengan kondisi retain 60% (Gambar 4.34). Nilai ini lebih tinggi dibandingkan kondisi retain 70%, karena pengurangan material memperkecil luas penampang yang menahan gaya. Tegangan maksimum terjadi pada area ujung yang menerima konsentrasi gaya, sedangkan bagian lain menunjukkan nilai tegangan rendah. Meskipun terjadi peningkatan, nilai tegangan Von Mises ini masih jauh di bawah kekuatan tarik material PET (55–75 MPa), sehingga struktur tetap aman dari kegagalan plastis.



Gambar 4.34 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 60%)

4.5.16 Uji *Total Deformation Leg 2* (Retain 50%)

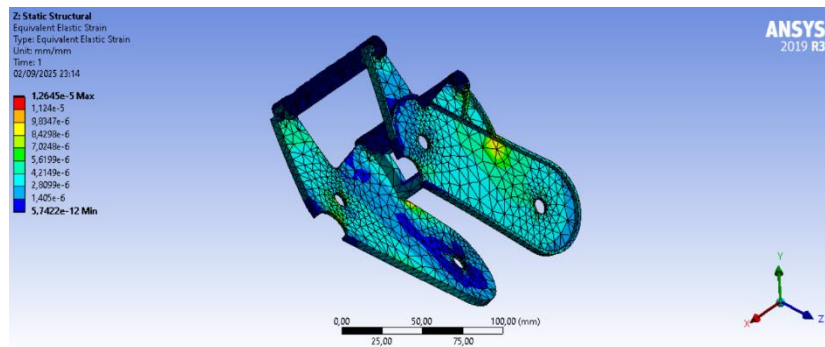
Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 2 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 50% ditunjukkan pada Gambar 4.35. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 8,492 mm, sedangkan deformasi minimum terjadi pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Nilai deformasi ini sangat tinggi bila dibandingkan dengan kondisi retain 70% dan 60%, yang menunjukkan bahwa pengurangan material hingga 50% membuat struktur menjadi jauh lebih lemah dalam menahan beban. Distribusi deformasi menyebar luas hampir ke seluruh bagian komponen, terutama di bagian ujung yang langsung menerima gaya. Hal ini menandakan bahwa pada kondisi retain 50%, struktur Leg 2 mulai kehilangan kestabilannya.



Gambar 4.35 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 50%)

4.5.17 Uji *Equivalent Elastic Strain Leg 2* (Retain 50%)

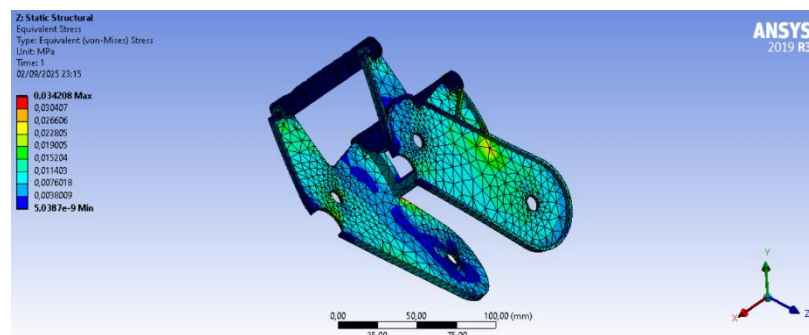
Simulasi *equivalent elastic strain* menunjukkan nilai maksimum sebesar 1,2645 mm/mm pada Leg 2 dengan retain 50% (Gambar 4.36). Nilai regangan ini lebih tinggi dibandingkan kondisi retain 70% dan 60%, menandakan bahwa struktur semakin mudah mengalami regangan akibat berkurangnya material. Distribusi regangan terbesar terjadi pada area tengah hingga ujung komponen, sementara bagian tumpuan tetap menunjukkan nilai minimum. Nilai regangan yang tinggi ini berpotensi menyebabkan deformasi berlebih pada struktur, meskipun material PET masih memiliki kemampuan elastisitas yang cukup baik.



Gambar 4.36 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 50%)

4.5.18 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress Leg 2* (Retain 50%)

Hasil simulasi tegangan ekuivalen Von Mises pada Leg 2 dengan kondisi retain 50% menunjukkan nilai maksimum sebesar 3,4208 MPa (Gambar 4.37). Nilai ini memang masih jauh di bawah kekuatan tarik material PET (55–75 MPa), sehingga struktur secara teoritis masih aman dari kegagalan plastis. Namun, tegangan yang cukup tinggi disertai dengan deformasi besar menunjukkan bahwa desain dengan retain 50% tidak lagi efisien secara struktural. Tegangan terbesar terkonsentrasi pada bagian yang menerima beban langsung, sedangkan area lain tetap relatif rendah.

