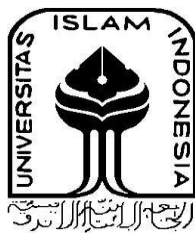


**Desain dan Pembuatan *Keel* untuk Kaki Palsu Jenis *Solid Ankle*
Cushioned Heel (SACH)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan sebagai Salah Satu Syarat
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh :

Nama : Arlen Suryawan
No. Mahasiswa : 21525013
NIRM 2101070001

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

Desain dan Pembuatan *Keel* untuk Kaki Palsu Jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH)

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Arlen Suryawan

No. Mahasiswa : 21525013

NIRM : 2101070001

Yogyakarta, 26 Mei 2026

Pembimbing I,



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

Pembimbing II,



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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

Desain dan Pembuatan *Keel* untuk Kaki Palsu Jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH)

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Arlen Suryawan

No. Mahasiswa : 21525013

NIRM : 2101070001

Tim Penguji

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

Ketua

Tanggal : 3 Juni 2026

Arif Budi Wicaksono, S.T., M.Eng.

Anggota 1

Tanggal : 3 JUNI 2026

Rahmat Riza, S.T., M.Sc. M.E.

Anggota 2

Tanggal : 2 Juni 2026



Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa laporan 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 orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 04 Mei 2026



Arlen Suryawan

21525013

HALAMAN PERSEMBAHAN

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

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Avib Sri Hardono dan Ibu Sri Widadi atas segala doa, dukungan moral, semangat dan kasih sayang 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 terimakasih juga penulis sampaikan kepada seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Mesin atas ilmu, motivasi, serta kesempatan belajar yang sangat berharga selama masa perkuliahan membantu dalam kelancaran berbagai urusan akademik penulis.
3. Seluruh rekan-rekan seperjuangan selama menempuh studi, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Terimakasih atas semangat, kebersamaan, bantuan, dan doa yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga Laporan Tugas Akhir ini selesai disusun.

HALAMAN MOTTO

“Dibalik kesulitan pasti ada kemudahan”

(Q.S. Al-Insyirah : 94)

“Pain + Reflection = Progress”

(Ray Dalio)

“Disetiap pintu yang tertutup pasti ada kuncinya”

(Timothy Ronald)

“Cacing-cacing. Naga-naga”

(A.H)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillahirabbil'alam, 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 Pembuatan *Keel* untuk Kaki Palsu Jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH)” 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 terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua yang tiada henti memberi 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.

Semoga semua pihak yang telah membantu penulis selama melaksanakan Tugas Akhir dan selama penyusunan laporan Tugas Akhir ini mendapatkan balasan yang jauh lebih besar dari Allah SWT dan selalu diberikan kesehatan, dan kemudahan dalam segala urusannya.

Penulis menyadari bahwa di dalam penulisan laporan ini masih banyak terdapat kesalahan sehingga jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis

sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk mencapai hasil yang lebih baik. Penulis juga berharap agar laporan ini dapat berguna bagi semua yang membacanya dan dapat berkontribusi positif.

ABSTRAK

Jumlah penyandang disabilitas di Indonesia yang mengalami gangguan berjalan terus meningkat setiap tahunnya, yang berdampak signifikan terhadap mobilitas dan kualitas hidup. Salah satu solusi yang umum digunakan adalah kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) karena desainnya yang sederhana dan ekonomis. Dalam struktur kaki SACH, komponen *keel* memegang peranan krusial sebagai elemen struktural utama untuk mendistribusikan beban selama siklus berjalan. Penggunaan material plastik seperti PLA pada *keel* sering kali terkendala oleh kebutuhan produksi massal yang kurang aksesibel bagi UMKM lokal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan memproduksi *keel* kaki palsu SACH menggunakan material kayu sebagai alternatif yang lebih kuat, tahan lama, dan aplikatif bagi industri kecil.

Metodologi penelitian meliputi perancangan menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) yang dilanjutkan dengan analisis mekanik untuk mengevaluasi tegangan serta deformasi akibat beban dorsifleksi, statis, dan lelah (*fatigue*). Proses manufaktur dilakukan menggunakan mesin CNC tiga sumbu (*3axis*). Sebagai pelengkap, bagian kaki luar menggunakan material *polyurethane* tipe TPU 70 yang berfungsi sebagai elemen elastis dan peredam kejutan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa desain *keel* kayu mampu menahan beban kerja sesuai standar aktivitas manusia dengan distribusi tegangan yang aman berdasarkan simulasi analisis mekanik. Produk akhir yang dihasilkan adalah komponen *keel* material kayu yang memiliki akurasi dimensi tinggi melalui proses pemesinan CNC, yang kemudian diintegrasikan dengan lapisan *polyurethane* TPU 70 membentuk satu unit kaki palsu jenis SACH yang fungsional.

Kata kunci: Kaki palsu, SACH, *keel*, kayu, *polyurethane*, TPU 70.

ABSTRACT

The number of people with physical disabilities in Indonesia who experience walking impairments continues to increase annually, significantly impacting their mobility and quality of life. A commonly utilized solution is the Solid Ankle Cushioned Heel (SACH) prosthetic foot, favored for its simple and economical design. Within the SACH foot structure, the keel component plays a crucial role as the primary structural element for distributing loads during the gait cycle. The use of plastic materials such as PLA for the keel is often hindered by the requirements of mass production, which are less accessible to local MSMEs (Micro, Small, and Medium Enterprises). This study aims to design and manufacture a SACH prosthetic foot keel using wood as a stronger, more durable, and applicable alternative for small-scale industries.

The research methodology involves design using Computer-Aided Design (CAD) software, followed by mechanical analysis to evaluate stress and deformation under dorsiflexion, static, and fatigue loads. The manufacturing process was carried out using a 3-axis CNC machine. As a complement, the outer foot section utilizes TPU 70 type polyurethane, which functions as an elastic and shock-absorbing element. The results of this study indicate that the wooden keel design is capable of withstanding operational loads according to human activity standards, with a safe stress distribution based on mechanical analysis simulations. The final product is a wooden keel component with high dimensional accuracy achieved through the CNC machining process, which is then integrated with a TPU 70 polyurethane layer to form a functional SACH prosthetic foot unit.

Keywords: Prosthetic foot, SACH, keel, wood, polyurethane, TPU 70.

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iii
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih	vii
Abstrak.....	ix
Abstract.....	x
Daftar Isi	xi
Daftar Tabel	xiv
Daftar Gambar	xv
Daftar Notasi.....	xvii
Bab 1 Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan	3
1.5 Manfaat Penelitian dan Perancangan	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Dasar Teori.....	6
2.2.1 Skema telapak kaki	6
2.2.2 <i>Gait Cycle</i>	7
2.2.3 <i>Keel</i>	8
2.2.4 <i>Solid Ankle Cushioned Heel (SACH)</i>	9
2.2.5 Kayu	9
2.2.6 Resin <i>polyurethane</i>	10

