

DESAIN DAN PROSES MANUFAKTUR
COVER KAKI PROSTETIK JENIS
ENERGY STORAGE AND RETURN (ESAR)

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin



Disusun Oleh :

Nama : Fierel Arga Perdana
No. Mahasiswa : 21525120
NIRM : 2005130050

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

DESAIN DAN PROSES MANUFAKTUR *COVER KAKI PROSTETIK JENIS ENERGY STORAGE AND RETURN (ESAR)*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Fierel Arga Perdana
No. Mahasiswa : 21525120
NIRM : 2005130050

Yogyakarta, 11 Agustus 2025

Pembimbing I,



Muhammad Khafidhi, Dr. Ir., S.T.,
M.T., IPP

Pembimbing II,



Donny Suryawan, Ir., S.T.,
M.Eng., IPP

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

Desain dan Proses Manufaktur *Cover* Kaki Prostetik Jenis *Energy Storage and Return (ESAR)*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Fierel Arga Perdana
No. Mahasiswa : 21525120
NIRM : 2005130050

Tim Penguji

Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

Ketua

Yustiasih Purwaningrum, S.T., M.T.

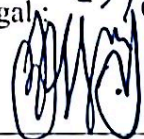
Anggota I

Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D.

Anggota II


Tanggal : 28-8-2025


Tanggal : 29/8²⁵


Tanggal : 29-08-2025



Mengetahui

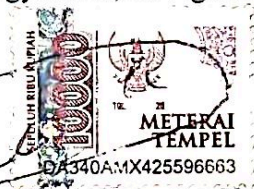
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil karya saya sendiri. Segala bentuk kutipan, ringkasan, atau rujukan dari karya orang lain telah dicantumkan sumbernya sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil plagiasi atau dibuat oleh pihak lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 26 Agustus 2025



Fierel Arga Perdana
21525120

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa hormat dan kasih, penulis mempersembahkan Tugas Akhir ini kepada orang-orang yang sangat penulis sayangi dan hormati:

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Untoro dan Ibu Karsiti atas segala doa, dukungan moral, semangat, dan kasih sayang yang tiada henti selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Dosen pembimbing Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP dan Bapak Ir. Donny Suryawan, S.T., M.Eng., IPP atas segala bimbingan, arahan, dan ilmu yang diberikan selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh dosen Program Studi Teknik Mesin atas ilmu, motivasi, serta kesempatan belajar yang sangat berharga selama masa perkuliahan, serta kepada staf administrasi yang telah membantu dalam kelancaran berbagai urusan akademik penulis.
3. Seluruh rekan-rekan seperjuangan selama menempuh studi, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Terima kasih atas semangat, kebersamaan, bantuan, dan doa yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga Laporan Tugas Akhir ini selesai disusun.

HALAMAN MOTTO

“Wahai orang-orang yang beriman, mohonlah pertolongan (kepada Allah) dengan sabar dan salat. Sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar.”

(Q.S. Al-Baqarah: 153)

"Orang mukmin itu ramah dan diperlakukan dengan ramah. Tidak ada kebaikan bagi orang yang tidak ramah. Dan sebaik-baiknya manusia adalah orang yang bermanfaat bagi orang yang lain."

(HR. Ath-Thabrani dalam Kitab Al Awsath)

„Die größte Stärke liegt in der Ruhe und Geduld.“

(Kekuatan terbesar terletak pada ketenangan dan kesabaran.)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillahirabbil‘alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, dan kemudahan yang telah diberikan sehingga pelaksanaan dan penulisan Laporan Tugas Akhir dengan judul “Desain dan Proses Manufaktur *Cover* Kaki Prostetik Jenis *Energy Storage and Return (ESAR)*” dapat diselesaikan dengan baik. Salawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan umat, yang ajarannya menjadi cahaya dalam setiap langkah kehidupan. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karenanya, dengan kerendahan hati, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua yang tak henti memberikan dukungan, doa, semangat, dan kasih sayang.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP selaku Dosen Pembimbing I, Bapak Ir. Donny Suryawan, S.T., M.Eng., IPP selaku Dosen Pembimbing II, serta segenap dosen dan staf atas segala ilmu, bimbingan, arahan, serta motivasi yang selalu diberikan selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini maupun selama menempuh kuliah di Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia.
3. Seluruh teman-teman mahasiswa yang telah kebersamai penulis dalam menuntut ilmu selama masa studi, dan tak henti memberikan dukungan positif selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis memahami bahwa proses dalam Tugas Akhir ini merupakan bagian dari dinamika pembelajaran yang tak luput dari kesalahan. Maka dari itu, masukan dari berbagai pihak sangat memperkaya perspektif dan meningkatkan kualitas penelitian ini. Penulis berharap karya ini dapat berkontribusi positif dan menjadi referensi awal dalam pengembangan desain prostetik yang lebih baik kedepannya.

ABSTRAK

Amputasi pada kaki memberikan dampak signifikan pada mobilitas dan kualitas hidup individu. Dalam upaya mengatasi keterbatasan tersebut, kaki prostetik jenis *Energy Storage and Return (ESAR)* dikembangkan dengan tujuan mereplikasi pola berjalan alami manusia melalui mekanisme penyimpanan dan pelepasan energi. Banyak penelitian mengemukakan bahwa performa kaki prostetik *ESAR* tidak hanya bergantung pada sistem rangka *ESAR*, namun juga bergantung pada kualitas *cover* luar yang berperan melindungi struktur internal dan memberikan aspek estetika. Material konvensional yang dipakai untuk *cover* kaki prostetik biasanya adalah silikon, *EVA*, dan *PVC*, namun material tersebut masih memiliki keterbatasan dalam hal ketahanan terhadap beban berulang. Oleh karenanya, tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi performa *resin polyurethane* sebagai material alternatif untuk *cover* kaki prostetik *ESAR*.

Proses perancangan memiliki beberapa tahapan utama, yaitu *3D scanning* kaki prostetik, desain digital *cover* dan *mold* menggunakan *software* SolidWork, serta manufaktur *core* dan *mold* memanfaatkan teknologi *3D printing* dengan metode *Fused Deposition Modeling (FDM)* dan *Stereolithography (SLA)*. Produk *cover* dicetak dengan proses *casting* dan dilakukan pengujian *preliminary fatigue* untuk mengevaluasi performa sifat mekanik material.

Hasil studi ini telah menunjukkan bahwa *resin polyurethane TPU 70* dapat dicetak memanfaatkan *mold* hasil *3D printing* dan mampu mempertahankan bentuk dan fungsi nya setelah pengujian *preliminary fatigue*. Desain *mold* yang dirancang modular dengan sistem ventilasi menunjukkan efisiensinya dalam meminimalisir cacat cetak seperti gelembung udara (*air bubbles*) pada hasil cetak. Penelitian ini membuktikan bahwa *resin polyurethane* sangat potensial diaplikasikan sebagai material utama *cover* kaki prostetik jenis *ESAR*.

Kata kunci: kaki prostetik *ESAR*, resin poliuretan, *casting*, uji *fatigue* prostetik, *mold 3D print*.

ABSTRACT

Leg amputation has a significant impact on an individual's mobility and quality of life. In an initiative to address these limitations, the Energy Storage and Return (ESAR) prosthetic leg has been developed with the aim of replicating natural human walking gait through energy storage and return mechanisms. Numerous studies have highlighted that the performance of ESAR prosthetic legs not only depends on the ESAR frame system but also on the quality of the outer cover, which serves to protect internal structures and provide aesthetic appeal. Conventional materials used for prosthetic leg covers typically include silicone, EVA, and PVC; however, these materials still have limitations in terms of durability under repetitive loads. Therefore, the objective of this study is to evaluate the performance of polyurethane resin as an alternative material for ESAR prosthetic leg covers.

The design process involves several main stages, including 3D scanning of the prosthetic foot, digital design of the cover and mold using SolidWorks software, and manufacturing of the core and mold using 3D printing technology with Fused Deposition Modeling (FDM) and Stereolithography (SLA) methods. The cover product was manufactured using casting and subjected to preliminary fatigue testing to evaluate the mechanical properties of the material.

The results of this study have shown that polyurethane resin TPU 70 can be molded using 3D-printed molds and maintains its shape and function after preliminary fatigue testing. The modular mold design with a ventilation system demonstrates its efficiency in minimizing molding defects such as air bubbles in the molded product. This research proves that polyurethane resin is highly potential for application as the main material for ESAR prosthetic foot covers.

Keywords: ESAR prosthetic foot, polyurethane resin, casting, prosthetic fatigue test, 3D printed mold.

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iii
Pernyataan Keaslian	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih	vii
Abstrak	viii
<i>Abstract</i>	ix
Daftar Isi	x
Daftar Tabel.....	xii
Daftar Gambar	xiii
Daftar Notasi.....	xiv
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan.....	4
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
Bab 2 Tinjauan Pustaka	6
2.1 Kajian Pustaka	6
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Biomekanika <i>gait cycle</i>	7
2.2.2 Kaki prostetik tipe <i>ESAR</i>	8
2.2.3 <i>Cover</i> kaki prostetik	10
2.2.4 <i>Resin polyurethane</i>	11
2.2.5 SolidWorks 2022	12
2.2.6 <i>3D printing</i>	13
2.2.7 <i>Casting</i>	13

2.2.8	Pengujian <i>fatigue</i>	14
Bab 3	Metode Penelitian	16
3.1	Alur Penelitian.....	16
3.2	Kriteria Desain.....	17
3.2.1	Kriteria <i>must</i>	17
3.2.2	Kriteria <i>want</i>	17
3.3	Peralatan dan Bahan	17
3.4	Perancangan.....	19
3.4.1	<i>3D scan</i> kaki prostetik	20
3.4.2	Desain <i>cover</i> kaki prostetik	20
3.4.3	Desain <i>mold</i> dan <i>core</i>	21
3.4.4	<i>Slicing mold</i> dan <i>core</i>	22
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	23
4.1	Hasil <i>3D Scan</i> Kaki Prostetik	23
4.2	Desain <i>Cover</i> Kaki Prostetik <i>ESAR</i>	24
4.3	Pembuatan Alternatif Desain <i>Mold</i>	26
4.3.1	Alternatif desain 1	26
4.3.2	Alternatif desain 2	27
4.3.3	Alternatif desain 3	28
4.3.4	Evaluasi Terhadap Alternatif Desain <i>Mold</i>	29
4.4	Desain <i>Mold</i> yang Terpilih.....	31
4.4.1	Hasil <i>assembly mold</i> dan <i>core</i> pada <i>software</i>	34
4.4.2	Hasil <i>3D printing mold</i> dan <i>core</i>	35
4.4.3	Hasil fabrikasi <i>cover</i> kaki prostetik <i>ESAR</i>	37
4.5	Hasil Pengujian <i>Preliminary Fatigue</i>	40
4.6	Analisis dan Pembahasan	41
Bab 5	Penutup.....	43
5.1	Kesimpulan.....	43
5.2	Saran Penelitian Selanjutnya	43
	Daftar Pustaka	45
	Lampiran.....	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Tabel peralatan.	18
Tabel 3.2. Tabel bahan.	19
Tabel 4.1. Matriks keputusan alternatif desain <i>modal</i>	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Fase dalam <i>gait cycle</i>	8
Gambar 2.2. <i>Compressive test</i> menggunakan HT-2402.....	9
Gambar 2.3. Kaki prostetik <i>ESAR</i>	10
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.	16
Gambar 4.1. Hasil <i>3D scan</i> kaki prostetik.....	23
Gambar 4.2. Detail <i>3D scan</i> kaki prostetik.	24
Gambar 4.3. Desain <i>Cover</i> kaki prostetik <i>ESAR</i>	25
Gambar 4.4. <i>Assembly cover</i> dan <i>ESAR foot</i>	26
Gambar 4.5. <i>Assembly cover</i> tampak transparan dan <i>ESAR foot</i>	26
Gambar 4.6. Alternatif desain <i>mold</i> 1.	27
Gambar 4.7. Alternatif desain <i>mold</i> 2.	28
Gambar 4.8. Alternatif desain <i>mold</i> 3.	29
Gambar 4.9. <i>Mold</i> atas.....	32
Gambar 4.10. <i>Mold</i> bawah.	32
Gambar 4.11. <i>Mold</i> modular.....	33
Gambar 4.12. <i>Mold</i> modular setelah <i>assembly</i>	33
Gambar 4.13. <i>Core</i> modular.....	34
Gambar 4.14. <i>Core</i> modular setelah <i>assembly</i>	34
Gambar 4.15. <i>Assembly mold</i> dan <i>core</i> dengan <i>section view</i>	35
Gambar 4.16. <i>Mold</i> modular.....	36
Gambar 4.17. <i>Core</i> modular.....	36
Gambar 4.18. <i>Mold</i> dan <i>core</i> setelah <i>finishing</i>	37
Gambar 4.19. <i>Cover</i> kaki prostetik <i>ESAR</i> tampak samping atas.....	38
Gambar 4.20. <i>Cover</i> kaki prostetik <i>ESAR</i> tampak bawah.	38
Gambar 4.21. <i>Cover</i> kaki prostetik <i>ESAR</i> tampak belakang atas.....	39
Gambar 4.22. <i>Cover</i> kaki prostetik <i>ESAR</i> tampak atas.	39
Gambar 4.23. Pengujian <i>fatigue</i>	40
Gambar 4.24. Pengujian <i>fatigue</i> setelah 100.000 siklus.....	41
Gambar 4.25. <i>Void</i> pada produk <i>cover</i> prostetik <i>ESAR</i>	42

DAFTAR NOTASI

<i>ESAR</i>	= <i>Energy Storage and Return</i>
<i>PU</i>	= <i>Polyurethane</i>
<i>STL</i>	= <i>Stereolithography</i>
<i>CAD</i>	= <i>Computer Aided Design</i>
<i>FDM</i>	= <i>Fused Deposition Modeling</i>
<i>SLA</i>	= <i>Stereolithography Apparatus</i>
<i>PLA+</i>	= <i>Polylactic Acid Plus</i>
UV Resin	= Resin fotopolimer
<i>Cycle</i>	= Satu siklus beban tekan-tarik saat gerakan berjalan
mm	= Milimeter

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Amputasi pada anggota tubuh bagian bawah, khususnya kaki, merupakan tantangan besar yang berdampak serius terhadap mobilitas dan kualitas hidup seseorang [1]. Pasien amputasi sering mengalami kesulitan dalam berjalan, berdiri, atau untuk mempertahankan postur tubuh tetap stabil saat bergerak. Masalah yang muncul akibat disfungsi tersebut bukan hanya bersifat fisikal, namun juga secara psikologis dan hubungan antar sosial, yang kerap menyebabkan turunnya tingkat kepercayaan diri seseorang [2]. Kondisi ini mendorong riset berbagai inovasi dalam teknologi prostetik, salah satunya adalah kaki prostetik tipe *Energy Storage and Return (ESAR)* [3].

Jenis prostetik *ESAR* dirancang untuk meniru pola berjalan alami manusia dengan menyimpan energi saat fase tumpuan (*stance*) dan melepaskan energi saat fase dorong (*push-off*), sehingga memberikan kenyamanan dan efisiensi gerak yang lebih baik bagi penggunaanya karena pendekatan ini memberikan efisiensi energi yang lebih baik, dan menawarkan tingkat kenyamanan yang tinggi [4]. Meskipun mekanisme internal *ESAR* seperti desain dan material menjadi pusat fungsinya, namun perlu digaris-bawahi bahwa performa optimal dari kaki prostetik *ESAR* tidak hanya dipengaruhi oleh faktor itu saja, tetapi juga pada kualitas *cover* luar yang melindungi struktur dalam dan menunjang aspek fungsional serta estetika [5]. *Cover* pada kaki prostetik *ESAR* berfungsi untuk melindungi struktur internalnya dari benturan, beban mekanik, dan faktor lingkungan.

Material yang umumnya digunakan sebagai penutup kaki prostetik meliputi silikon, karet, *EVA (Ethylene Vinyl Acetate)*, dan *PVC (Polyvinyl Chloride)*. Bahan-bahan ini dipilih karena kemudahan dalam proses manufakturnya [6]. Akan tetapi, dalam penggunaan jangka panjang khususnya oleh pengguna dengan tingkat aktivitas tinggi, material tersebut menunjukkan kecenderungan mengalami deformasi, keausan, dan *fatigue* material akibat intensitas beban berulang [7], [8].