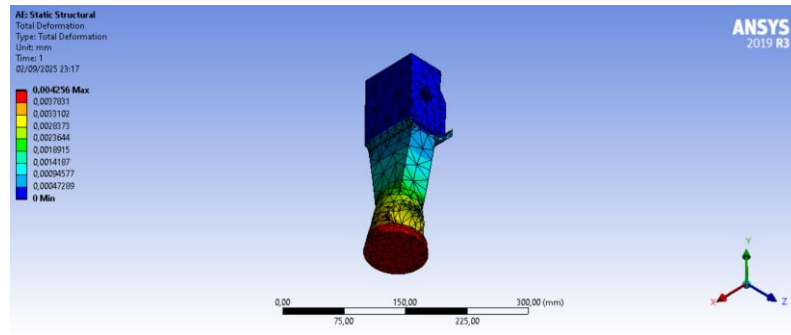


Gambar 4.37 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 2 (Retain 50%)

4.5.19 Uji *Total Deformation Leg 3* (Retain 70%)

Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 3 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 70% ditunjukkan pada Gambar 4.38. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 4,256 mm, sedangkan deformasi minimum berada pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Nilai deformasi ini lebih besar dibandingkan pada

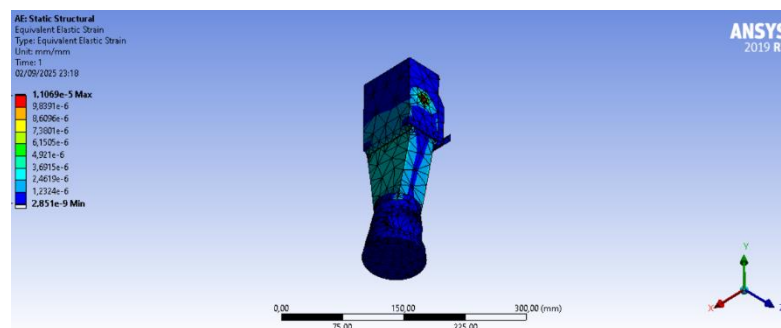
Leg 1 dan Leg 2, hal ini disebabkan bentuk geometri Leg 3 yang lebih panjang sehingga lebih rentan mengalami lendutan. Distribusi deformasi terlihat dominan pada bagian bawah komponen yang berfungsi sebagai penopang utama, sedangkan area dekat tumpuan relatif stabil.



Gambar 4. 38 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain 70%*)

4.5.20 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 3 (*Retain 70%*)

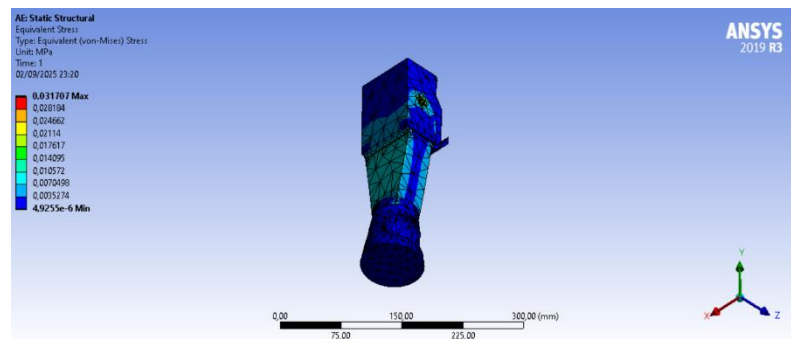
Dari hasil simulasi *equivalent elastic strain*, diperoleh nilai maksimum sebesar 1,1069 mm/mm pada Leg 3 dengan kondisi retain 70% (Gambar 4.39). Regangan terbesar terjadi pada bagian bawah komponen yang langsung menerima beban, sementara nilai minimum terdapat pada area tumpuan. Nilai regangan ini menunjukkan adanya kecenderungan deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan Leg 2, namun masih dalam batas aman elastisitas material PET. Distribusi regangan juga relatif merata di sepanjang permukaan, menandakan bahwa beban masih dapat disalurkan dengan baik meskipun ada pengurangan material.



Gambar 3.39 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain 70%*)

4.5.21 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress Leg 3 (Retain 70%)*