2.2.7	<i>SolidWorks</i>	11
2.2.8	<i>Ex-Scan</i>	11
2.2.9	<i>Fusion 360</i>	11
2.2.10	<i>Flash Print</i>	12
2.2.11	<i>JIG Fixture</i>	12
2.2.12	<i>Casting</i>	12
Bab 3	Metode Penelitian	13
3.1	Alur Penelitian	13
3.2	Kriteria produksi <i>keel</i> dan kaki jenis SACH	14
3.2.1	Kriteria produk	14
3.2.2	Kriteria desain	15
3.3	Alat dan Bahan	15
3.4	Perancangan produk	16
3.4.1	Pembuatan alternatif desain <i>part keel</i>	17
3.5	Evaluasi desain <i>part keel</i>	22
3.6	Desain <i>keel</i> yang terpilih	23
3.7	Metode Pengujian	24
3.7.1	Pengujian Dorsifleksi	24
3.7.2	Pengujian Statik	25
3.7.3	Pengujian Fatik	26
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	27
4.1	3D <i>scan</i> SACH	27
4.2	Desain JIG <i>Fixture</i>	28
4.3	Simulasi CAM <i>part keel</i>	28
4.4	Desain <i>cavity</i> dan <i>core</i>	29
4.5	<i>Slicing cavity</i> dan <i>core</i>	31
4.6	<i>Slicing</i> JIG <i>Fixture</i>	32
4.7	Hasil Produksi JIG <i>Fixture</i>	33
4.8	Proses & Hasil Produksi <i>Keel</i>	34
4.8.1	Hasil Produksi <i>Cavity</i> dan <i>Core</i>	36

4.8.2	Perancangan <i>part</i> untuk produksi kaki palsu	38
4.8.3	Hasil produksi kaki palsu jenis SACH	39
4.9	Hasil Pengujian	42
4.9.1	Uji Dorsifleksi	42
4.9.2	Uji Statik	45
4.9.3	Uji Fatik	53
4.10	Analisis dan Pembahasan	53
4.11	Evaluasi produk kaki palsu jenis SACH	57
Bab 5	Penutup	58
5.1	Kesimpulan	58
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya	59
Daftar Pustaka		60
Lampiran		62

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Tabel alat	15
Tabel 3.2. Tabel bahan	16
Tabel 3.3. Parameter material kayu.	17
Tabel 3.4. Parameter simulasi desain <i>keel</i> 1.	19
Tabel 3.5. Parameter simulasi desain <i>keel</i> 2.	20
Tabel 3.6. Parameter simulasi desain <i>keel</i> 3.	22
Tabel 3.7. Matriks pengambilan keputusan desain <i>keel</i>	23
Tabel 4.6. Berat produk <i>keel</i> tiap material	36
Tabel 4.7. Komposisi <i>polyurethane</i> dan pewarna	40
Tabel 4.8. Tabel dimensi produksi SACH.	41
Tabel 4.9. Dorsifleksi produk jati	42
Tabel 4.10. Dorsifleksi produk mahoni	42
Tabel 4.11. Dorsifleksi produk kalimantan	43
Tabel 4.12. Tabel perhitungan sudut produk jati	44
Tabel 4.13. Tabel perhitungan sudut produk kalimantan	44
Tabel 4.14. Tabel perhitungan sudut produk mahoni	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema telapak kaki orang Indonesia	7
Gambar 2.2. <i>Giat cycle</i>	7
Gambar 2.3. Contoh <i>part keel</i> pada kaki palsu jenis SACH	8
Gambar 2.4. Contoh kaki palsu jenis SACH	9
Gambar 3.1. Diagram alur penelitian <i>keel</i>	13
Gambar 3.2. Diagram alur proses produksi kaki palsu jenis SACH	14
Gambar 3.3. Desain <i>keel</i> alternatif 1	18
Gambar 3.4. Simulasi CAE desain <i>keel</i> -1	18
Gambar 3.5. Desain <i>keel</i> alternatif 2	19
Gambar 3.6. Simulasi CAE desain <i>keel</i> -2	20
Gambar 3.7. Desain <i>keel</i> alternatif 3	21
Gambar 3.8. Simulasi CAE desain <i>keel</i> -3	22
Gambar 3.9. Pengujian dorsifleksi	24
Gambar 3.10. Pengujian statik (belakang)	25
Gambar 3.11. Pengujian statik (depan)	25
Gambar 3.12. Pengujian fatik	26
Gambar 4.1. Hasil <i>scan</i> kaki palsu jenis SACH	27
Gambar 4.2. Modifikasi desain kaki palsu jenis SACH	27
Gambar 4.3. Desain JIG <i>fixtute</i>	28
Gambar 4.4. Simulasi sisi 1	29
Gambar 4.5. Simulasi sisi 2	29
Gambar 4.6. Cavity SACH	30
Gambar 4.7. <i>Core</i> SACH	30
Gambar 4.8. <i>Part</i> penutup <i>molding</i>	31
Gambar 4.9. <i>Slicing cavity</i>	31
Gambar 4.10. <i>Slicing core</i> -1	32
Gambar 4.11. <i>Slicing core</i> -2	32
Gambar 4.12. <i>Slicing</i> JIG <i>fixtute</i>	32

Gambar 4.13. Hasil 3D <i>print</i> JIG <i>fixture</i>	33
Gambar 4.14. Proses <i>machining</i> sisi-1	34
Gambar 4.15. Proses <i>machining</i> sisi-2	34
Gambar 4.16. Hasil proses CNC	35
Gambar 4.17. Produk <i>keel</i>	35
Gambar 4.18. Hasil <i>print</i> dan <i>finishing molding</i>	37
Gambar 4.19. Hasil <i>print part</i> penutup <i>molding</i>	38
Gambar 4.20. Contoh perancangan <i>molding</i>	39
Gambar 4.21. <i>Assembly keel</i> dan <i>molding</i>	39
Gambar 4.22. Hasil produksi SACH (tampak atas)	40
Gambar 4.23. Hasil produksi SACH (tampak bawah)	40
Gambar 4.24. Perbandingan 3 produk <i>keel</i> pada SACH	43
Gambar 4.25. Skema pencarian sudut dorsifleksi	43
Gambar 4.26. Uji statik <i>keel</i> kayu mahoni (belakang)	45
Gambar 4.27. Uji statik <i>keel</i> kayu kalimantan (belakang)	47
Gambar 4.28. Uji statik <i>keel</i> kayu jati (belakang)	48
Gambar 4.29. Uji statik <i>keel</i> kayu mahoni (depan)	49
Gambar 4.30. Uji statik <i>keel</i> kayu kalimantan (depan)	51
Gambar 4.31. <i>Defect</i> pada saat produksi <i>keel</i> sisi-2	53
Gambar 4.32. <i>Connector</i> mesin CNC 3 <i>Axis</i>	53
Gambar 4.33. <i>Error</i> produksi SACH <i>keel</i> kayu jati	54
Gambar 4.34. <i>Defect</i> pada pengujian statik SACH <i>keel</i> jati	54
Gambar 4.35. <i>Defect</i> pada <i>keel</i> kayu jati	55
Gambar 4.36. Kerusakan <i>load</i> pada mesin uji fatik	55

DAFTAR NOTASI

SACH	: <i>Solid Ankle Cushion Heel</i>
PU	: <i>Polyurethane</i>
CAD	: <i>Computer Aided Design</i>
CAM	: <i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	: <i>Controlled Numerical Computer</i>
PLA	: <i>Polylactic Acid</i>
Mm	: millimeter

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Disabilitas merupakan suatu kelompok masyarakat dengan kondisi memiliki keterbatasan yang dapat menghambat aktivitas. Disabilitas pada bagian kaki merupakan tantangan besar yang berdampak terhadap mobilitas dan kualitas hidup seseorang. Pasien yang mengalami kesulitan dalam berjalan, berdiri dan melakukan kegiatan yang butuh kestabilan pada saat bergerak. Masalah ini muncul akibat disfungsi anggota tubuh, namun secara psikologis dan hubungan sosial antar sesama dapat menurunkan tingkat kepercayaan diri. Dalam kondisi seperti ini mendorong riset berbagai inovasi dalam teknologi prostetik, salah satunya adalah kaki palsu jenis SACH (*Solid Ankle Cushion Heel*)[1].