Hal ini berdampak pada penurunan daya tahan dan performa kaki prostetik, sekaligus menurunkan kepuasan pengguna.

Sebagai tindak lanjut untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dilakukan riset mengenai *resin polyurethane (PU)* sebagai alternatif material yang potensial. Karakteristik *polyurethane* seperti elastisitas tinggi, ketahanan terhadap *mechanical fatigue*, serta daya tahan kimia menjadikan *polyurethane* sebagai kandidat kuat untuk pengembangan *cover* prostetik yang lebih tangguh [9]. Menurut data penelitian dari *International Society for Prosthetics and Orthotics (ISPO)* menunjukkan bahwa *EVA* memiliki kecenderungan mengalami deformasi pada aplikasi kaki prostetik hingga lebih dari 20 mm setelah uji *fatigue* siklik, dan *polyurethane* mengalami penyusutan lebih sedikit (~13,6 mm) [7]. Sayangnya, hingga saat ini, penggunaan *resin polyurethane* dalam *cover* kaki prostetik *ESAR* belum banyak dieksplorasi dalam literatur ilmiah, sehingga meninggalkan celah riset yang patut ditindaklanjuti.

Fokus penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi *resin polyurethane* sebagai material utama *cover* kaki prostetik *ESAR*. Fokus utama diarahkan pada ketahanan material terhadap siklus beban berulang, serta kompatibilitasnya dengan proses manufaktur modern. Studi ini dilakukan melalui alur kerja terintegrasi yang mencakup pemindaian tiga dimensi (*3D scanning*), proses desain dengan komputer (*Computer Aided Design*) menggunakan perangkat lunak SolidWorks, pembuatan *mold* menggunakan teknologi *3D printing* (dengan material *PLA+* untuk *mold* dan resin untuk *core*), serta proses *casting* untuk membentuk produk akhir *cover* kaki prostetik.

Meskipun *resin polyurethane* memiliki potensi besar merujuk pada penelitian terdahulu yang telah melakukan pengujian terhadap material ini, namun literatur ilmiah yang membahas secara spesifik mengenai pengaplikasiannya terhadap kaki prostetik jenis *ESAR* sangatlah terbatas. Umumnya pada riset di bidang pengujian material tentang *foam polyurethane* menyoroti kekuatan *fatigue* dan modulus elastisitasnya, namun belum terkait secara langsung dengan aplikasi *cover* prostetik (*EPUC fatigue composites*) [10].

Penelitian lebih lanjut mengenai *Foam Liner* yang menggabungkan *PU* dan *EVA* dalam struktur *sandwich* menunjukkan bahwa elastisitas *PU foam* lebih tinggi

daripada *EVA* atau *Pelite™* ketika dikenai beban tarik [11]. Dalam studi tersebut juga ditemukan bahwa *PU foam* dapat mengurangi tekanan pada jaringan *residual limb*, sehingga kenyamanan pengguna saat berjalan dapat meningkat. Namun, konteks tersebut berfokus pada *liner socket*, bukan pada *cover* kaki prostetik *ESAR*.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pertanyaan yang diangkat pada riset dalam studi ini adalah: Apakah *resin polyurethane* dapat digunakan secara efektif dalam proses desain dan produksi *cover* kaki prostetik *ESAR*, khususnya dalam hal peningkatan durabilitas dan efisiensi produksi? Berdasarkan tujuan tersebut, hipotesis yang diajukan menyatakan bahwa *resin polyurethane* memiliki performa mekanik yang lebih unggul dibandingkan material konvensional dan dapat diimplementasikan secara praktis dalam produksi *cover* prostetik masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disusun, maka telah ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Apakah *cover* kaki prostetik jenis *ESAR* dengan material *resin polyurethane* dapat diproduksi menggunakan metode *casting* dengan cetakan hasil *3D printing* (*mold* dengan *Fused Deposition Modeling* material *PLA+* dan *core* dengan *Stereolithography* material resin fotopolimer)?
2. Bagaimana proses manufaktur yang optimal untuk *cover* kaki prostetik *ESAR* berbahan *resin polyurethane TPU 70*?
3. Bagaimana performa *cover* kaki prostetik *ESAR* dengan material *resin polyurethane* terhadap beban berulang (*fatigue*)?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki ruang lingkup yang telah ditentukan agar pembahasan lebih terarah dan mendalam. Oleh karenanya, terdapat beberapa batasan masalah yang diterapkan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada desain dan manufaktur *cover* luar kaki prostetik tipe *Energy Storage and Return (ESAR)*, bukan bagian lain maupun keseluruhan sistem prostetik.

2. Material utama yang digunakan adalah *resin polyurethane* tipe *TMPU 70*, dengan rasio pencampuran komponen A(*polyol*) dan B(*isocyanate*) sebesar 1,1:1. Rasio ini ditetapkan berdasarkan hasil penelitian dan proses optimasi sebelumnya, dengan mempertimbangkan karakteristik elastisitas, sifat mekanik, dan ketahanan *fatigue* yang paling sesuai untuk aplikasi *cover* kaki prostetik *ESAR*.
3. Proses manufaktur difokuskan pada metode *casting*, dengan cetakan (*mold*) dan inti (*core*) yang diproduksi dengan *3D printing* berbahan *PLA+* dan resin fotopolimer.
4. Pengujian terbatas hanya uji visual dan uji *preliminary fatigue* mekanis hingga 100.000 siklus, tanpa melakukan pengujian biokompatibilitas, uji ketahanan terhadap cuaca, atau uji coba kenyamanan terhadap pengguna (*user trials*).

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mendesain dan memproduksi *cover* kaki prostetik tipe *ESAR* menggunakan material utama *resin polyurethane TMPU 70*, dengan metode produksi *casting* berbasis *mold* dan *core* hasil *3D printing*.
2. Untuk mengidentifikasi proses manufaktur yang optimal pada *cover* kaki prostetik *ESAR* berbahan *resin polyurethane TMPU 70*.
3. Untuk mengetahui performa *fatigue* dari *cover* kaki prostetik *ESAR* dengan material *resin polyurethane TMPU 70* pada uji *preliminary fatigue* untuk mengukur ketahanannya terhadap beban berulang.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat memberikan alternatif material baru yaitu *resin polyurethane TMPU 70* untuk *cover* kaki prostetik tipe *ESAR* yang memiliki sifat mekanik yang lebih baik daripada material konvensional, elastisitas tinggi, dan tahan terhadap beban berulang (*fatigue*).
2. Menawarkan pendekatan proses manufaktur yang efisien, dengan menggabungkan teknologi *3D printing* (*FDM* dan *SLA*) dan proses *casting*,

yang dapat diaplikasikan pada produksi komponen prostetik secara lebih cepat dan terjangkau.

3. Untuk memberikan andil dalam kontribusi ilmiah sebagai referensi untuk penelitian lebih lanjut di bidang desain, material, dan proses manufaktur dunia prostetik, khususnya dalam pemanfaatan material *resin polyurethane*.

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan Tugas Akhir ini menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang uraian latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan yang berisikan alur isi keseluruhan dari laporan ini.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Membahas kajian literatur dan referensi teori yang relevan dengan penelitian ini, termasuk konsep dasar kaki prostetik *ESAR*, material *resin polyurethane*, *casting*, dan pengujian *fatigue*.

BAB 3 : METODE PENELITIAN

Menjelaskan langkah penelitian yang dilakukan, mulai dari alur penelitian, alat dan bahan yang digunakan, perancangan, hingga fabrikasi dan pengujian.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Memaparkan hasil dari proses desain dan manufaktur *cover* kaki prostetik *ESAR*, termasuk evaluasi desain *mold*, hasil fabrikasi, dan hasil pengujian *preliminary fatigue*.

BAB 5 : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian yang sudah dilakukan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian tentang teknologi kaki prostetik telah mengalami perkembangan yang pesat, khususnya yang bertujuan untuk mengembalikan fungsi normal tubuh manusia saat berjalan. Selama ini, kaki prostetik yang paling umum digunakan adalah jenis *Solid Ankle Cushioned Heel (SACH) foot*, yang mana prostetik ini dapat menyerap sebagian dampak saat berjalan namun tidak bisa mereplikasi kinematika dan kinetika gaya berjalan alami manusia [12]. Salah satu inovasi untuk meniadakan keterbatasan ini adalah pengembangan kaki prostetik jenis *Energy Storage and Return (ESAR)*. Studi menjelaskan bahwa *ESAR* sudah eksis selama beberapa dekade, dimana bagian dari prostetik jenis ini meliputi komponen karbon fiber atau komponen lain yang bisa menjadi pegas yang berfungsi menyimpan energi mekanik selama fase tumpuan (*stance*) dan melepaskan energinya selama fase dorong (*push-off*). Mekanisme tersebut mampu meningkatkan efisiensi langkah, dan mengurangi beban energi yang harus dikeluarkan oleh pengguna [3].

Meskipun performa dari kaki prostetik *ESAR* sangat dipengaruhi oleh komponen internalnya, seperti desain dan material rangka *ESAR*, namun bagian luar prostetik atau biasa disebut dengan *cover* menjadi salah satu faktor penting yang mempengaruhi baik atau tidaknya kualitas kaki prostetik *ESAR*. *Cover* berfungsi untuk melindungi struktur internal dari faktor mekanik seperti gesekan atau tekanan, dan dari faktor kimia atau lingkungan, sekaligus memperkuat aspek estetika kaki prostetik agar menyerupai visual kaki manusia asli [13]. Beberapa sumber literatur menyatakan bahwa tingkat kenyamanan dan kepuasan pengguna tidak hanya dipengaruhi oleh mekanisme kaki prostetik, namun juga oleh tampilan visual *cover* kaki prostetik tersebut [14].

Umumnya, selama ini *cover* kaki prostetik menggunakan material seperti silikon, karet, *EVA*, dan *PVC (Polyvinyl Chloride)*. Material tersebut dipilih karena kemudahannya dalam proses manufaktur dan sifat elastisitasnya yang cukup baik [11]. Namun, dikemukakan dalam beberapa penelitian bahwa material tersebut

rentan terhadap deformasi atau keausan akibat beban berulang (*fatigue material*), terlebih untuk pengguna yang aktif [15]. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan aspek fungsional dan estetika kaki prostetik dalam jangka panjang.

Material yang potensial menggantikan bahan konvensional tersebut adalah *resin polyurethane (PU)* karena kelebihanannya seperti dalam hal elastisitas yang baik, kekuatan *fatigue* nya yang unggul, dan ketahanan kimia yang tinggi [11]. Pemanfaatan *resin PU* khususnya untuk aplikasi *cover* kaki prostetik *ESAR* belum banyak dibahas dalam literatur ilmiah. Selama ini penelitian mengenai *resin polyurethane* lebih banyak difokuskan untuk aplikasi seperti *PU* sebagai *shock absorber*, *liner socket* atau pelapis dalam (*inner line*) untuk kenyamanan pengguna.

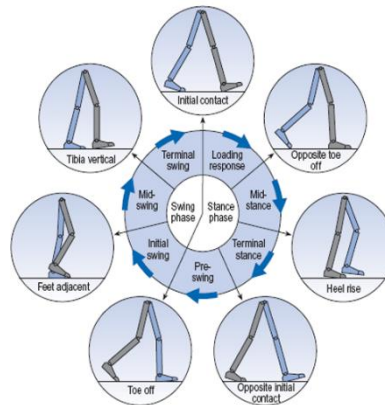
Penelitian ini berfokus untuk mengevaluasi performa *resin polyurethane* sebagai material utama *cover* kaki prostetik jenis *ESAR*. Penelitian difokuskan dalam hal durabilitas material terhadap beban *fatigue* serta kesesuaiannya dengan proses manufaktur modern seperti *3D printing* dan *casting*. Berdasarkan tujuan tersebut, hipotesis yang diajukan menyatakan bahwa *resin polyurethane* memiliki performa mekanik yang lebih unggul dibandingkan material konvensional dan dapat diimplementasikan secara praktis dalam produksi *cover* prostetik masa depan.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Biomekanika *gait cycle*

Gait cycle atau siklus berjalan manusia adalah suatu proses biomekanik yang kompleks yang memiliki dua fase utama, yaitu *stance phase* (fase tumpuan) dan *swing phase* (fase dorong/ayun), yang mencakup beberapa subfase di antaranya [16]. Fase *stance* terjadi ketika kaki menapak atau bertumpu di tanah dan merupakan 60% dari keseluruhan siklus. Fase ini dimulai ketika tumit menyentuh tanah (*initial contact*), lalu dilanjutkan dengan *loading response*, *mid-stance*, *terminal stance*, hingga *pre-swing*. Sedangkan fase *swing* mencakup 40% dari siklus, dimulai saat kaki terangkat dari tanah (*initial swing*), lalu *mid-swing*, hingga kaki akan kontak ke tanah lagi pada fase *terminal swing* seperti pada Gambar 2.1. Setiap fase berjalan memiliki peran spesifik dalam hal biomekanik, seperti

peredaman gaya impact, penopangan keseimbangan tubuh, dan dorongan untuk melangkah.



Gambar 2.1. Fase dalam *gait cycle* [17].

Dalam sudut pandang biomekanik, fase *stance* sangat menentukan kestabilan dan efisiensi saat berjalan. Di fase *loading response*, gaya impact yang didapat diserap oleh otot-otot ekstremitas bawah yang berfungsi menstabilkan tubuh. Lalu dalam fase *mid-stance* dan *terminal stance*, energi dari sifat elastis otot disimpan dalam struktur pasif seperti *tendon achilles* atau dalam konteks prostetik yaitu pegas, yang selanjutnya energi tersebut dilepaskan kembali pada fase *push-off* [18]. Mekanisme penyimpanan dan pelepasan energi ini mengurangi konsumsi energi metabolik dan meningkatkan efisiensi saat berjalan, dan mekanisme tersebut juga yang mendorong adanya riset kaki prostetik yang mampu mereplikasi prinsipnya [19]. Oleh karenanya pemahaman mengenai *gait cycle* ini dinilai sangat penting dalam pengembangan kaki prostetik, khususnya tipe *Energy Storage and Return (ESAR)*.

2.2.2 Kaki prostetik tipe *ESAR*

Riset pengembangan kaki prostetik jenis *ESAR (Energy Storage and Return)* didorong oleh adanya kebutuhan untuk mereplikasi fungsi otot dan tendon pada pergelangan kaki manusia yang hilang akibat amputasi bagian lutut ke bawah [20]. Prinsip kerja *ESAR* adalah menyimpan energi elastis saat fase tumpuan (*stance*), dan melepaskan energi tersebut pada fase dorong (*push-off*) [3]. Efektivitas *ESAR* tidak hanya dinilai dari data *gait analysis*, namun juga

diperhitungkan dari persepsi pengguna yang merasakan perbedaan kualitas gerak dari sudut pandang biomekanik yang diukur secara konsisten [21].

Dijelaskan lebih lanjut dalam studi *CESR (Controlled Energy Storage and Return)* bahwa kaki prostetik *ESAR* menyimpan energi elastis di tumit pada fase *loading*, lalu menguncinya pada fase *mid-stance*, dan melepaskan energi tersebut pada fase *terminal stance* menggunakan prinsip dari mekanisme pegas yang secara signifikan dapat meningkatkan daya dorong (*push-off power*) tanpa meningkatkan penggunaan energi metabolik secara drastis [22]. Selain itu parameter energi yang dihasilkan *ESAR* juga telah terbukti membantu pengguna menjaga kestabilan tubuh dan mensimetriskan langkah [3].

Desain *ESAR* yang optimal perlu mempertimbangkan geometri, dan *mechanical properties* dari bahan yang telah diuji dalam simulasi seperti pada Gambar 2.2. Penelitian Barattini, dkk. mengemukakan bahwa sangat penting untuk meningkatkan *stiffness* dari struktur *ESAR* sambil tetap menjaga efisiensi energi untuk memaksimalkan performa dari *gait* pengguna kaki prostetik [23].



Gambar 2.2. *Compressive test* menggunakan HT-2402 [4].