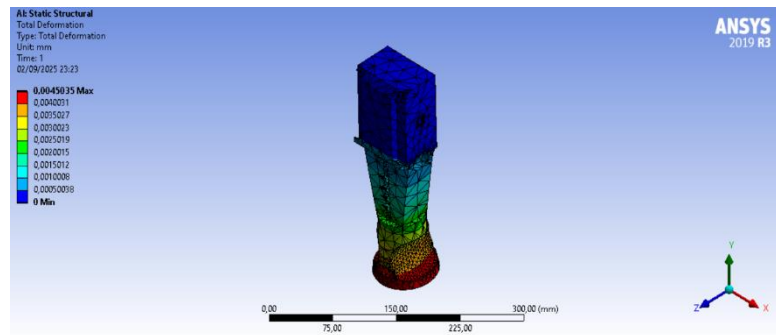
Hasil simulasi tegangan ekuivalen menggunakan kriteria *Von Mises* pada Leg 3 dengan kondisi retain 70% menunjukkan nilai maksimum sebesar $3,1707 \times 10^{-2}$ MPa (Gambar 4.40). Nilai tegangan ini sangat kecil jika dibandingkan dengan kekuatan tarik material PET (55–75 MPa), sehingga struktur dipastikan aman dari risiko kegagalan plastis. Tegangan terbesar terkonsentrasi pada area bawah yang menerima beban langsung, sementara bagian lainnya menunjukkan tegangan yang lebih rendah. Dengan demikian, desain Leg 3 retain 70% masih cukup efisien dan aman digunakan.



Gambar 4.40 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain 70%*)

4.5.22 Uji Total *Deformation Leg 3 (Retain 60%)*

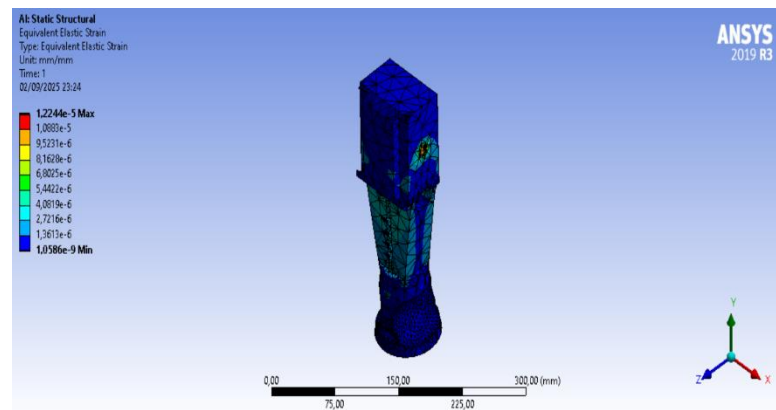
Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 3 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 60% ditunjukkan pada Gambar 4.41. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 4,5035 mm, sedangkan deformasi minimum berada pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Nilai deformasi ini sedikit lebih besar dibandingkan kondisi retain 70%, menunjukkan bahwa pengurangan material membuat struktur lebih rentan terhadap pergeseran. Distribusi deformasi terutama terjadi pada bagian bawah komponen yang berfungsi sebagai penopang utama, sedangkan bagian atas relatif lebih stabil.



Gambar 4.41 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain 60%*)

4.5.23 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 3 (*Retain 60%*)

Dari hasil simulasi *equivalent elastic strain*, diperoleh nilai maksimum sebesar 1,2244 mm/mm pada Leg 3 dengan kondisi *retain 60%* (Gambar 4.42). Regangan terbesar terjadi pada bagian bawah komponen yang menerima beban langsung, sementara nilai minimum berada pada area tumpuan. Dibandingkan dengan kondisi *retain 70%*, nilai regangan mengalami peningkatan yang cukup signifikan, menandakan bahwa pengurangan material memperbesar potensi deformasi. Meskipun demikian, nilai ini masih berada dalam batas elastisitas material PET.

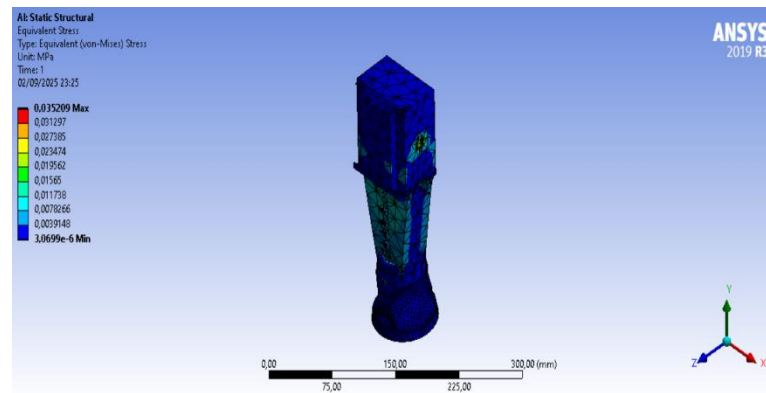


Gambar 4.42 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain 60%*)

4.5.24 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress* Leg 3 (*Retain 60%*)

Hasil simulasi tegangan ekuivalen Von Mises pada Leg 3 dengan kondisi *retain 60%* menunjukkan nilai maksimum sebesar 3,5209 MPa (Gambar 4.43). Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan kondisi *retain 70%*, karena luas penampang yang menahan