Kaki palsu jenis SACH (*Solid Ankle Cushioned Heel*) merupakan salah satu komponen prostetik yang paling banyak digunakan, khususnya pada pengguna dengan tingkat aktivitas rendah hingga tinggi. Kaki palsu jenis SACH tidak memiliki mekanisme sendi pergelangan kaki, sehingga fungsi adaptasi terhadap permukaan tanah dan penyerapan beban sepenuhnya bergantung pada struktur internal kaki palsu. Salah satu bagian internal terpenting dari kaki SACH adalah *keel* yang terletak di area tumit. *Keel* berfungsi sebagai elemen struktural yang menahan beban tubuh saat fase *heel strike*, *stance* dan *toe off* , sekaligus mendistribusikan beban tersebut ke seluruh struktur kaki palsu.

Pada kaki SACH konvensional, *Keel* umumnya dibuat dari material kayu dengan proses *machining* CNC 3 axis. Pada material utama *foot* SACH adalah *polyurethane* dengan jenis TPU-70 yang memiliki sifat elastis, tahan terhadap beban berulang, serta mudah dibentuk melalui proses pencetakan. Metode produksi yang umum digunakan adalah *casting* atau *molding*.

Sebagai penelitian kaki SACH, *Polyurethane* untuk materialnya memiliki kelebihan yaitu untuk *polyurethane* tahan terhadap beban tekan dan deformasi berulang, memiliki elastisitas yang baik sebagai peredam kejutan. Untuk material kayu pada *part keel* memberikan stabilitas yang memadai pada fase berdiri. Walaupun demikian, penggunaan satu material dan satu proses manufaktur untuk seluruh bagian kaki SACH dapat menyebabkan kurangnya optimalisasi fungsi *keel*

sebagai elemen penahan dan pendistribusi beban, sehingga berpotensi mempengaruhi durabilitas dan performa mekanis kaki palsu secara keseluruhan.

Sebagai solusi, penelitian ini menawarkan desain dan produksi *keel* berbahan kayu yang diproses menggunakan mesin CNC 3 *axis*. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan *keel* dengan presisi geometrik yang lebih baik, kekuatan struktural yang memadai, serta kemudahan replikasi desain, sekaligus tetap dengan kaki palsu jenis SACH berbahan *polyurethane* yang diproduksi melalui proses *molding*.

Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan memproduksi *keel* untuk kaki palsu jenis SACH yang mampu menahan dan mendistribusikan beban secara efektif, serta mengevaluasi kesesuaian desain dan proses manufaktur yang diterapkan untuk mendukung kinerja kaki SACH secara keseluruhan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pertanyaan yang diangkat pada riset dalam studi ini adalah: Apakah material kayu untuk *part keel* dapat digunakan secara efektif dan apakah resin *polyurethane* dapat digunakan secara efektif dalam proses desain dan produksi kaki palsu jenis SACH, khususnya dalam hal peningkatan durabilitas dan efisiensi produksi. Berdasarkan tujuan tersebut, hipotesis yang diajukan menyatakan bahwa material kayu memiliki performa mekanik yang lebih unggul dan resin *polyurethane* memiliki performa mekanik yang lebih unggul dibandingkan material konvensional dan dapat diimplementasikan secara praktis dalam produksi SACH.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana proses manufaktur dalam pembuatan *part keel* yang berbahan kayu dengan mesin CNC 3 *axis* ?
2. Bagaimana proses manufaktur untuk kaki palsu jenis SACH berbahan resin *polyurethane* tipe TMPU-70 dengan *keel* hasil penelitian ?
3. Bagaimana performa kaki palsu jenis SACH dengan material resin *polyurethane* tipe TMPU-70 terhadap uji fatik, statik dan dorsifleksi?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki ruang lingkup yang telah ditentukan agar pembahasan lebih terarah dan mendalam. Oleh karena itu, terdapat beberapa batasan masalah yang diterapkan dalam peneliti ini, sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada desain dan produksi *keel* untuk kaki palsu jenis SACH, bukan keseluruhan sistem prostetik.
2. Material yang digunakan untuk *part keel* adalah kayu jenis jati, mahoni dan kalimantan.
3. SACH berukuran 25,5 cm.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan dari penelitian Desain dan Produksi *Keel* untuk Kaki Palsu jenis SACH adalah sebagai berikut :

1. Mendesain dan produksi *part keel* dengan mesin CNC 3 axis untuk kaki palsu.
2. Optimalisasi proses produksi SACH.
3. Mengetahui performa kaki palsu jenis SACH dengan uji fatik, statik dan dorsifleksi.

1.5 Manfaat Penelitian dan Perancangan

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat memberikan alternatif produksi dengan material untuk *part keel* dan SACH.
2. Menawarkan pendekatan proses manufaktur yang efisien dengan melewati proses CNC *machining*, 3D *Printing* dan *Casting*, yang dapat diaplikasikan pada produksi komponen prostetik secara lebih cepat dan terjangkau.
3. Memberikan kontribusi ilmiah sebagai referensi untuk penelitian lebih lanjut dibidang manufaktur khususnya kaki prostetik.

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 dan sistematika penulisan.

BAB 2: Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang kajian pustaka dan menjelaskan dasar teori yang digunakan dalam penelitian dan perancangan yang dilakukan.

BAB 3: Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian dan metode penelitian yang akan digunakan.

BAB 4: Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan berdasarkan penelitian dan perancangan yang telah dilakukan.

BAB 5: Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari pembahasan yang dilakukan serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian tentang kaki prostetik jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) telah mengalami perkembangan, yang bertujuan untuk mengembalikan fungsi normal anggota tubuh manusia pada saat berjalan dan melakukan kegiatan yang berat. Kaki prostetik ini dapat menyerap sebagian dampak saat berjalan. Pengembangan produk sebelumnya pada *part keel* yang bermaterial plastik PLA untuk pemakaiannya dapat dikatakan mudah rusak dikarenakan pasien sebelumnya menggunakan produk tersebut di pekerjaan berat maka pada penelitian kali ini akan menggunakan material kayu untuk *part keel*. Untuk kayu yang digunakan adalah kayu jati, mahoni dan kalimantan. Dikarenakan performa dari kaki prostetik jenis SACH ini utamanya pada bagian *keel* sebagai tumpuan beban, Oleh karena itu material kayu sangat cocok untuk digunakan sebagai tumpuan beban dan distribusi beban. Material utama dalam pembuatan kaki prostetik jenis SACH adalah resin *polyurethane* karena ada beberapa kebutuhan untuk produk kaki prostetik yaitu elastisitas yang baik, kegesitan dalam gesekan dan kekuatan yang unggul.

Penelitian ini berfokus untuk mendesain dan memproduksi *part keel* untuk kaki palsu jenis SACH. Penelitian difokuskan dalam hal durabilitas terhadap beban fatik, statik dan dorsifleksi. Serta kesesuaian dengan proses manufaktur modern seperti CAD, 3D *Print*, CNC 3 *Axis* dan *Casting*. Berdasarkan tujuan tersebut, hipotesis yang diajukan menyatakan bahwa material kayu untuk *part keel* lebih unggul dibandingkan plastik jenis PLA untuk menahan beban dan mendistribusikan beban dan performa mekanik yang lebih baik. Lalu untuk material *polyurethane* untuk SACH dapat diimplementasikan secara praktis dalam produksi.