Umumnya kaki prostetik *ESAR* menggunakan *carbon fiber prepreg* sebagai material seperti pada Gambar 2.3, yaitu serat karbon yang dilapisi resin epoksi. Pemilihan material tersebut dikarenakan rasio kekuatan dan beratnya yang sangat baik (*strength-to-weight ratio*), dan *chemical properties* yang optimal, yang meningkatkan durabilitas komponennya. Selain itu material ini lebih tahan terhadap berbagai pembebanan daripada material lain seperti *titanium alloys* atau *aluminium* [24]. Literatur lain yang memuat penelitian di Vietnam mengenai

carbon fiber prepreg juga membuktikan bahwa material ini sangat baik dalam menyimpan energi elastis dan menyerap gaya yang dihasilkan pada fase tumpuan [25]. Keunggulan ini berpotensi meningkatkan fleksibilitas kaki prostetik *ESAR* untuk meniru gerak natural manusia saat berjalan.



Gambar 2.3. Kaki prostetik *ESAR*.

2.2.3 Cover kaki prostetik

Kaki prostetik bukan hanya merupakan alat bantu mobilitas, namun juga sebagai penunjang estetika. *Cover* kaki prostetik adalah komponen luar yang berfungsi untuk melindungi sistem internal prostetik, menyerap energi, dan memberikan bentuk menyerupai kaki manusia. *Cover* juga memiliki peran penting untuk melindungi kaki prostetik dari benturan, faktor suhu atau kelembapan, debu, dan memenuhi aspek psikososial penggunaannya dengan meningkatkan penampilan prostetik menyerupai bentuk asli guna meningkatkan kepercayaan diri pengguna [2].

Dalam konteks umum, *cover* prostetik memiliki 2 kategori, yaitu sebagai *cosmetic cover* atau sebagai *protective shell* yang keduanya memiliki fungsi yang berbeda. *Cosmetic cover* lebih berperan pada aspek visual dan digunakan oleh pasien yang menginginkan penampilan natural, sementara *protective shell* didesain lebih kuat dan berfokus melindungi elemen internalnya, utamanya pada contoh kaki prostetik jenis *Energy Storage and Return (ESAR)*. Kaki prostetik jenis ini memiliki mekanisme yang dinamis dan juga cukup sensitif terhadap beban dari luar, oleh karenanya membutuhkan *cover* yang memenuhi aspek *protective shell*.

Biasanya material yang digunakan dalam manufaktur *cover* prostetik meliputi silikon, *Ethylene Vinyl Acetate (EVA)*, karet, dan *Polyvinyl Chloride*

(PVC). Material tersebut dipilih karena kemampuannya menyesuaikan bentuk kompleks dan mudahnya diproduksi [6]. Namun bahan tersebut memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Contohnya pada silikon memiliki tingkat kenyamanan dan elastisitas yang baik, namun rentan terhadap aus. Di samping itu, EVA biasanya ringan, namun cepat terdeformasi jika digunakan secara aktif. PVC memiliki sifat yang cukup kaku dan harganya yang murah, tetapi fleksibilitasnya rendah dan kurang nyaman untuk penggunaan jangka panjang [7].

Oleh karenanya, banyak riset yang mengkaji material alternatif untuk *cover* kaki prostetik, di antaranya adalah *resin polyurethane*. Material ini cenderung lebih tahan terhadap aus, dengan densitas rendah yang membuatnya ringan, dan *tensile strength* yang lebih baik daripada material konvensional, menjadikan *resin polyurethane* sangat potensial dalam pengaplikasiannya pada prostetik ESAR. [9].

2.2.4 *Resin polyurethane*

Polyurethane (PU) adalah elastomer dari hasil reaksi dua komponen yaitu polioliol (komponen A) dan isosianat (komponen B). Material ini bersifat fleksibel, memiliki ketahanan aus baik, dan kekuatan mekanik tinggi. *Resin polyurethane* banyak dimanfaatkan dalam dunia teknik dan medis untuk aplikasi yang memerlukan elastisitas dan *mechanical properties* yang baik, salah satunya adalah dalam bidang prostetik [26].

Salah satu kelebihan material *polyurethane* yaitu memiliki kemampuan yang baik dalam mempertahankan struktur dan bentuknya saat terkena beban dinamis dan siklik. Sejumlah penelitian telah menguji material ini dan hasilnya *polyurethane* mampu menahan beban berulang (*fatigue*) dalam jumlah besar tanpa terdeformasi plastis atau retak strukturnya [27]. Sifat material ini menjadikannya potensial untuk komponen prostetik yang mengalami beban berulang, seperti pada *cover* kaki prostetik ESAR.

Di samping ketahanannya yang baik terhadap beban *fatigue*, penelitian Kurzydłowski et al. (2017) membuktikan ketahanan *resin polyurethane* terhadap abrasi dan keausan yang tinggi. Komposisi *polyurethane* dengan *soft segment (SS)* sebesar 70% dari bobot menunjukkan keausan (*wear volume*) paling rendah ($\sim 73 \pm 5 \text{ mm}^3$) dibandingkan dengan rasio lain [28]. Studi lain mengenai aplikasi

komposit *polyurethane* menunjukkan bahwa *PU* tetap memiliki performa yang sangat baik bahkan setelah proses *UV*, *aging*, atau *shock thermal* [29].

Selanjutnya, *PU* sering juga diaplikasikan sebagai material pelapis (*liners*, *wheels*, *wear pads*), dan berbagai aplikasi industri yang menggantikan penggunaan karet dan logam konvensional karena kemampuan *PU* untuk menjaga struktur permukaannya meskipun terkena kontak gesekan yang intensif, membuatnya kandidat ideal sebagai material *cover* kaki prostetik *ESAR* [30].

2.2.5 SolidWorks 2022

SolidWorks merupakan perangkat lunak berbasis *CAD* (*computer aided design*) yang banyak digunakan dalam desain dan rekayasa produk. Dalam konteks *3D modeling*, analisis, simulasi, dan desain *part* maupun *assembly*, software ini sepenuhnya memfasilitasi proses iteratif dan personalisasi bentuk dan geometri prostetik sesuai dengan anatomi yang diinginkan [31].

Dalam proses perancangan *cover* kaki prostetik *ESAR*, SolidWorks mendukung integrasi dengan alat manufaktur seperti *3D printer*. *Mold* dan *core* yang digunakan dalam penelitian ini didesain menggunakan SolidWorks, termasuk dalam pembuatan *parting lines*, *injection angle*, dan konsep *mold* dan *core* modular layaknya lego untuk mempermudah proses pencetakan dan perakitan.

Di samping itu, SolidWorks juga memiliki fitur *assembly* yang digunakan untuk mensimulasikan perakitan *mold* dan *core* untuk meminimalisir terjadinya *error* atau kesalahan dalam proses desain. Dalam konteks perancangan *cover* prostetik, *software* ini menawarkan fitur *surfacing* yang memungkinkan pengguna mendesain bentuk dinamis seperti kontur kaki manusia. Fitur tersebut memudahkan dalam pembuatan geometri halus dengan presisi, yang mana juga kompatibel untuk merekonstruksi hasil *3D scan*. Secara keseluruhan *software* SolidWorks telah menyediakan fitur lengkap dari desain, simulasi, hingga persiapan manufaktur yang sangat mendukung riset pengembangan *cover* kaki prostetik *ESAR*.

2.2.6 3D printing

3D printing, atau disebut juga sebagai *additive manufacturing*, adalah metode manufaktur yang membentuk objek desain tiga dimensi secara bertahap baik dari bawah ke atas maupun dari atas ke bawah, bergantung pada model digital dan mesin *3D printer* yang digunakan. Teknologi ini telah menjadi inovasi industri manufaktur karena kemampuannya mencetak geometri kompleks tanpa memerlukan cetakan, serta memungkinkan membuat produk personal dengan biaya yang terjangkau dan waktu produksi yang relatif singkat [32].

3D printing telah memberikan manfaat secara signifikan dalam perkembangan dunia medis dan prostetik, utamanya dalam produksi perangkat yang disesuaikan dengan morfologi setiap individu. Dengan memanfaatkan data pemindaian tiga dimensi dari bagian tubuh pasien, perangkat prostetik memungkinkan untuk dirancang secara digital dan dimanufaktur langsung dengan geometri yang akurat. Hal tersebut dapat memangkas biaya dan waktu produksi, serta meminimalisir adanya kesalahan dalam proses manufaktur.

Penelitian ini memanfaatkan *3D printing* dalam proses produksi cetakan (*mold*) dan inti cetakan (*core*) untuk manufaktur *cover* kaki prostetik *ESAR*. *Mold* dicetak dengan teknologi *Fused Deposition Modeling (FDM)* menggunakan material *PLA+*, karena metode ini lebih ekonomis dan sesuai untuk komponen dengan ukuran besar, meskipun membutuhkan proses *finishing* tambahan seperti dempul dan amplas. Sedangkan *core* dicetak melalui teknologi *Stereolithography (SLA)* yang memiliki tingkat akurasi dan detail yang tinggi karena penggunaan resin fotopolimer yang dipadatkan dengan paparan sinar UV. Kombinasi kedua metode tersebut memberikan efisiensi dalam hal kecepatan produksi dan akurasi geometri.

2.2.7 Casting

Casting merupakan salah satu metode manufaktur yang digunakan untuk memberikan bentuk pada produk dari material cair dengan cara menuangkannya ke dalam cetakan (*mold*) dengan bentuk tertentu, lalu material tersebut dibiarkan untuk mendingin dan mengeras sesuai bentuk *mold* [33]. Metode ini dapat diaplikasikan pada berbagai material, seperti logam, keramik, polimer, hingga

resin. Berbeda dengan metode *injection molding* yang menggunakan tekanan untuk mendorong material ke dalam *cavity mold*, metode *casting* memanfaatkan gaya gravitasi atau menggunakan tekanan yang rendah, memungkinkan metode ini dilakukan tanpa mesin bertekanan tinggi.

Metode *casting* memiliki fleksibilitas tinggi untuk memproduksi komponen prostetik, khususnya dalam mengakomodasi geometri kompleks dan bentuk anatomi yang detail. Proses *casting* ini memiliki beberapa tahapan utama, yaitu persiapan *mold* dan *core*, *mixing* atau *melting* material, penuangan (*pouring*), *curing* atau pengerasan, lalu *demolding* untuk mengeluarkan produk dari cetakan. Keberhasilan proses *casting* sangat dipengaruhi oleh banyak hal seperti desain *mold*, karakteristik material, dan sistem ventilasi *mold* untuk mengeluarkan udara yang terjebak guna menghindari cacat seperti *void*.

Pengaplikasian material *resin polyurethane* dalam metode *casting* untuk *cover* kaki prostetik memberikan keunggulan karena kemampuan material ini dalam mengisi *cavity mold* secara menyeluruh. Selain itu, proses ini relatif sederhana dan tidak memerlukan peralatan industri yang kompleks, sehingga dapat dilakukan dengan fasilitas yang lebih terbatas. Hal ini tidak hanya memudahkan alur fabrikasi, namun juga menekan biaya produksi.

2.2.8 Pengujian *fatigue*

Pengujian *fatigue* adalah metode penting untuk mengevaluasi kekuatan material menahan beban berulang atau beban siklik yang mereplikasi kondisi nyata aplikasi material dalam jangka waktu yang panjang. Pada material elastomer dan polimer, *fatigue* terjadi saat material tersebut mengalami akumulasi kerusakan mikro akibat tegangan atau regangan berulang, yang pada akhirnya menyebabkan retak dan kegagalan struktur. Umumnya *fatigue* dimulai dari retakan mikro yang terjadi pada titik lemah material atau produk, kemudian retakan-retakan mikro tersebut saling terhubung hingga terjadi retakan yang lebih besar [35]. Oleh karenanya, pengujian *fatigue* diperlukan untuk mengetahui umur pakai suatu produk, terkhusus pada komponen prostetik yang mengalami beban siklik setiap kali digunakan.

Pengujian *fatigue* pada kaki prostetik diatur menggunakan standar ISO 22675:2024 dan ISO 10328 yang dilakukan menggunakan mesin *cyclic loading* yang memberikan beban tekan atau tarik secara berulang yang umumnya dilakukan sebanyak 2 juta siklus. Dalam pengujian *fatigue* untuk material *polyurethane*, studi membuktikan bahwa material ini mampu mempertahankan strukturnya lebih lama daripada material elastomer lainnya seperti *EVA* dan silikon, hal ini dikarenakan sifat mekanik *polyurethane* yang baik. Hal tersebut dibuktikan dalam salah satu studi yang menunjukkan bahwa *polyurethane* tipe solid elastomer memiliki umur *fatigue* yang lebih lama saat diuji dengan pembebanan berulang siklus (*low-cycle*) maupun tinggi (*high-cycle*) [35].

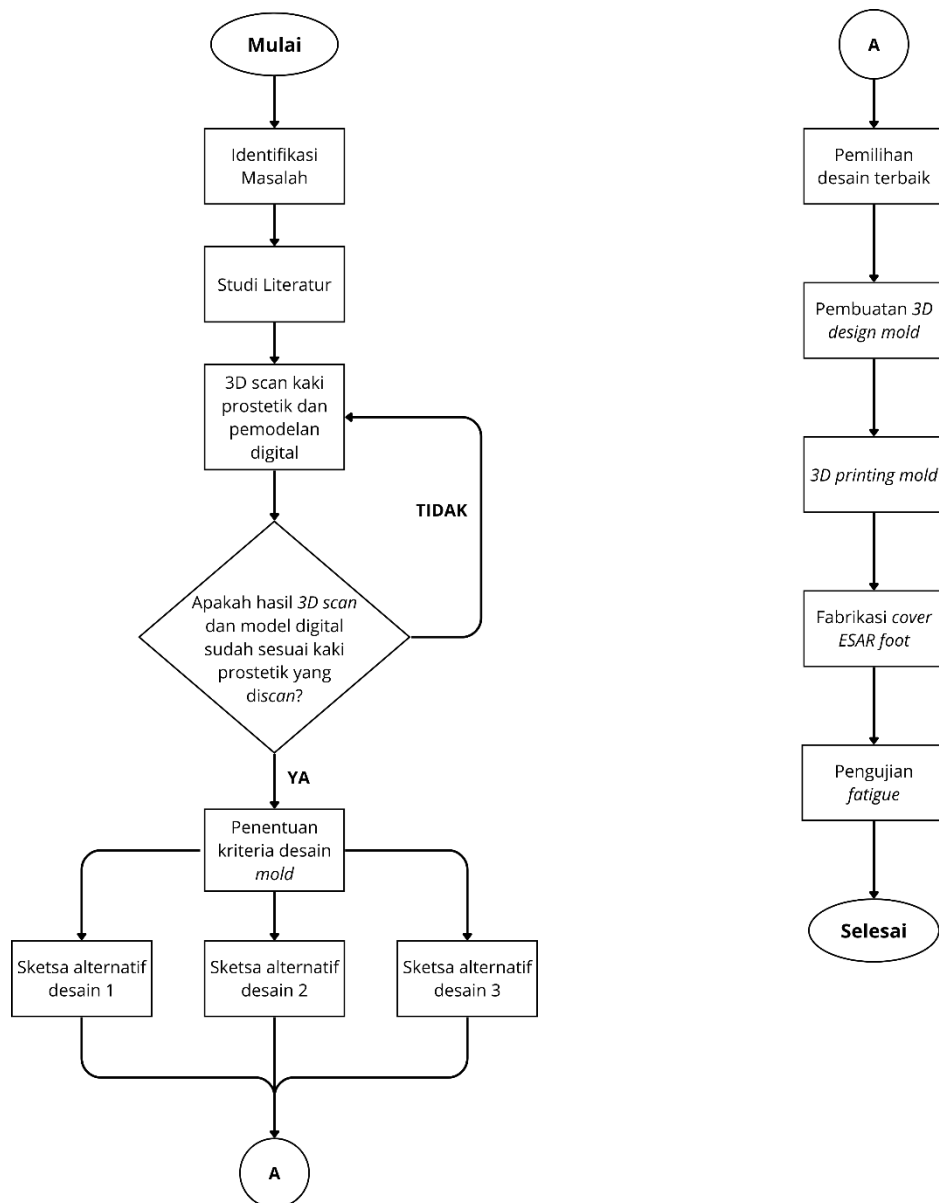
Dalam penelitian lain dijelaskan bahwa material *polyurethane* yang dipadukan dengan serat karbon (CF-PU) menunjukkan bahwa *polyurethane* memiliki kekuatan *fatigue* yang stabil dalam jangka waktu panjang. Hal tersebut sangat relevan jika diaplikasikan pada *cover* kaki prostetik *ESAR* yang mengalami beban siklik saat digunakan untuk berjalan [36]. Dengan mengadaptasi pengujian *fatigue* ini, kekuatan material *resin polyurethane* terhadap beban berulang dapat diukur secara obyektif dan dapat dievaluasi kelayakan materialnya untuk aplikasi prostetik.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan sistematis dan terstruktur untuk mencapai tujuan penelitian yang sudah ditetapkan. Tahapan tersebut dirangkai dalam diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

3.2 Kriteria Desain

Dalam perancangan *cover* kaki prostetik jenis *ESAR*, ditentukan sejumlah kriteria desain *mold*nya agar hasil perancangan tidak hanya fungsional, namun juga baik dalam aspek estetika, ergonomi, dan kelayakannya untuk diproduksi. Kriteria yang perlu dipenuhi desain *mold cover* kaki prostetik *ESAR* dibagi menjadi dua, yaitu kriteria *must* (diharuskan) dan *want* (diinginkan).