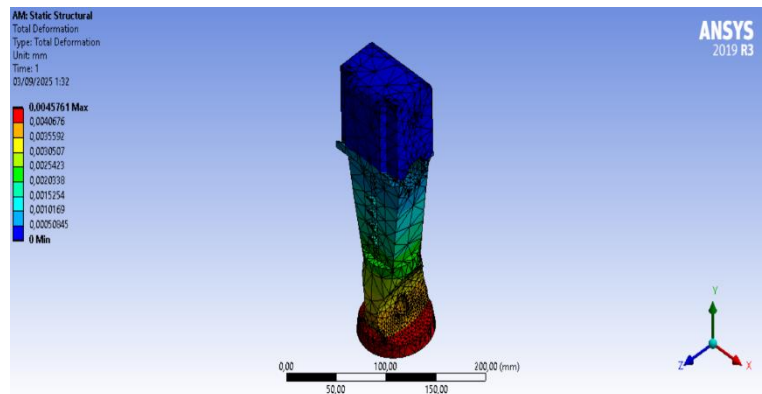
beban berkurang. Tegangan tertinggi terkonsentrasi pada bagian bawah yang menerima beban langsung, sementara area lainnya tetap pada tingkat tegangan rendah. Walaupun terjadi peningkatan, nilai tegangan ini masih jauh di bawah kekuatan tarik PET (55–75 MPa), sehingga struktur masih aman dari kegagalan plastis.



Gambar 4.43 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain 60%*)

4.5.25 Uji *Total Deformation Leg 3* (*Retain 50%*)

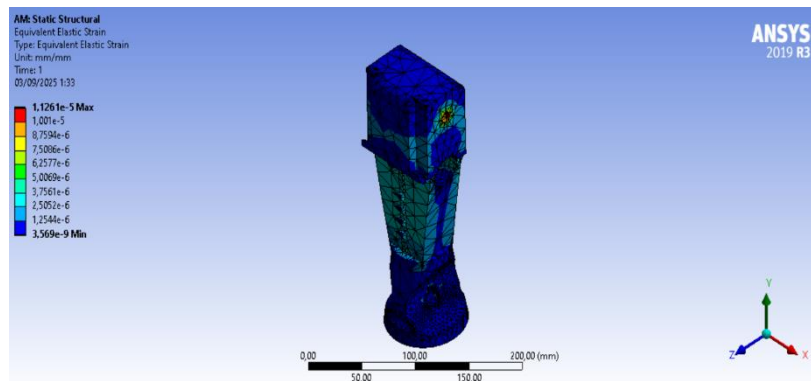
Hasil simulasi total *deformation* pada Leg 3 dengan kondisi *percent to retain* sebesar 50% ditunjukkan pada Gambar 4.44. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh adalah sebesar 4,5761 mm, sedangkan deformasi minimum berada pada bagian tumpuan dengan nilai 0 mm. Nilai deformasi ini lebih besar dibandingkan kondisi retain 70% dan 60%, yang mengindikasikan bahwa semakin sedikit material yang dipertahankan, semakin besar pula risiko pergeseran struktur. Distribusi deformasi masih dominan pada bagian bawah komponen yang menahan beban utama, sedangkan bagian atas tetap lebih stabil.



Gambar 4.44 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain* 50%)

2.5.26 Uji *Equivalent Elastic Strain* Leg 3 (*Retain* 50%)

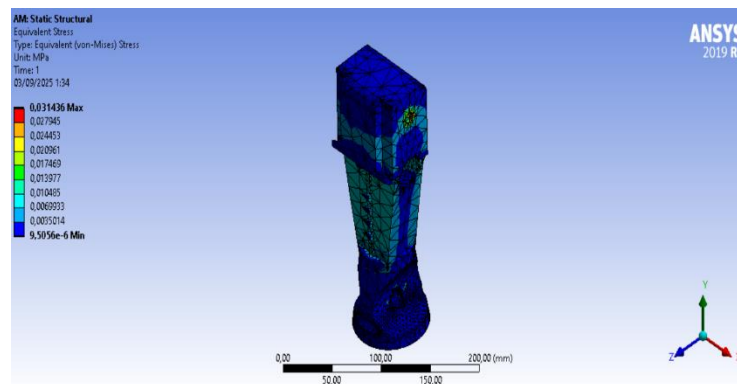
Hasil simulasi *equivalent elastic strain* pada Leg 3 dengan kondisi *retain* 50% menunjukkan nilai maksimum sebesar 1,1261 mm/mm (Gambar 4.45). Regangan terbesar terjadi pada bagian bawah komponen yang menerima beban langsung, sementara bagian tumpuan menunjukkan nilai minimum. Nilai regangan ini sedikit lebih rendah dibandingkan kondisi *retain* 60%, tetapi tetap lebih besar daripada kondisi *retain* 70%. Hal ini menandakan bahwa pengurangan material hingga 50% tetap membuat struktur lebih rentan mengalami deformasi, meskipun masih berada dalam batas aman elastisitas material PET.