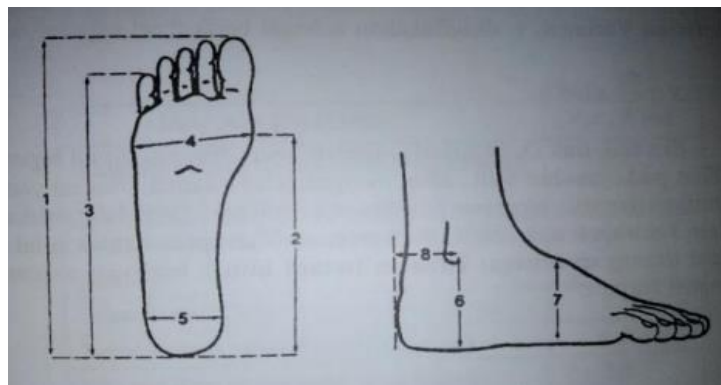
2.2 Dasar Teori

Dalam perancangan kaki palsu tipe SACH (*Solid Ankle Cushioned Heel*), terdapat beberapa landasan teori utama yang harus diperhatikan agar kaki palsu dapat berfungsi optimal dalam menggantikan peran anatomi kaki asli.

2.2.1 Skema telapak kaki

Kaki palsu dirancang untuk menggantikan fungsi anatomi kaki yang hilang akibat amputasi atau kelainan kongenital. Tujuan utamanya adalah mengembalikan mobilitas, memberikan stabilitas saat berdiri, dan menyerap beban saat berjalan. Untuk menciptakan desain *keel* yang ergonomis, diperlukan data dimensi fisik yang sesuai dengan karakteristik pengguna lokal, seperti contoh pada Gambar 2.1 dibawah ini.

No	Dimensi	Laki-laki				Perempuan			
		P_5	P_{50}	P_{95}	SB	P_5	P_{50}	P_{95}	SB
1.	Panjang telapak kaki	230	248	266	11	212	230	248	11
2.	Panjang telapak lengan kaki	165	178	191	8	158	171	184	8
3.	Panjang kaki sampai jari kelingking	186	201	216	9	178	191	204	8
4.	Lebar kaki	82	89	96	4	81	88	95	4
5.	Lebar tangkai kaki	61	66	71	3	49	54	59	3
6.	Tinggi mata kaki	61	66	71	3	59	64	69	3
7.	Tinggi bagian tengah kaki	68	75	82	4	64	69	74	3
8.	Jarak horisontal tangkai mata kaki	49	52	55	2	46	49	53	2



Gambar 2.1. Skema telapak kaki orang Indonesia.

2.2.2 Gait Cycle

Berjalan dan berlari merupakan suatu kegiatan yang paling banyak dilakukan oleh setiap makhluk hidup. Dengan beraktifitas berjalan dan berlari dapat melatih seluruh bagian tubuh terutama jantung, sehingga seseorang yang sering berolahraga *jogging* akan jauh lebih sehat [2]. Ketika seseorang melakukan kegiatan

berjalan terdapat istilah *gait cycle*. *Gait cycle* merupakan suatu siklus berjalan manusia adalah suatu proses biomekanik yang kompleks yang memiliki dua fase utama yaitu *stance* dan *swing*, Fase *stance* terjadi ketika kaki menapak di tanah dan berlangsung sekitar 60% dari keseluruhan siklus, dimulai dari saat tumit menyentuh tanah hingga kaki siap terangkat kembali. Fase *swing* berlangsung sekitar 40% dari siklus berjalan dan menghasilkan dorongan saat melangkah.

Dalam biomekanika berjalan, fase *stance* memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan tubuh. Gaya benturan pada awal langkah diserap oleh struktur kaki, sedangkan pada fase berikutnya energi disimpan dan dilepaskan kembali untuk membantu gerakan melangkah. Pada kaki palsu jenis SACH, mekanisme ini diperoleh melalui kombinasi *keel* dan material *polyurethane*, sehingga desain komponen tersebut sangat berpengaruh terhadap kenyamanan dan efisiensi berjalan pengguna [3]. Gambar 2.2 menunjukkan contoh simulasi siklus *gait cycle*.



Gambar 2.2. *Gait cycle*.

Penjelasan istilah *heel strike*, *stance* dan *toe off* pada kaki prostetik jenis *Solid Ankle Cushioned Heel (SACH)* sebagai berikut :

1. *Heel strike*

Heel strike adalah fase awal saat tumit kaki palsu pertama kali menyentuh permukaan tanah. Pada kaki prostetik jenis SACH, fase ini berfungsi untuk meredam gaya benturan akibat berat badan pengguna. Karena SACH tidak memiliki sendi pergelangan kaki yang aktif, peredam gaya pada fase *heel strike* diperoleh dari bantalan tumit (*cushioned heel*) yang terbuat dari material *polyurethane*. Deformasi plastis pada bantalan tumit membantu mengurangi gaya impak dan meningkatkan kenyamanan pengguna.

2. *Stance*

Stance adalah fase ketika kaki palsu menopang berat badan pengguna dan merupakan fase terpanjang dalam siklus berjalan, yaitu sekitar 60%. Fase ini dimulai setelah *heel strike* dan berakhir sebelum kaki meninggalkan tanah. Pada SACH, kestabilan selama *stance* sangat bergantung pada *keel* sebagai komponen struktural utama. *Keel* berfungsi untuk menahan beban tekan dan lentur serta mendistribusikan gaya secara merata, sehingga kaki palsu tetap stabil meskipun tidak memiliki pergerakan pergelangan kaki yang aktif [4].

3. *Toe-off*

Toe-off adalah fase terakhir dari *stance*, dimana kaki memberikan dorongan terakhir sebelum memasuki fase *swing*. Pada kaki prostetik jenis SACH, *toe-off* terjadi melalui pemulihan deformasi elastis pada *keel* dan material *polyurethane* yang telah terdeformasi selama fase *stance*. Walaupun kemampuan dorongan pada SACH lebih terbatas dibandingkan kaki prostetik berteknologi tinggi, mekanisme ini tetap membantu kelancaran langkah dan transisi menuju fase nyaman [5].

2.2.3 *Keel*

Keel merupakan komponen struktural utama pada kaki prostetik jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH). *Keel* berfungsi sebagai penopang beban tubuh pengguna serta sebagai elemen yang mengatur kekakuan dan respon mekanik kaki palsu selama siklus berjalan. Pada kaki palsu jenis SACH, *keel* menggantikan fungsi sendi pergelangan kaki yang tidak aktif dengan memanfaatkan deformasi elastis material untuk mensimulasikan gerakan dorsifleksi dan plantarfleksi secara terbatas. Gambar 2.3 menunjukkan contoh desain *part keel*.



Gambar 2.3. Contoh *part keel* pada kaki palsu jenis SACH.

2.2.4 Solid Ankle Cushioned Heel (SACH)

Solid Ankle Cushioned Heel (SACH) merupakan salah satu jenis kaki prostetik yang banyak digunakan karena desainnya yang sederhana, stabil dan ekonomis. Kaki palsu SACH tidak memiliki sendi pergelangan kaki aktif, sehingga fungsi gerak pergelangan digantikan oleh deformasi elastis material penyusunannya. Deformasi ini berperan dalam menyerap gaya impak, menompang beban tubuh, dan membantu transisi langkah selama siklus berjalan. Gambar 2.4 menunjukkan contoh desain kaki palsu jenis SACH [6].