3.2.1 Kriteria *must*

Kriteria *must* adalah persyaratan utama yang wajib dipenuhi agar *mold* dan *core* dapat berfungsi dengan baik sesuai kebutuhan manufaktur dan aplikasi prostetik. Kriteria tersebut meliputi:

1. Desain *mold* yang kompatibel dengan *ESAR foot* secara dimensi dan fungsi *ESAR*.
2. *Mold* dan *core* dari *3D print* harus sesuai dengan metode produksi *casting*, baik secara desain maupun material.
3. Desain memungkinkan *cover* prostetik dapat dilepaskan tanpa merusak *mold*, *core*, maupun produk.

3.2.2 Kriteria *want*

Kriteria *want* adalah kriteria tambahan yang bersifat opsional namun penting, karena dapat meningkatkan kemudahan proses produksi, dan kualitas hasil akhir. Kriteria tersebut meliputi:

1. Desain *mold* dan *core* modular selayaknya *lego-style plug & play*, untuk memudahkan proses *assembly* dan perbaikan bagian tertentu tanpa harus mengganti keseluruhan bagian.
2. Desain memiliki sirkulasi udara untuk meminimalisir gelembung udara yang terjebak di dalam resin selama proses *casting*.

3.3 Peralatan dan Bahan

Untuk menunjang seluruh tahapan dalam penelitian ini, diperlukan sejumlah alat dan bahan yang digunakan dalam setiap proses desain dan

manufaktur *cover* kaki prostetik jenis *ESAR*. Pemilihan alat dan bahan yang disebutkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 telah disesuaikan dengan kebutuhan fungsional, dan efisiensi waktu.

Tabel 3.1. Tabel peralatan.

No	Peralatan	Fungsi
1	Laptop	Perangkat pra perancangan, perancangan, hingga penulisan laporan
2	<i>3D scanner</i> EinScan-SE	<i>Scan</i> kaki prostetik yang sudah eksis
3	SolidWorks 2022	Perangkat lunak desain dan simulasi <i>cover</i> , <i>mold</i> , dan <i>core</i>
4	FlashPrint 5	Perangkat lunak slicing mesin 3D print FDM
5	Anycubic Photon Workshop	Perangkat lunak slicing mesin 3D print SLA
6	Mesin <i>3D printer</i> <i>FDM</i>	Mencetak cetakan luar (<i>mold</i>) menggunakan material <i>PLA+</i>
7	Mesin <i>3D printer</i> <i>SLA</i>	Mencetak <i>core</i> dengan menggunakan resin UV
8	Timbangan digital	Mengukur berat <i>resin polyurethane</i> secara presisi
9	<i>Air vacuum</i>	Meminimalisir dan menghilangkan udara yang terjebak di dalam resin
10	Alat pengaduk manual	Mencampur <i>resin polyurethane</i> komponen A dan B secara merata
11	Amplas	<i>Finishing</i> permukaan <i>mold</i> dan <i>core</i> agar hasil akhir lebih halus dan presisi
12	Kunci pas	Memasang dan membuka mur dan baut
13	Mur dan baut	Mengunci <i>mold</i> dan <i>core</i> di posisi <i>steady</i>
14	Injektor	Menginjeksikan resin ke dalam <i>mold</i>
15	<i>Cutter</i>	<i>Finishing cover</i> kaki prostetik

16	Jangka sorong dan mistar	Mengukur geometri <i>mold</i> , <i>core</i> , <i>cover</i> kaki prostetik, dan <i>ESAR foot</i>
17	<i>ESAR foot</i>	Sebagai rangka <i>cover</i> kaki prostetik
18	Mesin uji <i>fatigue</i> (<i>Cyclic loading machine</i>)	Melakukan pengujian ketahanan <i>cover</i> kaki prostetik terhadap beban siklik

Tabel 3.2. Tabel bahan.

No	Bahan	Fungsi
1	<i>Resin Polyurethane TPU 70</i>	Material utama pembuatan <i>cover</i> prostetik
2	Filamen <i>PLA+</i> (<i>Polylactic Acid Plus</i>)	Material utama untuk mencetak <i>mold</i> menggunakan printer <i>FDM</i>
3	Resin UV (<i>photopolymer resin</i>)	Mencetak <i>core</i> dengan printer <i>SLA</i>
4	Lem G (<i>super glue</i>)	Menyambung bagian <i>mold</i> modular hasil <i>3D print</i>
5	Dempul plastik	Meratakan permukaan <i>mold</i> dan <i>core</i>
6	Pigmen warna	Membuat warna <i>resin polyurethane</i> agar menyerupai warna natural kulit kaki manusia
7	Sarung tangan	Peralatan keselamatan kerja saat mencampur dan menangani resin kimia
8	<i>Release agent</i>	Bahan pelapis <i>mold</i> dan <i>core</i> agar tidak lengket ke resin dan memudahkan proses <i>demolding</i>
9	<i>Mixing chamber</i>	Wadah untuk mencampur <i>resin polyurethane</i> komponen A dan B

3.4 Perancangan

Dalam penelitian ini, tahap perancangan adalah fase penting yang menentukan geometri, presisi, dan kualitas produk akhir yaitu *cover* kaki prostetik

jenis *ESAR*. Proses ini dibagi menjadi beberapa tahapan yang dimulai dari pemindaian tiga dimensi geometri kaki prostetik, lalu perancangan model digital dan pendesainan cetakan yang terdiri dari *mold* dan *core*, dan proses *slicing* untuk tahapan *3D printing*.

3.4.1 3D scan kaki prostetik

3D scan atau pemindaian tiga dimensi terhadap bentuk kaki prostetik merupakan tahap awal proses perancangan *cover* kaki prostetik *ESAR*. Proses ini dilakukan dengan menggunakan mesin *3D scanner* EinScan-SE berbasis fotogrametri yang menghasilkan data digital dengan format *.STL* (*Stereolithography*). Data yang didapatkan adalah representasi kontur dan dimensi dari kaki prostetik yang diolah menggunakan *software SolidWorks 2022*. Tahapan ini bertujuan untuk mengekstrak geometri yang presisi sehingga desain *cover* dapat disesuaikan dengan akurat.

3.4.2 Desain cover kaki prostetik

Desain *cover* dibuat dengan tetap mempertahankan kontur alami kaki prostetik tersebut untuk menjaga estetika, dengan sedikit perubahan minor pada beberapa bagian guna menyesuaikan dengan rangka *ESAR foot* dan memudahkan proses pencetakan. *Cover* didesain untuk menyisakan ruang toleransi yang cukup agar *ESAR foot* dapat dipasang dengan mudah dan tidak mudah terlepas, serta memberikan ruang untuk sistem pegasnya dapat bekerja secara maksimal.

Sejumlah fitur juga dipertimbangkan dalam proses perancangan *cover*, yang meliputi ketebalan dinding *cover* (*wall thickness*) minimal sekitar 3-5 mm, cara pelepasan *mold*, arah penguncian rangka *ESAR foot*, *casting angle*. Dilakukan juga simulasi *assembly cover* dan rangka *ESAR* guna meminimalisir kesalahan dalam proses perancangan dan manufaktur. Desain ini juga disesuaikan dengan pengguna dengan frekuensi aktivitas tinggi, sehingga pada titik-titik yang berada di bawah beban tekan langsung seperti tumit dan telapak kaki depan telah diperkuat dengan peningkatan ketebalan, sementara pada area yang membutuhkan fleksibilitas seperti bagian punggung kaki didesain lebih ramping.

Secara keseluruhan, *cover* kaki prostetik *ESAR* ini didesain untuk memenuhi aspek perancangan dengan tetap memperhatikan kenyamanan pengguna, serta dipersiapkan untuk melewati metode produksi *casting* menggunakan *mold* dan *core* hasil *3D printing*. Model akhir kemudian disimpan untuk tahapan desain *mold* dan *core* beserta mensimulasikan posisinya pada proses *casting*.

3.4.3 Desain *mold* dan *core*

Setelah desain final dari *cover* kaki prostetik selesai dirancang, maka tahapan berikutnya adalah melakukan pendesainan *mold* (cetakan luar) dan *core* (inti cetakan) yang nantinya akan digunakan sebagai media utama dalam proses *casting* material *resin polyurethane*. Proses ini dilakukan dengan mempertimbangkan prinsip dasar desain *mold* seperti *parting line*, lubang injeksi, cara *assembly* dan *demolding*.

Mold dirancang mengadopsi sistem *plug and play* yang basisnya adalah modular lego, hal ini berarti *mold* dicetak dalam beberapa bagian terpisah untuk menghindari keterbatasan volume maksimal yang dapat dicetak *3D printer*, serta untuk mengurangi risiko kegagalan dalam proses *printing*. Desain sambungan antar modul *mold* dibuat menyerupai sambungan lego, sehingga dapat dirakit secara akurat tiap bagiannya. Untuk proses *finishing*, bagian sambungan *mold* direkatkan satu sama lain menggunakan lem G, lalu selanjutnya dilakukan proses pendempulan dan pengamplasan guna menghaluskan permukaan dalam *mold* dan mencegah adanya cacat pada hasil cetakan.

Sementara itu untuk *core* juga dirancang menggunakan prinsip modular, namun material dan metode perakitannya berbeda. Bagian *core* tersebut dicetak menggunakan *3D printer* resin berbasis *SLA (Stereolithography)*, yang kemudian disambungkan dengan menggunakan resin UV yang dioleskan pada kedua permukaan sambungan, lalu disinari dengan UV di bawah sinar matahari langsung hingga mengeras.

3.4.4 *Slicing mold dan core*

Tahapan selanjutnya setelah perancangan *mold* dan *core* adalah melakukan proses *slicing* untuk mengonversi file .STL menjadi ekstensi berisi bahasa instruksi yang bisa dipahami oleh mesin *3D printer* (.gcode untuk *FDM* dan .pwms/photon untuk *SLA*). Proses ini dilakukan menggunakan *software* yang berbeda-beda, disesuaikan dengan mesin *3D printer* yang digunakan.

Proses pencetakan *mold* yang dilakukan adalah berbasis *Fused Deposition Modeling (FDM)* dengan perangkat lunak yang digunakan adalah FlashPrint 3, yang merupakan *slicer software* resmi dari FlashForge, yaitu *brand 3D printer FDM* yang digunakan pada penelitian ini, dengan tipe printer Adventurer 3. *Software* ini juga dipilih karena kemudahannya untuk mengatur *printing parameter* seperti ketebalan dinding (*wall thickness*) dan densitas isian (*infill density*).

Pada proses *slicing mold*, dipilih ketebalan dinding (*wall thickness*) nya adalah 3,2 mm dengan *infill density* nya 25% menggunakan pola *print octagon*. Nilai *wall thickness* tersebut dipilih untuk optimasi kekuatan dinding cetakan dengan waktu produksi dan konsumsi filamen. Infill 25% dirasa cukup kuat menahan proses *casting resin polyurethane* berulang kali, karena proses tersebut dilakukan tanpa temperatur yang tinggi <60°C atau tekanan yang besar.

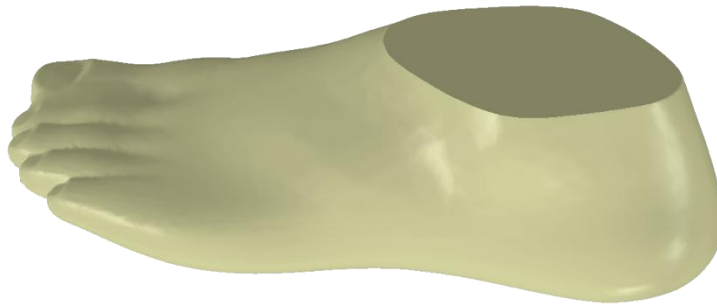
Sementara itu, untuk bagian *core* menggunakan teknologi *Stereolithography (SLA)*, dengan proses *slicing* menggunakan *software* Anycubic Photon Workshop, yang kompatibel dengan printer Anycubic Photon Mono X. Orientasi *core* diposisikan untuk meminimalisir sisi *overhang* dan menghindari struktur terjatuh ke wadah resin. Parameter *layer height* yang dipilih adalah 0,05 mm dengan *normal exposure* 2-3 detik, untuk memastikan antar lapisan merekat dengan sempurna.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

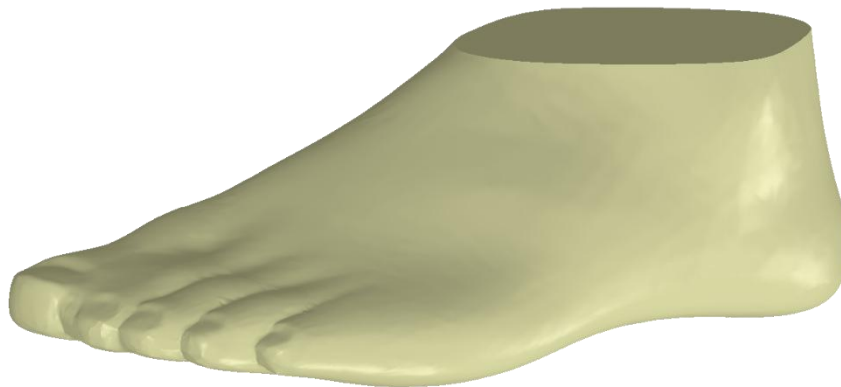
4.1 Hasil 3D Scan Kaki Prostetik

Hasil *3D scan* terhadap kaki prostetik menunjukkan geometri yang akurat dan detail, hanya diperlukan *editing* minor terhadap data hasil *scan* yang didapatkan. Proses ini menggunakan prinsip teknik fotogrametri yang hasilnya adalah model digital dengan format .STL yang kemudian diolah menggunakan *software* SolidWorks 2022. *Surface* yang didapatkan dari hasil *scan* secara umum bersih dan minim noise seperti pada Gambar 4.1 yang merupakan indikasi bahwa kualitas pencahayaan, serta kalibrasi perangkat telah optimal.



Gambar 4.1. Hasil *3D scan* kaki prostetik.

Model digital yang didapatkan telah berhasil menggambarkan bagian-bagian penting dari kaki prostetik, seperti bagian dorsal, plantar, lateral, dan area tumit dengan akurasi yang sangat baik seperti pada Gambar 4.2 Kualitas tersebut sangat krusial menentukan desain *cover* nantinya akan sesuai dengan kaki prostetik dan tidak menimbulkan masalah seperti tekanan yang tidak merata saat digunakan.

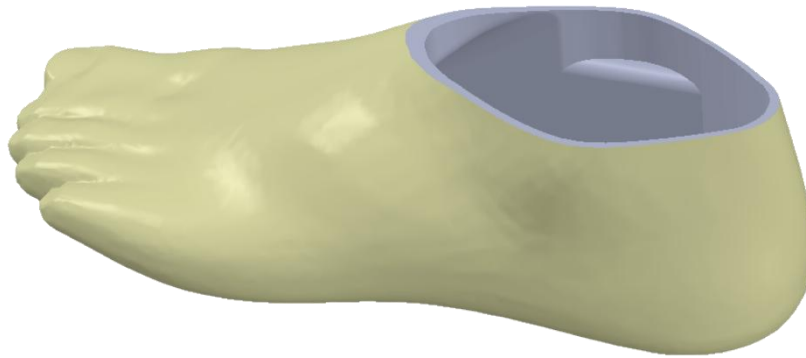


Gambar 4.2. Detail *3D scan* kaki prostetik.