Gambar 4.45 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain* 50%)

4.5.27 Uji *Equivalent (Von Mises) Stress* Leg 3 (*Retain 50%*)

Hasil simulasi tegangan ekuivalen Von Mises pada Leg 3 dengan kondisi retain 50% menunjukkan nilai maksimum sebesar 3,1436 MPa (Gambar 4.46). Nilai tegangan ini lebih kecil dibandingkan pada kondisi retain 60%, namun lebih tinggi daripada kondisi retain 70%. Tegangan terbesar masih terkonsentrasi pada bagian bawah komponen yang menerima beban langsung. Walaupun terdapat peningkatan dibandingkan dengan retain 70%, nilai tegangan ini masih jauh di bawah kekuatan tarik PET (55–75 MPa), sehingga struktur Leg 3 retain 50% masih aman dari kegagalan plastis.



Gambar 4.46 Hasil Simulasi Setelah Optimasi Desain Leg 3 (*Retain 50%*)

4.5 Perbandingan Analisis Sebelum dan Sesudah Optimasi

Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan hasil simulasi struktur kaki robot SAR 3-DOF sebelum dan sesudah dilakukan topologi optimasi dengan variasi persentase material yang dipertahankan (retain 70%, 60%, dan 50%). Parameter yang dianalisis meliputi total deformation, equivalent elastic strain, dan Von Mises stress pada masing-masing bagian kaki (Leg 1, Leg 2, dan Leg 3). Secara umum, hasil tabel memperlihatkan bahwa setelah dilakukan optimasi, nilai deformasi, regangan, dan tegangan cenderung mengalami peningkatan dibandingkan kondisi awal akibat berkurangnya jumlah material yang menahan beban. Namun demikian, meskipun terjadi peningkatan nilai tersebut, keseluruhan hasil masih berada jauh di bawah batas kekuatan luluh material PET, sehingga struktur tetap aman digunakan. Dari ketiga variasi, kondisi retain 60% dapat dianggap paling optimal karena mampu memberikan

pengurangan massa yang signifikan sekaligus menjaga kekakuan dan integritas struktur. Hal ini membuktikan bahwa metode topologi optimasi efektif dalam menghasilkan desain kaki robot yang ringan, efisien, namun tetap memenuhi syarat kekuatan mekanis untuk mendukung performa robot SAR di lapangan.

Tabel 4.1 Analisis Perbandingan Sebelum dan Sesudah Optimasi

Komponen	Parameter	Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi (Retain 70%)	Setelah Optimasi (Retain 60%)	Setelah Optimasi (Retain 50%)
Leg 1	Total Deformation (mm)	0,00158	1,7153	0,8962	2,0596
	Equivalent Elastic Strain	3,6842	5,504	6,9469	6,8249
	Von Mises Stress (MPa)	1,0592	1,3852	1,9912	1,9543
Leg 2	Total Deformation (mm)	0,01034	1,2831	1,2848	8,492
	Equivalent Elastic Strain	1,8508	3,9392	2,6385	1,2645
	Von Mises Stress (MPa)	0,0484	0,10384	6,9017	3,4208
Leg 3	Total Deformation (mm)	0,03401	4,256	4,5035	4,5761
	Equivalent Elastic Strain	8,8552	11,069	12,244	11,261
	Von Mises Stress (MPa)	0,2548	3,1707	3,5209	3,1436

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Proses perancangan dan simulasi berhasil menghasilkan tiga model kaki robot (Leg 1, Leg 2, dan Leg 3) dengan material PET yang memiliki kekuatan dan kekakuan cukup baik untuk digunakan pada aplikasi robot pencarian dan penyelamatan (SAR).
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai deformasi, regangan, dan tegangan Von Mises yang terjadi pada ketiga model masih berada jauh di bawah batas kekuatan luluh material PET, sehingga desain dapat dikatakan aman digunakan.
3. Proses optimasi dengan variasi *percent to retain* sebesar 70%, 60%, dan 50% menunjukkan adanya pengurangan massa dengan konsekuensi peningkatan deformasi dan tegangan. Semakin kecil persentase material yang dipertahankan, maka struktur menjadi lebih ringan namun kekakuannya cenderung menurun.
4. Dari hasil analisis, desain dengan retain 60% memberikan kompromi terbaik antara pengurangan massa dan kekuatan struktur. Desain ini cukup ringan, tetapi masih mampu menjaga integritas struktural dan menahan beban dengan aman.
5. Secara keseluruhan, optimasi desain kaki robot SAR 3-DOF berbahan PET mampu meningkatkan efisiensi struktur melalui pengurangan massa tanpa mengorbankan kekuatan secara signifikan, sehingga sesuai untuk mendukung misi pencarian dan penyelamatan yang membutuhkan mobilitas tinggi.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian ini adalah