Gambar 2.4. Contoh kaki palsu jenis SACH.

2.2.5 Kayu

Kayu merupakan material alami yang banyak digunakan dalam aplikasi struktural karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang baik, mudah dikerjakan, ramah lingkungan dan efisiensi biaya produksi. Secara mekanik kayu bersifat tahan dengan kekuatan tarik, tekan dan lentur. Dalam aplikasi rekayasa rekayasa kayu sering dimanfaatkan sebagai elemen struktural ringan yang mampu menahan beban tekan dan lentur dengan deformasi yang relatif kecil. Selain itu kayu memiliki kemampuan peredaman getaran alami, sehingga cocok digunakan pada komponen yang mengalami beban berulang. Ada beberapa jenis kayu yang akan digunakan untuk produksi contohnya sebagai berikut :

1. Kayu Kalimantan merupakan kelompok kayu keras yang banyak digunakan untuk aplikasi struktural. Kayu ini memiliki densitas menengah hingga tinggi serta kekuatan mekanik yang baik terhadap beban tekan dan lentur

2. Kayu Jati dikenal sebagai salah satu kayu terbaik dalam aplikasi teknik dan konstruksi. Kayu ini memiliki densitas tinggi, stabilitas dimensi yang sangat baik, Serta ketahanan alami terhadap kelembapan. Sifat mekanik kayu jati meliputi kekuatan lentur dan tekan yang tinggi, modulus elastisitas yang besar dan umur pakai yang panjang
3. Kayu Mahoni merupakan kayu keras dengan densitas menengah yang memiliki keseimbangan antara kekuatan, berat dan kemudahan permesinan. Sifat kayu mahoni meliputi kekuatan mekanik yang baik terhadap beban lentur dan tekan, Berat yang lebih ringan dibandingkan dengan kayu yang lain, Stabilitas dimensi yang baik dengan tingkat penyusutan rendah.

2.2.6 Resin *polyurethane*

Polyurethane adalah elastomer dari hasil reaksi dua komponen yaitu *poliol* (A) dan *isosianat* (B). Material ini bersifat fleksibel, memiliki katahanan 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 dalam bidang prostetik [7].

Salah satu kelebihan material *polyurethane* yaitu memiliki kemampuan yang baik dalam mempertahankan struktur dan bentuknya saat terkena beban dinamis dan siklik. Sejumlah penelitian material ini dan hasilnya material *polyurethane* mampu menahan beban berulang [8].

2.2.7 *SolidWorks*

Solidworks merupakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) dan *Computer Aided Engineering* (CAE) berbasis parameterik yang banyak digunakan dalam proses perancangan dan analisis produk teknik. *Solidworks* memungkinkan untuk membuat model 3 dimensi secara presisi, melakukan modifikasi desain secara parameterik, serta melakukan simulasi mekanik sebelum produk diproduksi secara fisik [9].

Dalam bidang biomekanika dan prostetik, *Solidworks* berperan penting untuk merancang geometri komponen, mengevaluasi performa mekanik, dan mengoptimalkan desain agar sesuai dengan kebutuhan fungsional [10].

2.2.8 Ex-Scan

Ex-Scan merupakan perangkat lunak pemindaian 3 dimensi (*3D Scanning software*) yang digunakan untuk memperoleh data geometrik objek secara digital dengan tingkat akurasi tinggi [11]. Dalam bidang prostetik, *Ex-Scan* berperan sebagai alat bantu penting untuk merekam bentuk anatomi atau komponen kaki palsu secara presisi, sehingga desain prostetis dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna.

Pada perancangan kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel (SACH)*, *Ex-Scan* digunakan untuk memindai bentuk telapak kaki atau model *SACH* sebagai referensi awal desain. Data hasil pemindaian berupa *point cloud* atau *3D mesh* yang merepresentasikan kontur permukaan objek secara detail. Informasi geometrik ini sangat penting untuk memastikan kesesuaian dimensi.

2.2.9 Fusion 360

Fusion 360 merupakan software berbasis *Computer Aided Design (CAD)*, *Computer Aided Engineering (CAE)* dan *Computer Aided Manufacturing (CAM)* yang terintegritasi dalam satu platform [12]. Perangkat lunak ini banyak digunakan dalam perancangan simulasi proses manufaktur karena kemampuannya menggabungkan desain, analisis serta proses produksi.

Dalam pengembangan *keel* kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel (SACH)*, *Fusion 360* digunakan terutama pada tahap simulasi produksi. Model *keel* yang telah dirancang menggunakan perangkat lunak CAD dapat diimpor ke *Fusion 360*.

2.2.10 Flash Print

Flash Print merupakan perangkat lunak *slicing* dan simulasi *3D printing* yang dikembangkan oleh *FlashForge* yang berbasis *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Perangkat lunak ini berfungsi sebagai penghubung antara model 3 dimensi hasil perancangan CAD dengan mesin *3D Printer*.

2.2.11 JIG Fixture

JIG *Fixture* merupakan *part* untuk alat bantu cekam pada proses pemesin CNC 3 Axis, Dalam proses pemesinan, ketelitian dimensi, kualitas permukaan, serta konsistensi hasil produksi sangat dipengaruhi oleh sistem pengecaman benda kerja [13]. Penggunaan JIG *Fixture* bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada keterampilan operator dalam menentukan posisi benda kerja. Dengan adanya JIG *Fixture*, waktu penyetelan dapat diminimalkan, kesalahan posisi dapat dikurangi, serta produktivitas dan efisiensi proses pemesinan dapat ditingkatkan [14].

2.2.12 Casting

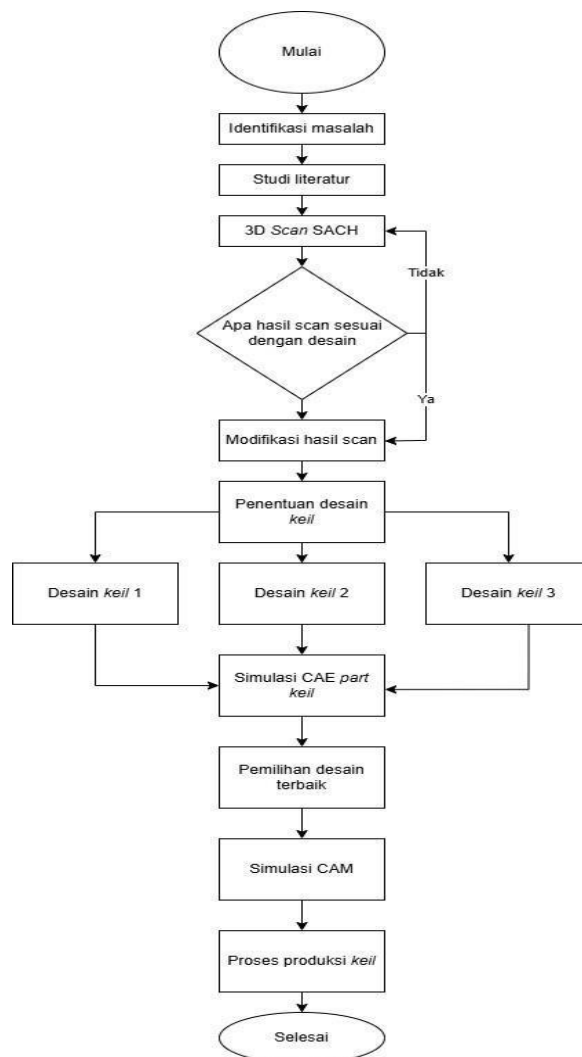
Metode *casting* merupakan salah satu proses manufaktur yang umum digunakan dalam pembuatan komponen yang berbahan polimer, termasuk pada produksi kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH). Pada metode ini, material *polyurethane* dituangkan kedalam cetakan (*mold*) yang telah dibentuk sesuai dengan geometri produk, kemudi dibiarkan mengeras hingga membentuk komponen dengan bentuk dan sifat mekanik [15].