Dengan adanya data hasil scan yang akurat dapat meningkatkan efisiensi waktu yang digunakan untuk membuat model *cover* karena tidak diperlukan lagi pengukuran manual ataupun pendesainan ulang dari nol. Hal ini mengadopsi prinsip desain dengan basis data digital atau *data-driven design* dalam pengembangan penelitian prostetik. *Cover* yang sesuai dengan geometri asli prostetik berpengaruh besar kepada tingkat kenyamanan pengguna, oleh karenanya tahapan ini dinilai berhasil memenuhi tujuan awal dalam perancangan *cover* kaki prostetik *ESAR* secara efisien.

4.2 Desain Cover Kaki Prostetik *ESAR*

Desain *cover* kaki prostetik *ESAR* dirancang melalui proses modeling dan dengan basis hasil *3D scan* kaki prostetik dengan menyesuaikannya terhadap dimensi rangka *ESAR foot*. Desain *cover* tersebut diberi toleransi agar *ESAR foot* dapat dilakukan *assembly* secara presisi namun tetap memudahkan proses pemasangan maupun pelepasan. Proses desain dilakukan dengan tetap memprioritaskan aspek estetika dan fungsional kaki prostetik.



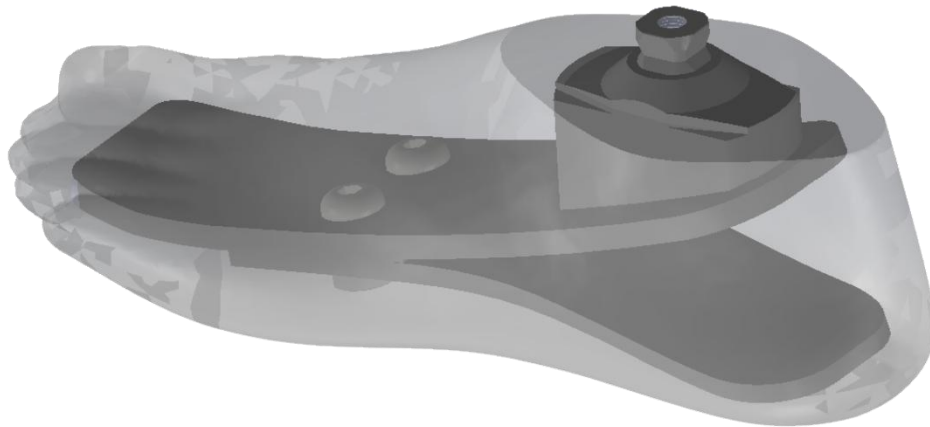
Gambar 4.3. Desain *Cover* kaki prostetik *ESAR*.

Gambar 4.3 memperlihatkan ketebalan dinding *cover* minimal berada di rentang 3 mm – 5 mm. Distribusi ketebalan dibuat tidak seragam, namun disesuaikan dengan karakteristik beban pada masing-masing area. Bagian tumit dan ujung kaki depan didesain lebih tebal guna meningkatkan ketahanan *cover* terhadap beban berulang karena bagian tersebut merupakan titik tumpu utama saat berjalan. Sedangkan area punggung kaki didesain lebih tipis untuk memberikan fleksibilitas dan ruang yang cukup bagi sistem pegas *ESAR foot*.

Desain *cover* kaki prostetik ini juga memfasilitasi fitur penting penunjang *ESAR foot*, seperti sistem pengunci rangka *ESAR* pada tumit dan ujung kaki. Selain itu dilakukan juga simulasi *assembly* antara *cover* dan *ESAR foot* menggunakan *software* yang ditunjukkan Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 guna memastikan kompatibilitas antara dimensi keduanya, kemudahan pemasangan, serta posisi dan sistem pengunciannya.



Gambar 4.4. *Assembly cover* dan *ESAR foot*.



Gambar 4.5. *Assembly cover* tampak transparan dan *ESAR foot*.

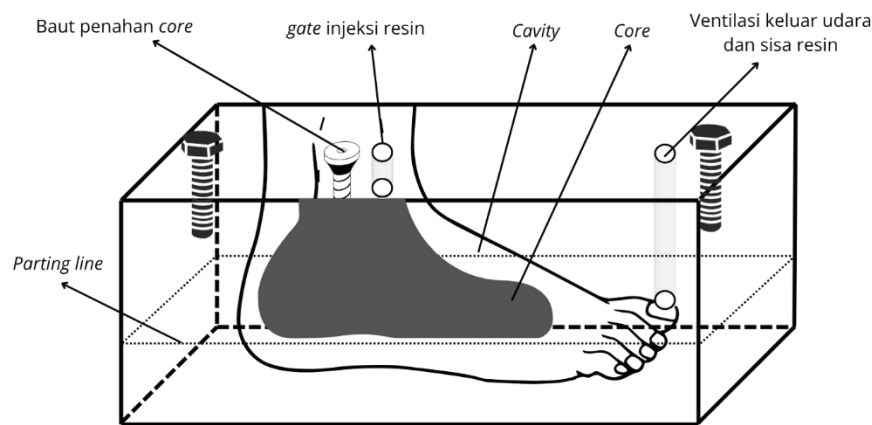
4.3 Pembuatan Alternatif Desain *Mold*

4.3.1 Alternatif desain 1

Desain alternatif pertama seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6 mengadopsi pendekatan *split mold* horizontal menjadi dua bagian (*two-part horizontal mold*)

yang mana objek *cover* kaki prostetik diapit dari sisi atas dan bawah. Desain ini memungkinkan injeksi resin dilakukan dari bagian atas *mold*, dengan lubang injeksi berada di bagian atas tengah *mold* dan saluran ventilasi ditempatkan tepat di atas bagian ibu jari *cover* kaki prostetik guna memfasilitasi keluarnya udara selama proses *casting* dan mencegah terjadinya *void* pada produk akhir.

Sistem *assembly* dan penguncian *mold* atas dan bawah menggunakan baut dan mur untuk menjaga posisi kedua bagian *mold* tetap *steady* selama proses *casting*. Dalam desain *mold* ini, *core* disangga menggunakan baut untuk berada dalam posisi melayang dan memberikan ruang yang presisi untuk resin mengalir ke setiap celah yang ada di dalam *mold*, menghasilkan ketebalan *cover* kaki prostetik *ESAR* sesuai dengan desain.



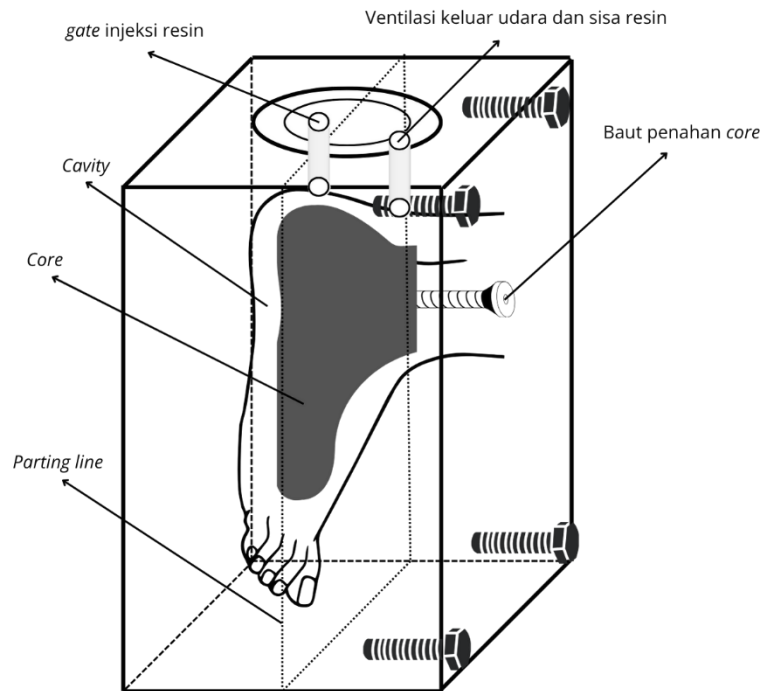
Gambar 4.6. Alternatif desain *mold* 1.

4.3.2 Alternatif desain 2

Desain alternatif *mold* yang kedua pada Gambar 4.7 menggunakan pendekatan *mold* vertikal dengan konfigurasi dua sisi *mold* kiri dan kanan yang membentuk *cavity* sesuai dengan bentuk kaki prostetik. Desain ini memiliki satu lubang injeksi yang ditempatkan di atas yang berfungsi sebagai titik masuknya *resin polyurethane* ke dalam *mold* untuk memenuhi seluruh *cavity*.

Alternatif desain *mold* versi ini memiliki parting line dengan arah vertikal, memisahkan *mold* menjadi dua bagian yaitu *mold* kiri dan kanan. *Core* juga didesain menempel pada *mold* kanan dengan baut sebagai penyangganya di posisi melayang. Mekanisme penguncian *mold* didesain dengan empat buah baut di setiap

sudut *mold* guna menjaga posisinya saat proses *casting*, dengan posisi baut yang tidak mengganggu aliran resin maupun proses pelepasan produk saat proses *curing* telah selesai.



Gambar 4.7. Alternatif desain *mold* 2.

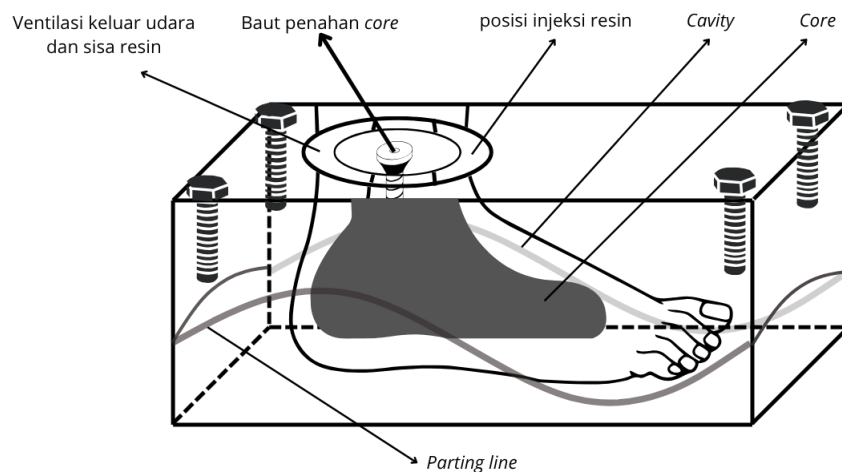
4.3.3 Alternatif desain 3

Alternatif desain *mold* yang ketiga menggunakan konfigurasi horizontal dengan *parting line* menirukan kurva alami kaki yang membagi *mold* menjadi dua bagian, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.8. Pendekatan ini memungkinkan visual *cover* kaki prostetik *ESAR* yang realistis dan mendukung aspek estetika. Lubang injeksi terletak di bagian atas, melingkari kedudukan *core* dan memungkinkan aliran resin *polyurethane* tersebar merata ke seluruh *cavity* dengan cepat.

Core cetakan ini diposisikan menempel di bagian atas *mold*, didesain melayang dengan posisi *steady* untuk memberikan ruang sesuai ketebalan dinding *cover* sesuai dengan desain, dengan geometri yang menyesuaikan bentuk rangka *ESAR*. Di sekitar posisi injeksi resin, terdapat ventilasi udara dengan dimensi yang besar untuk memfasilitasi pelepasan udara yang terperangkap selama proses

casting, sehingga mengurangi risiko terbentuknya gelembung udara atau *void* pada produk.

Posisi lubang injeksi yang besar dan distribusi ventilasi udara yang besar memungkinkan aliran resin lebih cepat dan pengisian *cavity* lebih merata. Terdapat 4 titik penguncian baut juga yang dirancang untuk mencengkram kedua bagian *mold* dengan kuat guna menghindari kebocoran resin dari sela-sela *parting line*.



Gambar 4.8. Alternatif desain *mold* 3.

4.3.4 Evaluasi Terhadap Alternatif Desain *Mold*

Untuk menentukan alternatif desain *mold* yang paling sesuai dengan proses produksi *cover* kaki prostetik *ESAR* menggunakan metode *casting*, maka dilakukan evaluasi terhadap ketiga alternatif desain yang sudah dibuat dalam bentuk sketsa. Evaluasi ini memiliki tujuan untuk mengetahui kemampuan setiap alternatif desain *mold* dalam memenuhi kebutuhan produksi, baik secara fungsional, teknis, dan estetika produk hasil. Dalam pemenuhan tujuan evaluasi tersebut, digunakan pendekatan matriks pengambilan keputusan pada Tabel 4.1, yang mengadopsi beberapa kriteria penting sesuai dengan parameter proses produksi.

Parameter evaluasi tersebut meliputi:

1. Kesesuaian desain *mold* dengan metode produksi *casting*, yaitu seberapa efektif desain dapat diimplementasikan dalam proses injeksi material.
2. Keakuratan posisi *core*, mengingat peran *core* yang sangat esensial terhadap produk baik dari sisi fungsional maupun estetika.

3. Desain jalur injeksi, yang kaitannya dengan kelancaran aliran material selama proses cetak.
4. Desain lubang ventilasi udara, guna memprediksi kemampuan *mold* untuk mengeluarkan udara dan meminimalisir terbentuknya gelembung pada hasil akhir.
5. Estetika produk akhir, untuk menilai dampak desain terhadap estimasi visual hasil cetakan.

Setiap parameter tersebut memiliki bobot sesuai tingkat urgensinya, dan penilaian dilakukan berdasarkan performa dari masing-masing alternatif desain *mold*.

Tabel 4.1. Matriks keputusan alternatif desain *mold*.

No.	Kriteria	Bobot	Desain 1	Desain 2	Desain 3
1	Kesesuaian <i>mold</i> dengan proses <i>casting</i>	25%	8,5	8,5	8
2	Keakuratan posisi <i>core</i>	20%	8	7,5	8
3	Desain jalur injeksi	15%	8,5	8	7,5
4	Desain lubang ventilasi	15%	8	7	8
5	Estetika produk akhir	25%	7	7,5	8,5
	Skor Akhir (Total)	100%	6,75	7,75	8,05

Keterangan:

- Skala penilaian: 1 (kurang baik) hingga 10 (sangat baik)
- Skor akhir dikalkulasi dengan menjumlahkan hasil perkalian antara bobot dan nilai tiap kriteria untuk masing-masing alternatif desain.

Pada matriks pengambilan keputusan ini, penentuan bobot didasarkan pada tingkat kepentingan masing-masing kriteria terhadap keberhasilan proses manufaktur *cover* kaki prostetik jenis *ESAR* dengan metode *casting*. Proses penentuan bobot dilakukan melalui diskusi dengan praktisi di bidang desain *mold* dan tenaga pengajar dengan keahlian di bidang *molding*. Kriteria dengan urgensi yang lebih besar seperti kesesuaian *mold* dengan proses *casting* dan estetika produk akhir diberi bobot lebih besar.

Sementara itu, nilai setiap alternatif desain ditentukan melalui evaluasi terhadap sketsa yang telah dibuat, dengan mempertimbangkan aspek kelancaran aliran resin, efektivitas ventilasi udara, dan kesesuaian dengan metode yang dipakai yaitu *casting*. Penilaian dilakukan bersama dengan tim peneliti dan praktisi menggunakan skala penilaian 1 sampai 10, lalu dikalikan dengan bobot kriteria untuk memperoleh skor akhir.

Mengacu pada penilaian yang telah dilakukan dengan matriks pengambilan keputusan, alternatif desain *mold* yang ketiga memiliki nilai tertinggi diantara alternatif desain *mold* yang lain, maka alternatif desain tersebut yang akan didesain *3D CAD* menggunakan *software* SolidWorks dan kemudian dimanufaktur menggunakan metode *3D printing*.