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan jumlah DOF menjadi 5 DOF.
2. Selain material PET, penelitian berkelanjutan dapat mengkaji penggunaan

material komposit ringan atau PET yang diperkuat serat untuk meningkatkan rasio kekuatan terhadap berat. Selanjutnya, perlu dilakukan pembuatan prototipe fisik dan pengujian langsung di laboratorium atau lapangan. Uji coba ini mencakup uji beban statis, beban dinamis, serta pengujian pada permukaan tidak rata agar dapat divalidasi apakah hasil simulasi benar-benar sesuai dengan performa nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Allaire, G., Jouve, F., & Toader, A.-M. (2004). Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*, 194, 363–393. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2003.09.032>
- AL TAHTAWI, A. R., ANDIKA, E., YUSUF, M., & HARJANTO, W. N. (2020). Pengembangan Low-cost Quadrotor dengan Misi Waypoint Tracking Berbasis Pengendali PID. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 8(1), 189. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v8i1.189>
- Amir, A., Suwardoyo, U., & Salim K, A. (2023). Movement Control System of 3-DOF Quadroped Robot. *PROtek: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.33387/protk.v10i1.4962>
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. In *European Polymer Journal* (Vol. 41, Issue 7, pp. 1453–1477). <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (1988a). GENERATING OPTIMAL TOPOLOGIES IN STRUCTURAL DESIGN USING A HOMOGENIZATION METHOD. In *COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING* (Vol. 71).
- Dan Regangan Pada Batang, T. (n.d.). *KEKUATAN BAHAN*.
- Darianto, D., Siregar, A., Umroh, B., & Kurniadi, D. (2019). SIMULASI KEKUATAN MEKANIS MATERIAL KOMPOSIT TEMPURUNG KELAPA MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 3(1), 39. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v3i1.2443>
- Harahap, A. (2020). Simulasi Pembebanan Pada Shackle Menggunakan Perangkat Lunak Ansys APDL 15.0. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 4(1), 74–84. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v4i1.3811>
- Huang, X., & Xie, Y. M. (2007). Convergent and mesh-independent solutions for the

bi-directional evolutionary structural optimization method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43(14), 1039–1049.
<https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.06.006>

J T I I K Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer. (n.d.).
<http://www.jtiik.ub.ac.id>

Kusuma, A. P., Wajiansyah, A., Informasi, T., Samarinda, P. N., Lipan, K. G., & Berkaki, R. C. (2017). *Optimasi pergerakan robot cerdas berkaki dengan menerapkan model reference adaptive control movement optimization of legged smart robot implementing model references adaptive control*.

Monteiro, B. S., Rocha, F., & Costa, J. M. (2024). Topology Optimization of a Robot Gripper with nTopology. *U.Porto Journal of Engineering*, 10(1), 11–19.
https://doi.org/10.24840/2183-6493_010-001_002051

PENDAHULUAN MENGENAL SOLIDWORKS. (n.d.).

Raibert, M. (2008). BigDog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(1 PART 1).
<https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.4278>

Ramadhana, R. F. (2024). Analisis Pembebanan Pada Desain Chassis Prototype Mobil Listrik Hemat Energi Menggunakan Software Autodesk Inventor 2019. In *Universitas Malikussaleh*.

SEMINAR HASIL PENELITIAN ANALISIS NUMERIK LENGAN ROBOT 3-DOF (DEGREE OF FREEDOM) UNTUK KEBUTUHAN ROBOT SAR. (n.d.).

Sun, Y., Zong, C., Panheri, F., Chen, T., & Lueth, T. C. (2023a). Design of topology optimized compliant legs for bio-inspired quadruped robots. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32106-5>

Uchrowi, A., Lasmadi, L., & Soekarno, S. (2019). Pemodelan dan Simulasi Robot Lengan 3 DOF Menggunakan V-REP. *AVITEC*, 1(1).
<https://doi.org/10.28989/avitec.v1i1.489>

Wahyu Utomo, L., & Susi Arfiana, dan. (2023). Pemanfaatan Limbah Plastik Daur Ulang dari Polietilen Tereftalat (PET) Sebagai Bahan Tambahan dalam Pembuatan Nanokomposit, Semen Mortar, dan Aspal. In *Jurnal Teknologi*

Lingkungan Lahan Basah (Vol. 11, Issue 1).