BAB 3

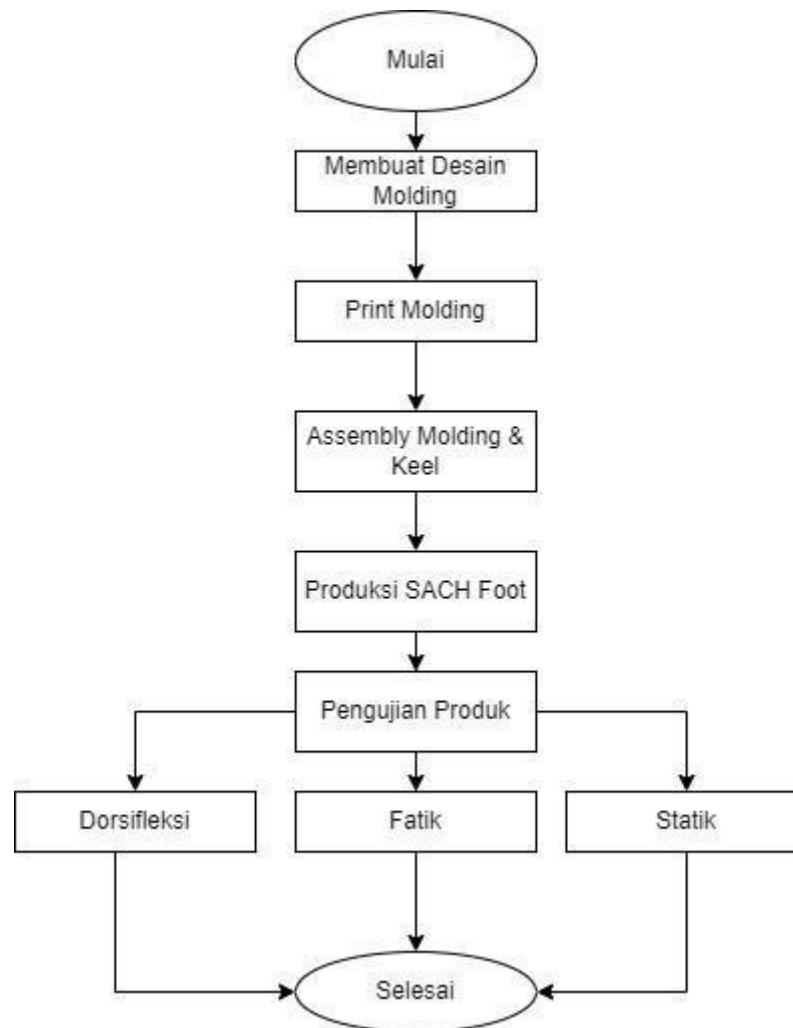
METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara bertahap dengan dua tahapan melalui tahapan sistematis dan terstruktur untuk mencapai tujuan penelitian yang sudah ditetapkan. Tahapan tersebut dirangkai dalam diagram alur penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 untuk penelitian *keel* dan ditunjukkan pada Gambar 3.2 untuk kaki palsu jenis SACH.



Gambar 3.1. Diagram alur penelitian *keel*.



Gambar 3.2. Diagram alur proses produksi kaki palsu jenis SACH.

3.2 Kriteria produksi *keel* dan kaki jenis SACH

Untuk melakukan produksi *keel* dan kaki SACH, perlu menentukan kriteria perancangan terlebih dahulu. Kriteria tersebut akan menjadikan acuan dalam pembuatan produk. Terdapat dua jenis kriteria yaitu produk dan desain. Berikut merupakan kriteria-kriteria pada perancangan produksi *keel* untuk kaki palsu jenis SACH.

3.2.1 Kriteria produk

1. *Keel* dan kaki palsu SACH mampu untuk diberi beban hingga 150 kg.
2. *Keel* mampu menahan beban berulang dan kuat terhadap *giat cycle*.

3.2.2 Kriteria desain

1. Desain untuk *part keel* tidak mudah lepas pada saat penggunaan.
2. Desain sesuai secara dimensi dan fungsi.
3. Desain memiliki estetika yang bagus secara visual.
4. *Keel* dapat diproduksi dengan mesin CNC 3 *axis*.
5. Keselarasan *part keel* dengan kaki palsu jenis SACH.

3.3 Alat dan Bahan

Untuk mencapai seluruh produksi dalam tahapan ini, diperlukan sejumlah alat dan bahan yang digunakan pada setiap proses tahapan produksi *keel* untuk kaki palsu jenis SACH. Pemilihan alat dan bahan yang disebutkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1. Tabel alat.

No	Peralatan	Fungsi
1	Laptop	Perangkat perancangan, simulasi hingga penulisan
2	3D <i>Scan</i>	<i>Scan</i> kaki palsu SACH
3	3D <i>Print</i>	<i>Print part molding</i>
4	Solidworks	Desain produk <i>keel</i> dan SACH dan analisis desain
5	Fusion 360	Simulasi manufaktur CNC 3 <i>Axis</i>
6	CNC 3 Axis	Mesin produksi <i>keel</i>
7	Mesin <i>Drill</i>	Pembuatan lubang pada <i>keel</i>
8	<i>Molding</i>	Alat untuk <i>casting</i> produk
9	<i>FlashPrint</i>	Perangkat lunak untuk proses 3D <i>Print</i>
10	Mata bor	Mata pisau untuk pembuatan lubang pada <i>keel</i>
11	Timbangan Digital	Alat ukur untuk mengetahui berat <i>polyurethane</i>

12	Mur dan Baut	Untuk mengunci <i>mold</i> dan <i>keel</i> agar presisi secara posisi untuk produksi
13	JIG <i>Fixture</i>	Alat pencekaman untuk produksi <i>keel</i> setelah sisi yang pertama selesai
14	<i>End mill</i>	Mata pisau untuk proses <i>milling</i>
15	Kunci pas	Alat pengunci mata pisau dan <i>molding</i>
16	Mesin Vakum	Mesin untuk meminimalisir terjadinya <i>bubble</i> pada saat proses <i>casting</i>
17	<i>Cutter</i>	Mata pisau untuk memotong bagian bekas <i>casting</i> yang kurang rapi
18	Amplas	Penghalus <i>molding</i> agar
18	Gelas ukur	Wadah <i>polyurethane</i> sebelum pencampuran
19	Mesin uji fatik	Pengujian fatik
20	Mesin uji statik	Pengujian statik
21	Mesin uji dorsifleksi	Pengujian dorsifleksi

Tabel 3.2. Tabel bahan.