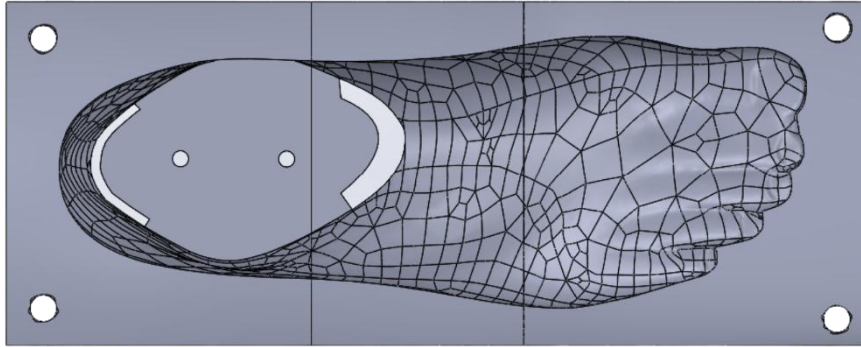
4.4 Desain Mold yang Terpilih

Berdasarkan hasil evaluasi dan penilaian terhadap tiga alternatif desain *mold* menggunakan matriks keputusan, disimpulkan bahwa alternatif desain *mold* ke-3 memiliki keunggulan dalam memenuhi parameter penilaian yang telah ditentukan. Selain itu, desain tersebut dipilih karena mampu memenuhi kriteria desain *must* secara optimal dan melengkapi kriteria *want* seperti sistem ventilasi yang baik guna mengurangi kemungkinan terbentuknya gelembung udara selama proses *casting*.

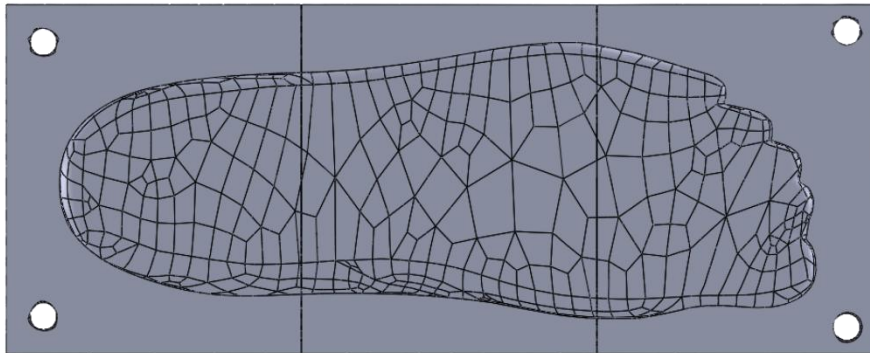
Salah satu aspek terpenting dalam pendesainan *mold* ini adalah bentuk dan posisi *core*. *Core* itu sendiri adalah bagian dari sistem pencetakan yang berfungsi memberikan bentuk bagian dalam *cover* kaki prostetik dan memastikan adanya ruang yang kompatibel dengan rangka *ESAR foot*. Oleh karenanya sangat penting untuk mengatur posisi dan orientasi *core* dengan presisi agar tidak mengganggu distribusi resin ke dalam *mold* untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan desain. Dalam desain ini, *mold* dan *core* dirancang dengan prinsip modular, sehingga memungkinkan keduanya dimanufaktur dan *maintenance* secara terpisah.

Mold dan *core* dalam proses perancangannya didesain menggunakan *software* SolidWorks 2022, yang memungkinkan pemodelan tiga dimensi yang detail dan akurat. Tahapan tersebut mencakup pembuatan *cavity* sesuai dimensi kaki prostetik, lalu penentuan *parting line* yang membagi *mold* menjadi 2 bagian,

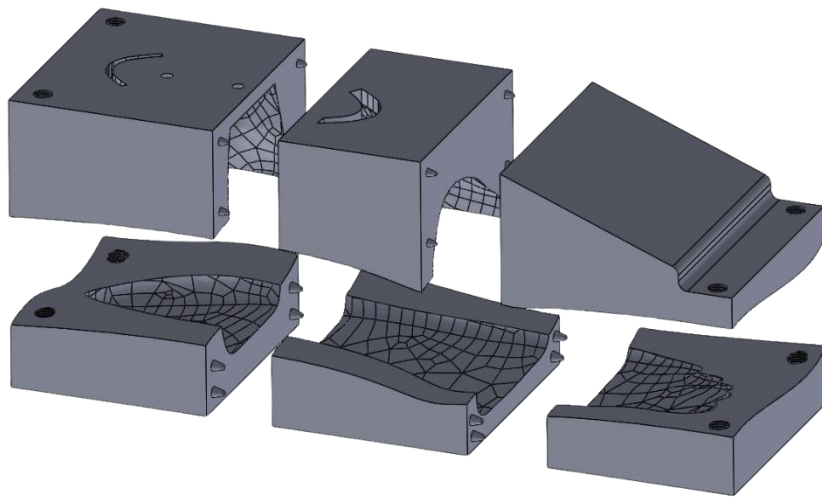
yaitu atas dan bawah. Selain itu adalah pembuatan lubang injeksi dan ventilasi udara, yang mana merupakan jalur dimana resin akan diinjeksikan dan jalur keluarnya udara untuk menghindari *air bubbles*. Gambar 4.9, Gambar 4.10, Gambar 4.11, Gambar 4.12 menunjukkan desain *mold* dan Gambar 4.13, Gambar 4.14 menunjukkan desain *core*, yang keduanya memberikan gambaran bagaimana geometri *cover* kaki prostetik *ESAR* dapat dirancang dan dimanufaktur.



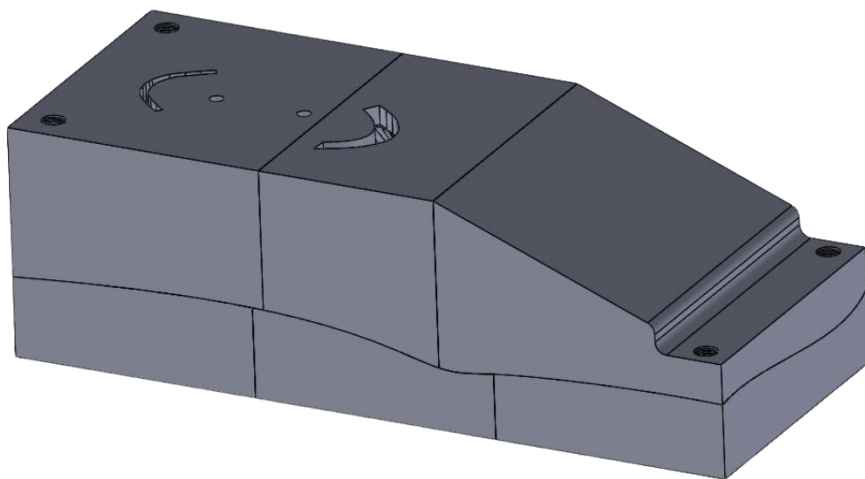
Gambar 4.9. *Mold* atas.



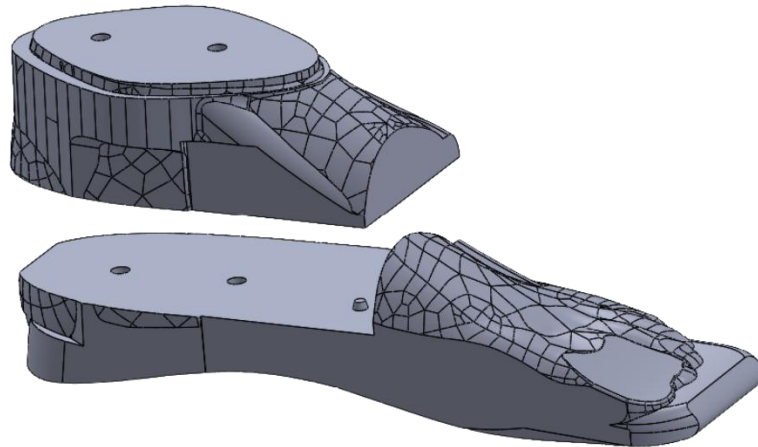
Gambar 4.10. *Mold* bawah.



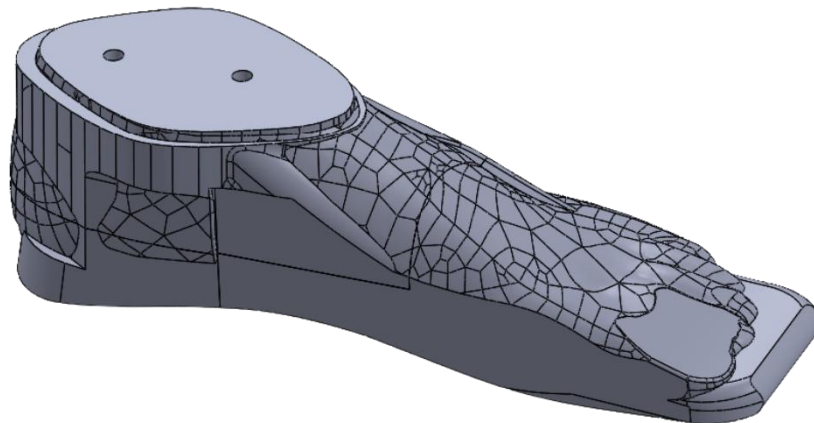
Gambar 4.11. *Mold* modular.



Gambar 4.12. *Mold* modular setelah *assembly*.



Gambar 4.13. *Core modular.*



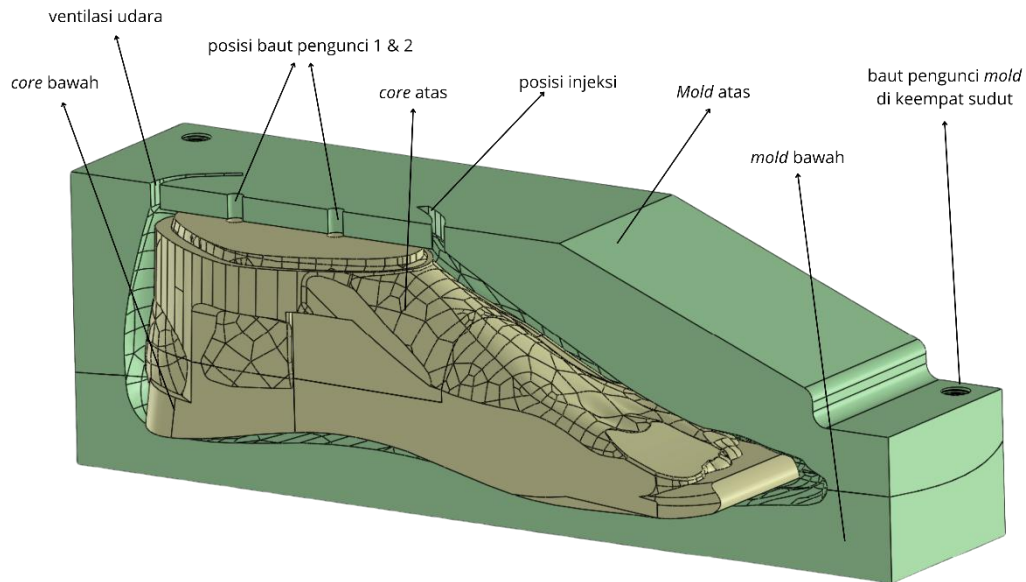
Gambar 4.14. *Core modular setelah assembly.*

Desain *mold* dan *core* tersebut dilakukan dengan presisi untuk memaksimalkan proses *casting*, dan menghindari area yang sulit dijangkau oleh aliran resin. Selain itu, desain *core* modular ditujukan untuk dapat dilepas dengan mudah tanpa merusak atau merobek *cover* yang sudah dicetak, mendukung efisiensi proses *demolding*.

4.4.1 Hasil *assembly mold* dan *core* pada *software*

Gambar 4.15 merupakan *mold* dan *core* yang divisualisasikan menggunakan perangkat lunak, dengan *section view* yang bertujuan memperlihatkan bagian dalam *mold* dengan jelas. Desain *mold* dibagi menjadi 2 bagian, yaitu *mold* atas dan *mold* bawah, yang dibagi menggunakan *parting line* yang mereplikasi bentuk kurva natural kaki manusia. Kedua bagian *mold* tersebut

dikunci menggunakan baut di ke empat sudutnya, dan di dalamnya terdapat *core* dengan posisi melayang di antara *cavity mold* dan dikunci di 2 titik menggunakan baut di sisi depan dan belakang *core* untuk memastikannya berada dalam posisi *steady* selama proses *casting*.



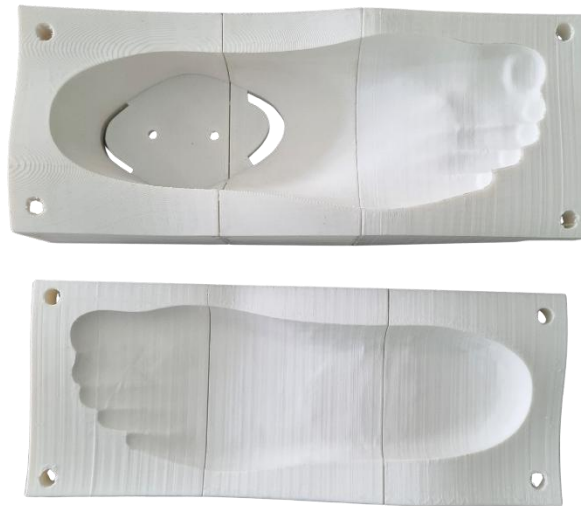
Gambar 4.15. *Assembly mold dan core dengan section view.*

Pada bagian atas *mold* juga terdapat *injection inlet*, yaitu saluran masuk material resin yang memungkinkan resin masuk ke *cavity* menyesuaikan bentuk produk. Selain itu juga terdapat sistem ventilasi udara yang diposisikan di bagian belakang *injection inlet* guna mencegah adanya udara yang terperangkap selama proses *casting* berlangsung. Hasil simulasi *assembly* ini memastikan bahwa seluruh bagian telah terinstal dengan baik yang kemudian siap dimanufaktur dengan teknologi *3D printing*.

4.4.2 Hasil *3D printing mold dan core*

Setelah proses desain dan simulasi pada perangkat lunak *CAD* selesai, lalu tahapan selanjutnya adalah merealisasikan *mold* dan *core* dengan *3D printing*. Pada tahapan ini, dilakukan dengan 2 teknologi berbeda yaitu *Fused Deposition Modeling (FDM)* untuk bagian *mold* dengan material *PLA+* dan *Stereolithography*

(SLA) untuk bagian *core* yang membutuhkan tingkat detail yang tinggi dan permukaan yang lebih halus.



Gambar 4.16. *Mold* modular.

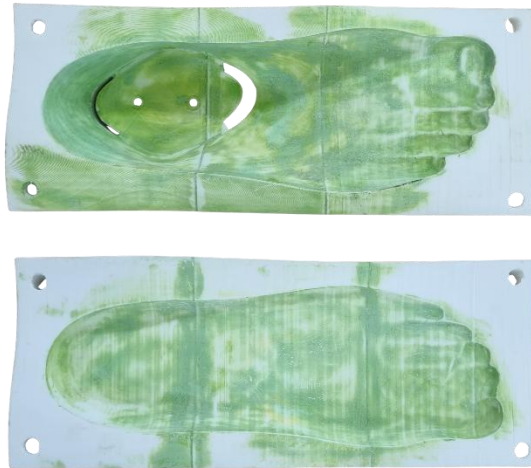


Gambar 4.17. *Core* modular.

Desain modular *mold* yang dibagi menjadi 6 blok seperti ditunjukkan pada Gambar 4.16, dan *core* yang dibagi menjadi 2 bagian seperti pada Gambar 4.17 terbukti efisien dalam proses *printing* dan *maintenance*. Selain mempersingkat durasi *printing* per bagian, pendekatan ini juga memudahkan proses *printing* ulang ketika terjadi kegagalan pada pencetakan salah satu segmen blok. Di samping itu, konsep *lego-style plug & play* yang diadopsi juga memudahkan proses perakitan *mold* dan *core* tanpa perlu penyesuaian yang rumit.

Dari hasil *3D printing* tersebut dapat dilihat bahwa geometri permukaan *mold* dan *core* cukup halus, namun perlu dilakukan *finishing* lagi dengan dempul dan amplas seperti pada Gambar 4.18 untuk mengoptimalkannya lagi. Hal tersebut

memungkinkan resin dapat mengalir memenuhi cavity dengan lancar, dan menghasilkan kualitas permukaan produk yang presisi.