Yuda, M., & Airlangga, P. (902). *PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN DIPLOMA
TIGA FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI INSTITUT TEKNOLOGI
NASIONAL MALANG 2023.*



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya
Saya menjabar surat ini agar daabukan
semor dan tenggalnya

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Pp/PT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003

<https://fatek.umsu.ac.id> fatek@umsu.ac.id [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#)

**PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUJUKAN
DOSEN PEMBIMBING**

Nomor : 1785/IL3AU/UMSU-07/F/2025

Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, berdasarkan rekomendasi Atas Nama Ketua Program Studi Teknik Mesin Pada Tanggal 02 September 2025 dengan ini Menetapkan :

Nama : REIHAN RAMADHAN
Npm : 2107230139
Program Studi : TEKNIK MESIN
Semester : 8 (Delapan))
Judul Tugas Akhir : TOPOLOGI OPTIMASI DESAIN KAKI ROBOT SAR 3 DOF
BERBAHAN PET.
Pembimbing : IQBAL TANJUNG ST.MT

Dengan demikian diizinkan untuk menulis tugas akhir dengan ketentuan :

1. Bila judul Tugas Akhir kurang sesuai dapat diganti oleh Dosen Pembimbing setelah mendapat persetujuan dari Program Studi Teknik Mesin
2. Menulis Tugas Akhir dinyatakan batal setelah 1 (satu) Tahun dan tanggal yang telah ditetapkan.

Demikian surat penunjukan dosen Pembimbing dan menetapkan Judul Tugas Akhir ini dibuat untuk dapat dilaksanakan sebagaimana mestinya

Medan, 09 Rabiul Awal 1447 H
02 September 2025 M



Dr. Munawar Alfansury Siregar, ST.,MT
NIDN/NUPTK:0101017202/7433750651131152



LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Judul : Topology Optimasi Desain Kaki Robot Sar 3 Dof
Berbahan Pet
Nama : Reihan Ramadhan
NPM : 2107230139
Dosen Pembimbing : Iqbal Tanjung, S.T., M.T.

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1	KAMIS 107-08-2025	Perbaiki Daftar pustaka	
2	Jumat 108-08-2025	Perbaiki kesimpulan dan Saran	
3	Sabtu 109-08-2025	Rapikan Penulisan	
4	Sabtu 109-08-2025	Rapikan penyusunan stripsi	
5	Selasa 112-08-2025	perbaiki abstract	
6	Selasa 112-08-2025	perbaiki Saran	

Dosen Pembimbing



Iqbal Tanjung, S.T., M.T.

**DAFTAR HADIR SEMINAR
TUGAS AKHIR TEKNIK Mesin
FAKULTAS TEKNIK – UMSU
TAHUN AKADEMIK 2024 – 2025**

Peserta seminar

Nama : Reihan Ramadhan

NPM : 2107230139

Judul Tugas Akhir : Topologi Optimasi Desain Kaki Robot Sar 3 Dof Berbahan Pet

DAFTAR HADIR			TANDA TANGAN
Pembimbing – I : Iqbal Tanjung, ST.MT			:
Pembanding – I : Assoc Prof Ir Arfis Amiruddin M.Si			:
Pembanding – II : H. Muharnif ST.M. Sc			:
No	NPM	Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
1	2107230036	Jamil al Hamid pusi	
2	2107230013	M. AIFIANDI	
3	2107230012	Yudi Titik Nugraha	
4	2107230009	Rahmad Daffa Fauzan	
5	2107230055	M. ALWI RIYAY HIRI	
6	2107230145	ALVIN PRIMA WIDIA	
7	2107230139	REIHAN RAMADHAN	
8			
9			
10			

Medan 11 Rabiul Awal 1447 H
04 September 2025 M

Ketua Prodi. T. Mesin



Chandra A Siregar ST.MT

**DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

Nama : Reihan Ramadhan
NPM : 2107230139
Judul Tugas Akhir : Topologi Optimasi Desain Kaki Robot Sar 3 Dof Berbahan Pet

Dosen Pembanding – I : Assoc Prof Ir Arfis Amiruddin M.Si
Dosen Pembanding – II : H. Muharnif ST.M. Sc
Dosen Pembimbing – I : Iqbal Tanjung, ST.MT

KEPUTUSAN

1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)
- 2.) Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan antara lain :

.....*lihat Laporan*.....
.....
.....

3. Harus mengikuti seminar kembali
Perbaikan :

.....
.....
.....
.....