1	<i>Polyurethane (TMPU-70)</i>	Material SACH
2	Kayu (Jati,Kalimantan dan Mahoni)	Material <i>part keel</i>
3	Pewarna	Untuk pewarna <i>polyurethane</i>
4	Release agent	Cairan pelumas <i>mold</i> agar pada saat pelepasan produk dengan <i>mold</i> tidak lengket
5	Fillament PLA +	Material utama pada 3D <i>Print</i>
6	Dempul	Meratakan permukaan <i>molding</i>
7	Lem G	Perekat antara <i>part molding</i> yang terbagi menjadi 2 bagian

3.4 Perancangan produk

Dalam tahap ini melakukan suatu perancangan perlu menentukan geometri, presisi dan kualitas produk. Proses ini dibagi menjadi beberapa tahapan yang dimulai dari *scan* 3D geometri kaki palsu jenis SACH, modifikasi SACH yang sudah ada, desain *keel* dengan analisis kekuatan sampai proses produksi *keel*, dan pencetakan yang terdiri dari *mold* dan *core*.

3.4.1 Pembuatan alternatif desain *part keel*

Untuk material *keel* pada produk sebelumnya biasanya menggunakan material plastik atau PLA. Dengan mempertimbangkan hasil produk-produk sebelumnya material plastik dan PLA mudah sekali patah dan lepas pada saat pengujian, Hal itu mendasari bahwa material kayu bisa menjadi solusi untuk produk selanjutnya, karena material kayu terkenal dengan kekerasan. Selain kekerasannya material kayu mudah didapatkan dan biaya bisa lebih murah untuk material kayu. Pembuatan desain *part keel* ini mempunyai parameter dari material kayu mahoni, jati dan kalimantan yang akan digunakan. Berikut parameter material kayu seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3 dibawah ini.

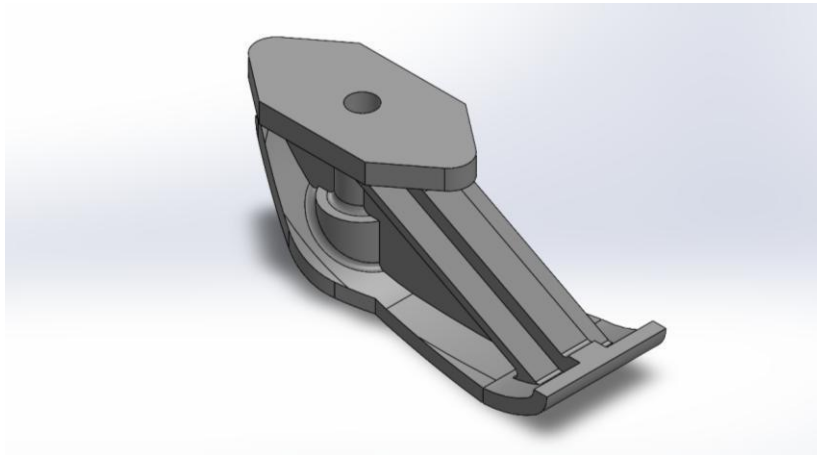
Tabel 3.3. Parameter material kayu.

Material	Modulus elastis (N/m ²)	Poison ratio (-)	Mass density (kg/m ³)	σ_{max} (N/m ²)	σ_y (N/m ²)
Mahoni	14×10^8	0,32	670	72	$4,5 \times 10^7$
Kalimantan	20×10^8	0,349	1040	130	7×10^7
Jati	$19,5 \times 10^8$	0,34	670	95	$5,7 \times 10^7$

3.4.1.1 Desain *keel* alternatif 1

Desain *keel* alternatif pertama seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3, Pada *part keel* ini desain perlu disesuaikan untuk proses produksi menggunakan mesin

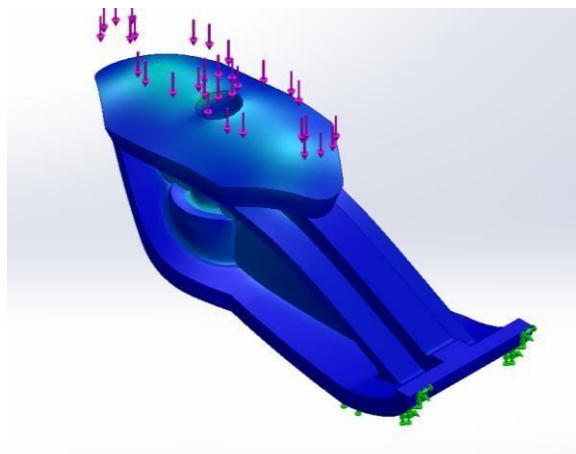
CNC 3 *axis*. Desain ini memiliki alas yang menyesuaikan kaki prostetik yang sudah ada dan modifikasi dari produk yang sudah pernah dibuat.



Gambar 3.3. Desain *keel* alternatif 1.

3.4.1.2 Simulasi CAE desain *keel* alternatif 1

Setelah mendapatkan desain *keel* alternatif 1 selanjutnya simulasi CAE pada desain dengan parameter material yang sudah ditunjukkan pada Tabel 3.3. Dengan cara memberikan *load* senilai 2250 N pada tanda panah biru yang terletak pada permukaan alas atas *part keel*, lalu memberikan *fixed* pada tanda panah hijau yang terletak pada permukaan alas bawah *part keel*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.4. Simulasi CAE desain *keel*-1.

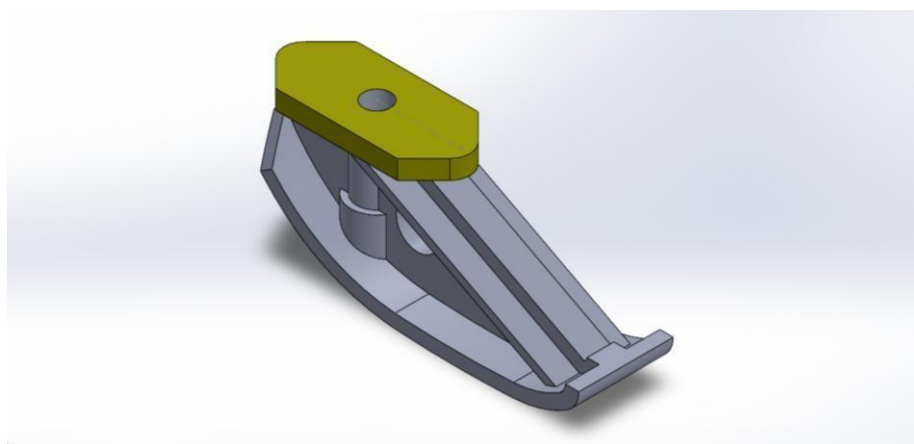
Hasil simulasi CAE pada desain *keel* alternatif 1 dapat dilihat pada Tabel 3.4. Untuk parameter material simulasi desain *keel* alternatif 1 tetap menyesuaikan dengan yang sudah ditentukan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.4. Hasil parameter simulasi desain *keel* 1.

Material	<i>Von mises</i> (N/m ²)	<i>Safety factor</i> (-)
Kayu mahoni	$2,85 \times 10^7$	1,58
Kayu kalimantan	$2,68 \times 10^7$	2,61
Kayu Jati	$2,77 \times 10^7$	1,98

3.4.1.3 Desain *keel* alternatif 2

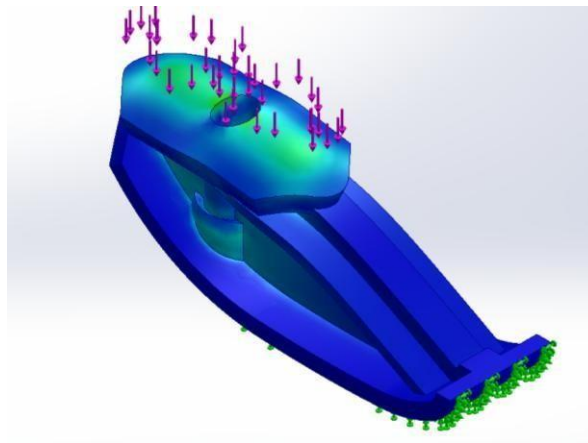
Pembuatan desain *keel* alternatif kedua seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5 menunjukkan desain *keel*, pada *part keel* ini desain perlu disesuaikan dengan JIG yang akan dibuat untuk proses produksi menggunakan mesin CNC 3 *axis*. Desain ini memiliki alas yang menyesuaikan kaki prostetik yang sudah ada untuk desain lebih simetris dengan kaki palsu jenis SACH dan memberik tambahan lubang pada desain yang berfungsi agar produk kaki palsu jenis SACH dengan material *polyurethane* dan *part keel* tidak mudah lepas.