Gambar 4.18. *Mold dan core setelah finishing.*

4.4.3 Hasil fabrikasi *cover* kaki prostetik *ESAR*

Proses fabrikasi dimulai dengan tahap penyiapan *mold* dan *core*, dengan memastikan seluruh bagian *mold* telah terpasang dengan benar dan presisi. Bagian *core* diposisikan melayang di tengah *cavity* dan dikunci dengan sistem penyangga 2 baut agar tetap stabil. Permukaan *mold* dan *core* yang sebelumnya telah dilakukan *finishing* dioleskan *release agent* untuk memudahkan proses *demolding* nantinya.

Material yang digunakan yaitu *resin polyurethane TPU 70* disiapkan dengan rasio A : B adalah 1,1:1. Dilakukan pemanasan pada resin hingga suhu 40°C lalu didiamkan hingga suhu ruang untuk mengencerkan material resin supaya meminimalisir adanya gelembung yang terjebak di dalam *mold* karena campuran resin terlalu kental. Sebelum kedua komponen resin dicampurkan, dilakukan pewarnaan dengan menggunakan pigmen warna untuk menirukan warna kulit manusia secara general. Proses pencampuran harus dilakukan secara cepat dan efisien karena *resin polyurethane* memiliki waktu *pot life* yang cukup singkat.

Setelah kedua komponen resin tercampur sempurna, maka langkah berikutnya adalah memvakum campuran tersebut dengan mesin vakum berkekuatan 2 *hp* selama 30 detik untuk menyedot udara yang terjebak di

dalamnya, langkah ini cukup krusial sebagai upaya meminimalisir adanya *void*. Setelahnya, campuran resin diinjeksikan dengan hati-hati supaya tidak tercipta gelembung udara selama proses *casting*, dan udara yang ada di dalam *mold* dapat terdorong mengalir ke ventilasi udara.

Setelah resin terisi penuh di dalam *cavity*, proses selanjutnya adalah *curing* selama 24 jam, yakni membiarkannya dalam keadaan tertutup hingga resin PU mengeras dan kering sempurna. Tahap berikutnya adalah *demolding* untuk melepaskan produk hasil dari *mold*nya dengan hati-hati agar tidak merusak detail permukaan produk maupun *mold* dan *core* yang dapat dipakai kembali.

Tahapan terakhir adalah *finishing* produk, setelah produk dikeluarkan dari *mold* dan *core* akan dibersihkan dari material-material tersisa yang masih menempel pada produk maupun cetakan. Hasil akhir *cover* kaki prostetik jenis *ESAR* ditunjukkan secara detail pada Gambar 4.19, Gambar 4.20. Gambar 4.21, Gambar 4.22 dari berbagai sudut pandang.



Gambar 4.19. *Cover* kaki prostetik *ESAR* tampak samping atas.



Gambar 4.20. *Cover* kaki prostetik *ESAR* tampak bawah.



Gambar 4.21. *Cover* kaki prostetik *ESAR* tampak belakang atas.



Gambar 4.22. *Cover* kaki prostetik *ESAR* tampak atas.

Dari hasil pengukuran yang dilakukan, produk *cover* tersebut memiliki massa 480 gram, dan dimensi panjang dari ujung tumit ke ujung ibu jari 280 mm, lebar maksimal 102 mm, dan tinggi dari tumit ke atas adalah 78 mm.

4.5 Hasil Pengujian *Preliminary Fatigue*

Dalam upaya mengetahui ketahanan *cover* kaki prostetik *ESAR* yang telah diproduksi terhadap beban berjalan secara berulang (*fatigue*), maka dilakukan pengujian *preliminary fatigue* menggunakan mesin uji pneumatik dua silinder seperti ditampilkan pada Gambar 4.23. *Cover* kaki prostetik tersebut dipasang padaudukan uji dan dikenai beban berulang yang berasal dari gerakan naik turun silinder pneumatik. Beban yang diberikan secara berulang ini memiliki tujuan sebagai simulasi kondisi ketika *cover* kaki prostetik ini diaplikasikan untuk pengguna beraktivitas seperti berjalan, berlari, dan aktivitas lainnya.



Gambar 4.23. Pengujian *preliminary fatigue*.

Pengujian dilakukan sebanyak 100.000 siklus, yang merepresentasikan jumlah rata-rata langkah dalam jangka waktu 1 bulan pemakaian intensif. Alat counter digital mencatat jumlah siklus secara otomatis selama pengujian berlangsung, dan dilakukan pemantauan secara visual produk yang diuji untuk mendeteksi potensi kegagalan (*fail*).

Setelah pengujian selesai dilakukan, hasilnya menunjukkan bahwa *cover* kaki prostetik *ESAR* tidak mengalami deformasi, keretakan, maupun perubahan bentuk seperti ditunjukkan pada Gambar 4.24. Hal ini merupakan indikasi bahwa desain, material, dan metode produksi yang digunakan telah berhasil menghasilkan produk yang mampu menahan beban siklik dengan baik.



Gambar 4.24. Pengujian *preliminary fatigue* setelah 100.000 siklus.

4.6 Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan rangkaian proses yang dilakukan secara keseluruhan, mulai dari proses perancangan, pemilihan desain *mold*, manufaktur *mold* dan *core* dengan *3D printing*, hingga fabrikasi dan pengujian *preliminary fatigue*, dapat dikatakan bahwa produk *cover* kaki prostetik yang dihasilkan telah memenuhi aspek fungsional dan estetika. Salah satu indikasinya adalah keberhasilan produk bertahan terhadap beban siklik dalam pengujian *preliminary fatigue* sebanyak 100.000 siklus tanpa mengalami deformasi. Hal ini membuktikan bahwa desain dan material yang digunakan dapat diaplikasikan untuk penggunaan jangka panjang.

Pada tahapan desain, *mold* dan *core* dirancang untuk mendukung proses *casting* dengan akurasi yang tinggi. Desain modular yang diadopsi juga membuktikan efisiensinya dalam mempermudah proses *3D printing* dengan tetap menjaga tingkat presisi dimensinya. Hasil *3D print* menunjukkan geometri yang sesuai dengan model 3 dimensi dalam *software*, meskipun tetap diperlukan tahapan *finishing* seperti pendempulan dan pengamplasan untuk menghaluskan permukaan *cavity* dan *core* agar produk yang dihasilkan memiliki estetika yang baik.

Dalam hal *assembly* antara *mold* dan *core*, desain sistem penguncian *core* pada dua titik baut dan *lego-style core* memastikan *core* tetap stabil selama proses *casting* berlangsung dengan tetap memudahkan proses *demolding*-nya. Hal tersebut sangat krusial untuk menghindari cacat bentuk produk akibat pergeseran *core* selama proses *molding*. Di samping itu, sistem ventilasi udara memiliki performa yang cukup baik untuk meminimalisir terperangkapnya gelembung udara,

meskipun masih terdapat pori-pori kecil pada produk akhir seperti pada Gambar 4.25 akibat udara yang belum sempat keluar sebelum resin mengeras.



Gambar 4.25. *Void* pada produk *cover* prostetik *ESAR*.

Dalam segi estetika produk *cover* prostetik *ESAR* menunjukkan bentuk kaki yang menirukan anatomi alami kaki manusia dengan detail kontur yang baik. Sedikit perbaikan minor seperti pemangkasan garis *parting line* masih perlu dilakukan supaya tampilannya lebih bersih. Secara keseluruhan produk telah menunjukkan performa yang baik dalam segi fungsi, kenyamanan, dan visualnya.

Alternatif desain *mold* yang ke-3 juga telah menunjukkan hasil yang memuaskan dalam aplikasinya terhadap metode *casting*. Namun perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut jika akan digunakan untuk produksi massal, dan perlu dilakukan optimasi material resin agar hasil produk dapat digunakan dengan baik secara klinis maupun untuk dikomersialkan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada penelitian yang telah dilakukan mengenai desain dan proses manufaktur *cover* kaki prostetik jenis *ESAR* menggunakan material *resin polyurethane TMPU 70*, maka dapat disimpulkan beberapa poin sebagai berikut:

1. Telah berhasil dirancang dan diproduksi *cover* kaki prostetik jenis *ESAR* menggunakan material *resin polyurethane TMPU 70* mengadopsi metode *casting* yang menggunakan *mold* dan *core* hasil *3D printing*.
2. Proses manufaktur *cover* kaki prostetik *ESAR* dengan metode *casting* dapat mencapai kondisi optimal melalui desain *mold* dan *core* yang tepat, dilengkapi fitur ventilasi udara yang memadai dan desain aliran resin yang baik. Selain itu, proses vakum yang optimal dilakukan dengan mesin berkekuatan minimal 2 *hp* dan waktu vakum maksimal 30 detik untuk mencegah resin mengental sebelum masuk ke dalam *mold*, sehingga dapat meminimalisir terbentuknya *void* pada hasil *cover* kaki prostetik *ESAR*.
3. Pengujian *preliminary fatigue* terhadap *cover* kaki prostetik *ESAR* dengan material *resin polyurethane TMPU 70* menunjukkan bahwa produk mampu bertahan hingga 100.000 siklus beban *fatigue* tanpa mengalami aus maupun deformasi plastis. Hal ini membuktikan kelayakan material ini dalam hal ketahanan beban berulang untuk aplikasi prostetik.

5.2 Saran Penelitian Selanjutnya

Dari pelaksanaan penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan masukan dan pengembangan untuk penelitian selanjutnya, yaitu meliputi:

1. Penelitian lanjutan dari topik ini direkomendasikan untuk mengevaluasi ulang desain *mold* secara lebih mendalam, khususnya dalam hal sistem ventilasi udaranya dan posisi *gate* injeksi. Pengembangan mengenai jalur ventilasi yang lebih baik merupakan salah satu faktor yang mengurangi risiko terperangkapnya

gelembung udara selama proses *casting*, sehingga meningkatkan kualitas visual produk akhir.

2. Direkomendasikan untuk memanfaatkan *software* simulasi seperti Autodesk Moldflow dalam tahap perancangan *mold*. Perangkat lunak tersebut memungkinkan dilakukannya simulasi aliran resin, distribusi tekanan, hingga potensi terjebaknya udara di dalam *cavity*, sehingga desain *mold* dapat dioptimalkan.
3. Disarankan untuk melakukan pengujian lebih lanjut dalam bentuk *user trials* (uji coba langsung oleh pengguna) untuk mendapatkan testimoni dan evaluasi yang lebih valid dalam hal kenyamanan, dan stabilitas *cover* kaki prostetik dalam penggunaan harian. Hasil evaluasi tersebut dapat dijadikan data yang mendukung pengembangan lebih lanjut penelitian ini.
4. Riset selanjutnya dapat juga berfokus eksplorasi rasio pencampuran *polyurethane* yang berbeda, maupun mengombinasikannya dengan material tambahan sebagai peningkat kekuatan *fatigue* maupun pengurang risiko terciptanya *void*.
5. Dapat dilakukan riset pigmen warna maupun metode pewarnaan yang lebih mendekati warna kulit manusia untuk meningkatkan aspek estetika, dan kepercayaan diri pengguna.
6. Direkomendasikan menggunakan vakum dengan tenaga yang lebih besar ≥ 5 *hp* sebagai upaya mempercepat proses vakum sebelum material *resin polyurethane* mengental dan tidak bisa dilakukan injeksi ke dalam *mold*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. R. Wurdeman, P. M. Stevens and J. H. Campbell, "Mobility Analysis of Amputees (MAAT I): Quality of life and satisfaction are strongly related to mobility for patients with a lower limb prosthesis," *Journal Sagepub*, vol. 42, no. 5, pp. 1-6, 2017.
- [2] E. Lathouwers, M. A. Díaz, A. Maricot, B. Tassignon, C. Cherelle, P. Cherelle, R. Meeusen and K. D. Pauw, "Therapeutic benefits of lower limb prostheses: a systematic review," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 20, no. 4, 2023.
- [3] H. Houdijk, D. Wezenberg, L. Hak and A. G. Cutti, "Energy storing and return prosthetic feet improve step length symmetry while preserving margins of stability in persons with transtibial amputation," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 15, no. 1, pp. 42-48, 2018.
- [4] R. Ismail, M. A. Nursafitri, A. P. Fardinansyah, D. F. Fitriyana, A. P. Bayuseno, J. P. Siregar, M. Setiyo, A. F. Istiqomah dan S. , "Design, fabrication, and performance testing of an energy storage and return (ESAR) foot prosthesis made of prepreg," *Mechanical Engineering for Society and Industry*, vol. 5, no. 1, pp. 20-32, 2025.
- [5] A. N. Mijar, "Exploring Materials and Techniques in Jaipur Foot Manufacturing: A Review," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 15, no. 3, pp. 62-76, 2024.
- [6] M. S. Wong, B. H. Beygi and Y. Zheng, "Materials for Exoskeletal Orthotic and Prosthetic Systems," *Encyclopedia for Biomedical Engineering*, vol. 1, pp. 352-367, 2019.
- [7] J. S. Jensen and H. B. Treichl, "Mechanical testing of prosthetic feet utilized in low-income countries according to ISO-10328 standard," *Sagepub*, vol. 31, no. 2, pp. 177-206, 2007.
- [8] S. Sharma, J. Singh, H. Kumar, A. Sharma, V. Aggarwal, A. S. Gill, N. Jayarambabu, S. Kailasa and K. V. Rao, "Utilization of rapid prototyping

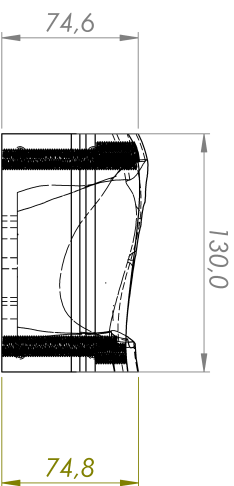
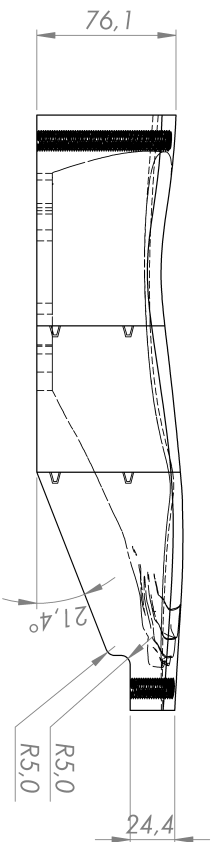
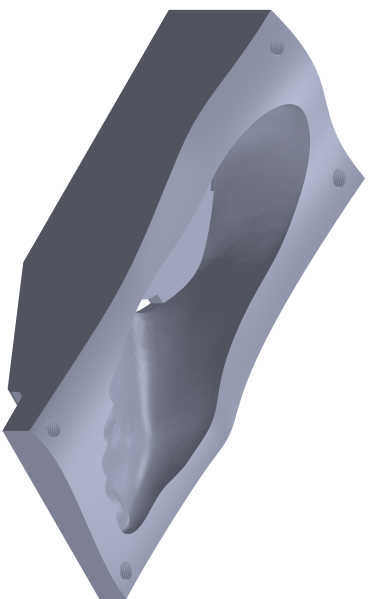
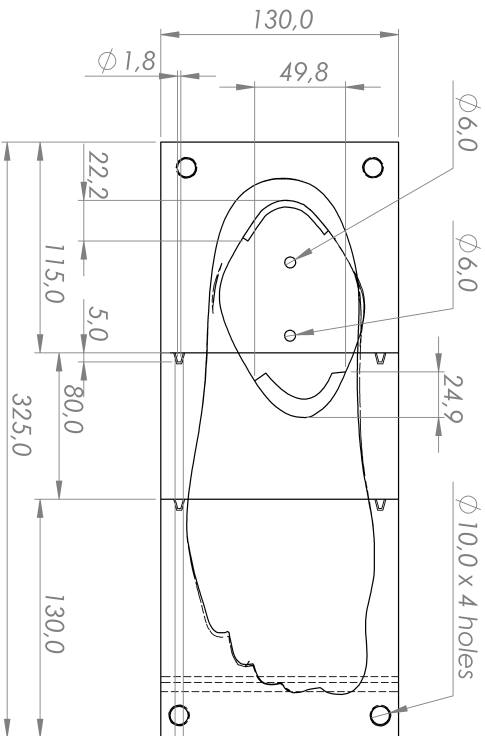
- technology for the fabrication of an orthopedic shoe inserts for foot pain relieve using thermo-softening viscoelastic polymers: A novel experimental approach," *Journal Sagepub*, vol. 53, no. 3-4, pp. 519-530, 2020.
- [9] I. A. Cabrera, *Innovating Technologies for Affordable and Accessible Prosthetic Healthcare*, University of California San Diego, 2022.
- [10] Z. Jia, D. Jia, Q. Sun, Y. Wang and H. Ding, "Preparation and Mechanical-Fatigue Properties of Elastic Polyurethane Concrete Composites," *MDPI*, vol. 14, no. 14, 2021.
- [11] S. N. N. Lutfi, N. A. A. Razak, S. Ali and H. Gholizadeh, "Compression and tension behavior of the prosthetic foam materials polyurethane, EVA, Pelite™ and a combination of polyurethane and EVA: a preliminary study," *DE GRUYTER*, vol. 66, no. 3, 2020.
- [12] M. Schlafly and K. B. Reed, "Novel passive ankle-foot prosthesis mimics able-bodied ankle angles and ground reaction forces," *Clinical Biomechanics*, vol. 72, pp. 202-210, 2020.
- [13] K. Efstathiou and A. McGarry, "3D Printed Cosmetic Covers For Lower Limb Prosthetics," *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, vol. 6, no. 2, p. 8, 2023.
- [14] N. Ramstrand, M. Riveiro, L. Eriksson and M. Ceder, "Effects of conventional versus 3D-printed cosmetic covers on user satisfaction and psychosocial well-being in lower limb prostheses users: A randomised crossover trial," *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, vol. 12, pp. 1-11, 2025.
- [15] F. A. Al-Harbi, N. M. Ayad, M. A. Saber, A. S. ArRejaie and S. M. Morgano, "Mechanical behavior and color change of facial prosthetic elastomers after outdoor weathering in a hot and humid climate," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 113, no. 2, pp. 146-151, 2014.
- [16] A. Kharb, V. Saini, Y. Jain and S. Dhiman, "A Review of Gait Cycle and Its Parameters," *International Journal of Computational Engineering & Management*, vol. 13, pp. 78-83, 2011.