Medan 11 Rabiul Awal 1447 H
04 September 2025 M

Diketahui :
Ketua Prodi. T. Mesin



Chandra A Siregar ST.MT

Dosen Pembanding- II



H. Muharnif ST.M. Sc

**DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

Nama : Reihan Ramadhan
NPM : 2107230139
Judul Tugas Akhir : Topologi Optimasi Desain Kaki Robot Sar 3 Dof Berbahan Pet

Dosen Pembanding – I : Assoc Prof Ir Arfis Amiruddin M.Si
Dosen Pembanding – II : H. Muharnif ST.M. Sc
Dosen Pembimbing – I : Iqbal Tanjung, ST.MT

KEPUTUSAN

1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)

2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan antara lain :

*PET: Beban kerja, Berat robot, Baza journal,
analisa Bilik kerja, Mayat.*

3. Harus mengikuti seminar kembali
Perbaikan :

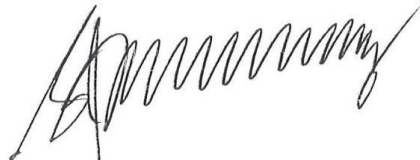
Medan 11 Rabiul Awal 1447 H
04 September 2025 M

Diketahui :
Ketua Prodi. T. Mesin



Chandra A Siregar ST.MT

Dosen Pembanding- I



Assoc Prof Ir Arfis Amiruddin M.Si

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



A. DATA PRIBADI

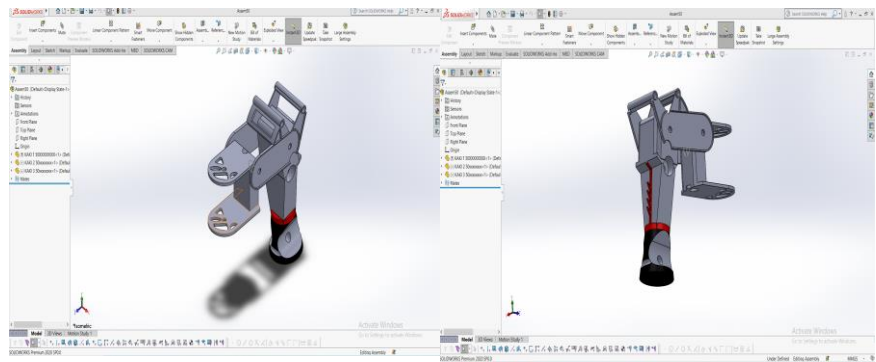
Nama : Reihan Ramadhan
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Tempat, Tanggal Lahir : Medan, 02 November 2003
Alamat : Jl.Kawat 01 No.109 LK XIV
Agama : Islam
E-mail : reihanrama200302@gmail.com
No. Handphone : 083851760849

B. RIWAYAT PENDIDIKAN

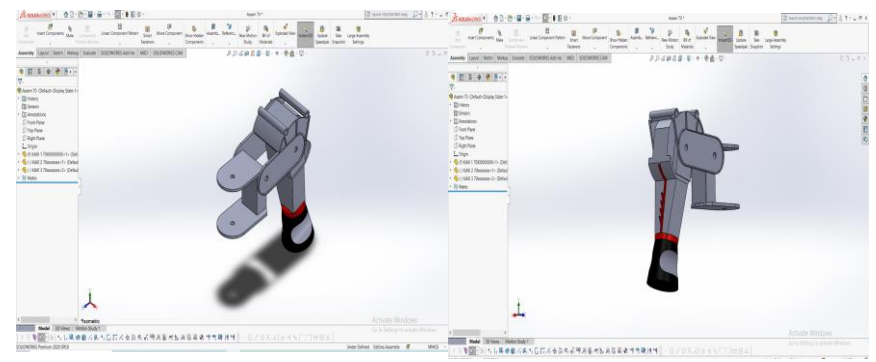
1. SDN Bakti 02	Tahun 2009-2015
2. SMP S Al-Fattah Medan	Tahun 2015-2018
3. SMK N 01 Percut Sei Tuan	Tahun 2018-2021
4. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara	Tahun 2021-2025

Lampiran 5. Hasil Assembly Kaki Robot Sar 3Dof Setelah Di lakukan Optimasi Dan Perbaikan Desain

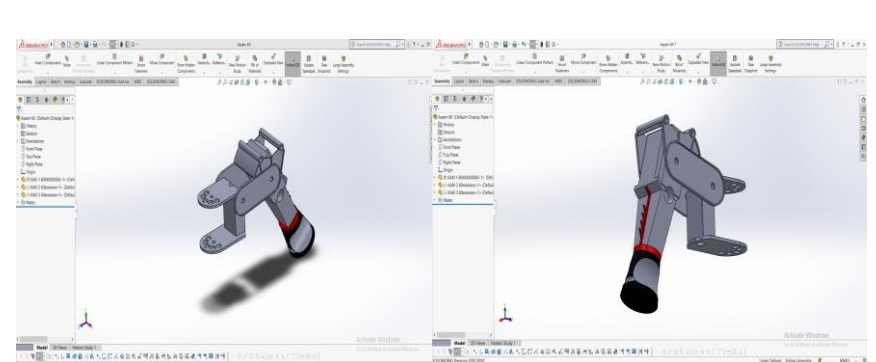
1 Assembly Kaki Robot Dengan *Percent To Retain* (a)70%,(b) 60% dan (c) 50%



(a)



(b)



(c)