- [17] M. W. Whittle, *Gait Analysis-An introduction*, 2007.
- [18] M. Ishikawa, P. V. Komi, M. J. Grey, V. Lepola and G.-P. Bruggemann, "Muscle-tendon interaction and elastic energy usage in human walking," *J Appl Physiol*, vol. 99, pp. 603-608, 2005.
- [19] A. J. Blazevich and J. R. Fletcher, "More than energy cost: multiple benefits of the long Achilles tendon in human walking and running," *Biological Reviews*, vol. 98, no. 6, pp. 2210-2225, 2023.
- [20] J. Gardiner, A. Z. Bari, D. Howard and L. Kenney, "Transfemoral amputee gait efficiency: Energy storage and return versus solid ankle cushioned heel prosthetic feet," *JRRD*, vol. 53, no. 6, pp. 1133-1138, 2016.
- [21] J. B. Hafner, J. E. Sanders, J. Czerniecki and J. Ferguson, "Energy storage and return prostheses: does patient perception correlate with biomechanical analysis?," *Clinical Biomechanics*, vol. 17, pp. 325-344, 2002.
- [22] K. E. Zelik, S. H. Collins, P. G. Adamczyk, A. D. Segal, G. K. Klute, D. C. Morgenroth, M. E. Hahn, M. S. Orendurff, J. M. Czerniecki and A. D. Kuo, "Systematic variation of prosthetic foot spring affects center-of-mass mechanics and metabolic cost during walking," *Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol. 19, no. 4, pp. 411-419, 2011.
- [23] C. Barattini, L. Dimauro, A. D. Vella and A. Vigliani, "Dynamic Analysis of a High-Performance Prosthetic Leg: Experimental Characterisation and Numerical Modelling," *MDPI*, vol. 13, no. 20, 2023.
- [24] M. I. H. Siddiqui, L. Arifudin, I. A. Alnaser, A. Hassan and K. Alluhydan, "Static Behavior of a Prosthetic Running Blade Made from Alloys and Carbon Fiber," *Journal of Disability Research*, vol. 2, no. 1, pp. 63-74, 2023.
- [25] H.-T. Pham and T.-V. Phan, "Optimization Design of a Carbon Fibre Prosthetic Foot for Amputee," *Acta Sci. Orthop*, vol. 3, no. 10, pp. 16-21, 2020.
- [26] V. Kanyanta and A. Ivankovic, "Mechanical characterisation of polyurethane elastomer for biomedical applications," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 51-62, 2010.

- [27] G. Zhang, T. Yin, G. Nian and Z. Suo, " Fatigue-resistant polyurethane elastomercomposites," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 48, 2021.
- [28] K. Kwiatkowski and M. Nachman, "The Abrasive Wear Resistance of the Segmented Linear Polyurethane Elastomers Based on a Variety of Polyols as Soft Segments," *MDPI*, vol. 9, no. 705, 2017.
- [29] P. Mayer-Trzaskowska, M. Ferraris, S. Perero and M. Robakowska, "The Influence of the Addition of Rubber Waste on the Properties of Polyurethane Coatings Subjected to Aging Processes," *MDPI*, vol. 15, no. 677, 2025.
- [30] P. Bartczak, K. Szylińczuk, M. Tomaszczak and S. Borysiak, " Sustainable and multifunctional polyurethane green composites with renewable materials," *J Mater Sci*, vol. 59, pp. 13541-13557, 2024.
- [31] P. Ezigbo, K. F. Opara and N. Chukwuchekwa, "Development Of 3D Printable Prosthetic Arm For Amputees Using Computer Aided Design And Fused Deposition Modelling," *International Journal of Mechatronics, Electrical, and Computer Technology (IJMEC)*, vol. 10, no. 36, pp. 4598-4607, 2019.
- [32] I. Gibson , D. Rosen, B. Stucker and M. Khorasani, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2021.
- [33] V. Boljanovic, *Metal Shaping Processes: Casting and Molding; Particulate Processing; Deformation Processes; and Metal Removal*, New York: Industrial Press, Inc. New York, 2010.
- [34] R. Eberlein, Y. Fukada and L. Pasiaka, "Fatigue Life Analysis of Solid Elastomer-Like Polyurethanes," *Springer*, vol. 286, pp. 179-202, 2020.
- [35] X. Gao, M. Umair, Y. Nawab, Z. Latif, S. Ahmad, A. Siddique and H. Yang, "ModelFatigue of Fibre Reinforced Polymeric Composites: A Review," *MDPI*, vol. 14, no. 21, pp. 1-29, 2022.

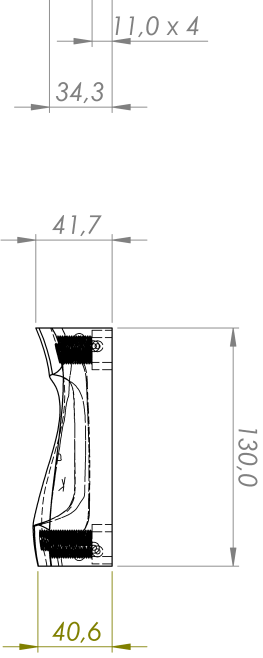
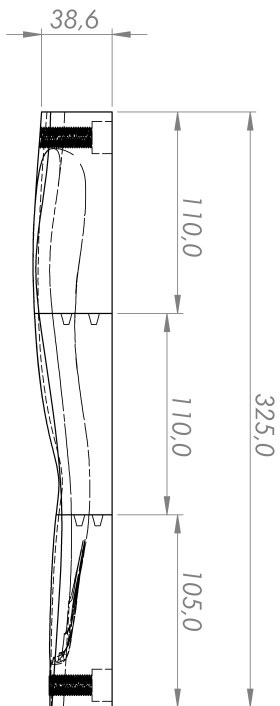
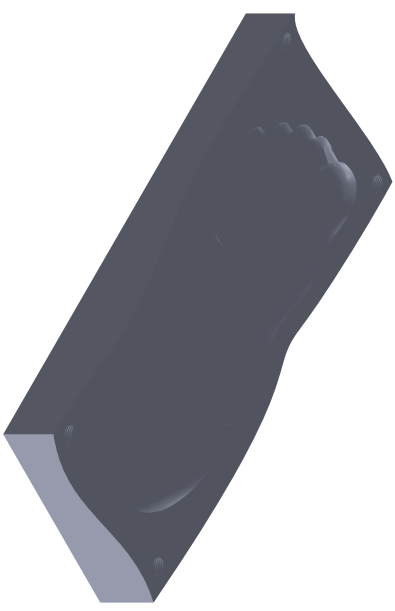
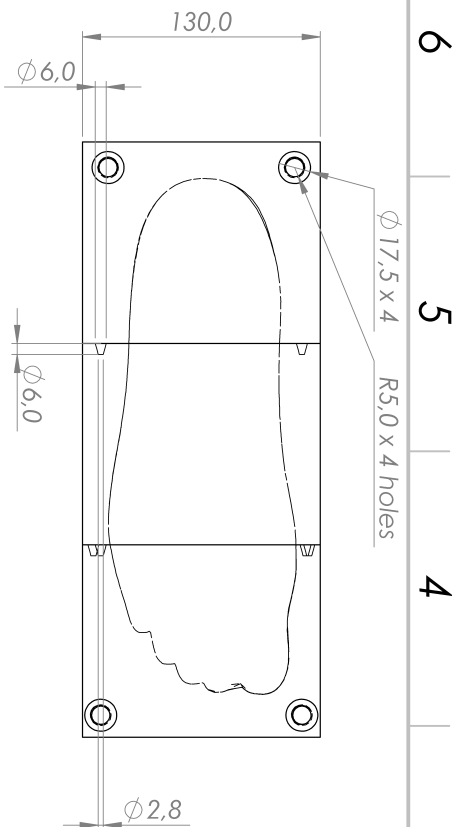
LAMPIRAN

1. Gambar teknik *mold* atas
2. Gambar teknik *mold* bawah
3. Gambar teknik *core* atas
4. Gambar teknik *core* bawah



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
TOLERANCES			LINEAR:							
ANGULAR:										

NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		DWG NO.		SHEET 1 OF 1	
DRAWN/			Mold atas		1		A4	
CHKD/								
APP'D/								
MFG								
QA								
			MATERIAL:					
			PLA+					
			WEIGHT:		SCALE 1:1.3			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	
SURFACE FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	
TOLERANCES:			
LINEAR:			
ANGULAR:			
TITLE:			
NAME		SIGNATURE	DATE
DRAWN	Frederic Argo P.		
CHKD	Ir. Dormy S.		
APPRD	Dr. Ir. M. Kroghich		
MFG			
QA			
MATERIAL:		PLA+	
DWG NO.		2	
SCALE: 1:3		A4	
SHEET 1 OF 1			

6

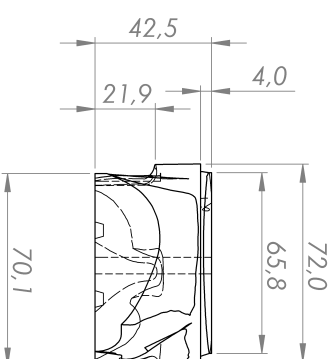
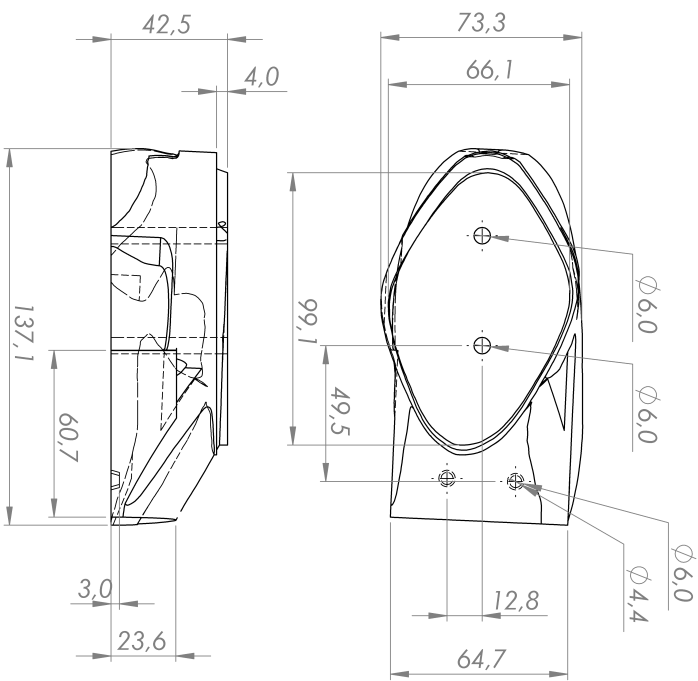
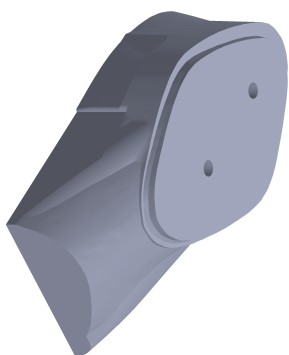
5

4

3

2

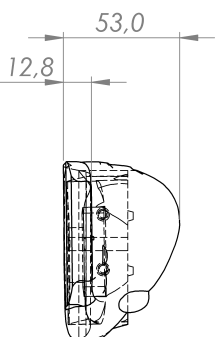
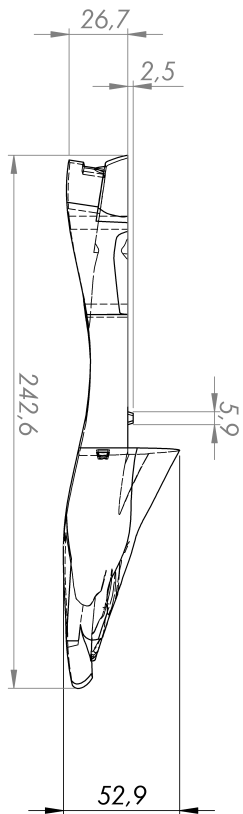
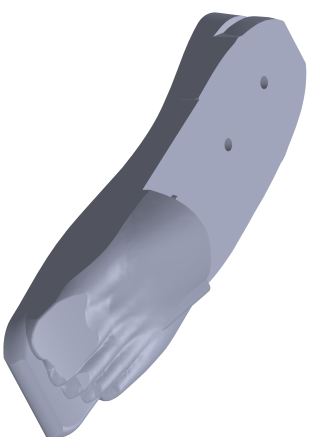
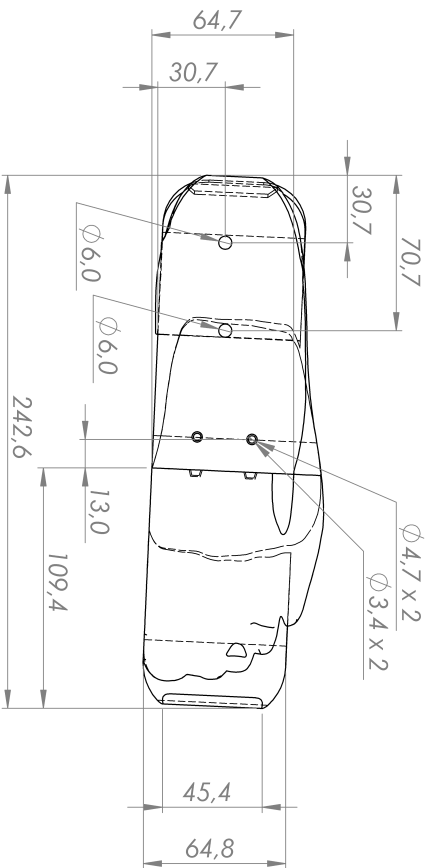
1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:										
TOLERANCES:										
LINEAR:										
ANGULAR:										

DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		DWG. NO.		3		A4	
CHKD	Fiebel Argo P.										
APPRVD	It. Dornay S.										
MFG	Dr. It. M. Rhotofin										
QA											
				MATERIAL:							
				Resin UV							
				WEIGHT:							
				SCALE: 1:2							
				SHEET 1 OF 1							

Core atas



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS DECIMALS: FRACTIONS: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	
NAME	SIGNATURE	DATE			DO NOT SCALE DRAWING	
DRAWN					REVISION	

CHECKD	FILED	APPROVD	MFG	QA	TITLE:	
	Freeel Argo P.	Jr. Dorry S.	Dr. Ir. M. Rhoofen		Core bawah	
MATERIAL:					DWG. NO.	
Resin UV					4	
WEIGHT:					SHEET 1 OF 1	
SCALE: 1:2,5					A4	