Gambar 3.5. Desain *keel* alternatif 2.

3.4.1.4 Simulasi CAE desain *keel* alternatif 2

Dengan cara yang sama seperti simulasi CAE desain *keel* sebelumnya, setelah mendapatkan desain *keel* alternatif 2 selanjutnya simulasi CAE pada desain dengan parameter material yang sudah ditunjukkan pada Tabel 3.3. Dengan cara memberikan *load* senilai 2250 N pada tanda panah biru yang terletak pada permukaan alas atas *part keel*, lalu memberikan *fixed* pada tanda panah hijau yang terletak pada permukaan alas bawah *part keel*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3.6. Simulasi CAE desain *keel*-2.

Hasil simulasi CAE pada desain *keel* alternatif 2 dapat dilihat pada Tabel 3.5. Untuk parameter material simulasi desain *keel* alternatif 2 tetap menyesuaikan dengan yang sudah ditentukan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.5. Parameter simulasi desain *keel* 2.

Material	<i>Von mises</i> (N/m ²)	<i>Safety factor</i> (-)
Kayu mahoni	$1,85 \times 10^7$	2,47
Kayu kalimantan	$1,724 \times 10^7$	4
Kayu Jati	$2,77 \times 10^7$	1,98

3.4.1.5 Desain *keel* alternatif 3

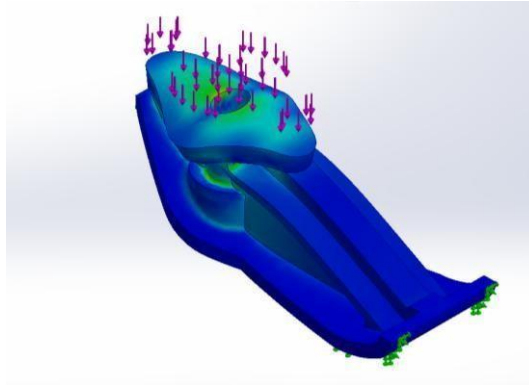
Pembuatan desain *keel* alternatif ketiga seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7 menunjukkan desain *keel*, pada *part keel* ini desain perlu disesuaikan dengan JIG yang nantinya akan diproses produksi menggunakan mesin CNC 3 axis. Desain ini memiliki alas yang menyesuaikan kaki prostetik yang sudah ada. Dengan memberi tambahan estetika untuk *keel* dilihat secara visual lebih bagus dan tidak mudah lepas saat dipakai.



Gambar 3.7. Desain *keel* alternatif 3.

3.4.1.6 Simulasi CAE desain *keel* alternatif 3

Dengan cara yang sama seperti simulasi CAE desain *keel* sebelumnya, setelah mendapatkan desain *keel* alternatif 3 selanjutnya simulasi CAE pada desain dengan parameter material yang sudah ditunjukkan pada Tabel 3.3. Dengan cara memberikan *load* senilai 2250 N pada tanda panah biru yang terletak pada permukaan alas atas *part keel*, lalu memberikan *fixed* pada tanda panah hijau yang terletak pada permukaan alas bawah *part keel*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Simulasi CAE desain *keel*-3.

Hasil simulasi CAE pada desain *keel* alternatif 3 dapat dilihat pada Tabel 3.6. Untuk parameter material simulasi desain *keel* alternatif 3 tetap menyesuaikan dengan yang sudah ditentukan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.6. Parameter simulasi desain *keel* 3.

Material	Von mises (N/m ²)	Safety factor (-)
Kayu mahoni	$1,62 \times 10^7$	2,77
Kayu kalimantan	$1,56 \times 10^7$	4,4
Kayu Jati	$1,85 \times 10^7$	3

3.5 Evaluasi desain *part keel*

Untuk menentukan alternatif desain *keel* yang paling sesuai dengan proses produksi *part keel* kaki prostetik jenis SACH menggunakan mesin CNC 3 Axis, maka dilakukan evaluasi terhadap ketiga desain yang sudah dibuat dalam bentuk sketsa. Evaluasi ini memiliki tujuan mengetahui kemampuan setiap desain *keel* dalam memenuhi kebutuhan produksi, baik secara fungsional, teknis dan estetika dalam hasil produk. Dalam memenuhi tujuan evaluasi tersebut, digunakan pendekatan matriks pengambilan keputusan pada tabel, yang mengadopsi beberapa kriteria penting sesuai dengan parameter proses produksi.

Parameter evaluasi memiliki bobot sesuai tingkat urgensi dan penilaian dilakukan berdasarkan performa dari masing-masing alternatif desain *keel*, Seperti pada Tabel 3.7 merupakan skor pada setiap kriteria pada desain yang sudah ada.

Tabel 3.7. Matriks pengambilan keputusan desain *keel*.

No.	Kriteria	Bobot	Desain 1	Desain 2	Desain 3
1	Kemudahan produksi dengan mesin CNC 3 <i>axis</i>	30 %	3	2	3
2	Keselarasan bentuk <i>part keel</i> terhadap SACH	15 %	3	3	4
3	Kesesuaian desain secara dimensi dan fungsi terhadap SACH	15 %	3	2	3
4	Estetika yang bagus secara visual	20 %	4	2	4
5	Desain <i>keel</i> tidak mudah lepas saat penggunaan	20 %	3	3	4
	Skor pembobotan		3,2	2,35	3,55

Keterangan :

- Skala penilaian 1 (Buruk), 2 (Cukup), 3 (Baik), dan 4 (Sangat baik).
- Skor akhir dikalkulasikan dengan menjumlahkan hasil perkalian antara bobot nilai tiap kriteria masing-masing alternatif desain.

Pada matriks pengambilan keputusan ini, penentuan bobot didasarkan pada tingkat kepentingan masing-masing kriteria terhadap keberhasilan proses manufaktur mesin CNC 3 *axis*.

3.6 Desain *keel* yang terpilih

Desain *keel* dibuat dengan menyesuaikan kaki prostek jenis SACH yang sudah dimodifikasi dengan menyesuaikan beberapa bagian penting yang sudah ada di desain. *Keel* di desain untuk menahan beban dan mendistribusikan beban. *Keel* dirancang menggunakan material kayu sebagai alternatif dari material plastik yang umum digunakan, dengan tujuan meningkatkan kekuatan struktural dan umur pakai. Konsep perancangan *keel* difokuskan pada kemampuan menahan beban

statik dan dinamik, fleksibilitas yang memadai saat fase dorsifleksi, serta kompatibilitas dengan material SACH yang berbahan *polyurethane* tipe TMPU70. Selain itu, desain *keel* disesuaikan agar dapat diproduksi menggunakan proses pemesinan CNC 3 *axis*. Maka dari itu untuk desain *part keel* yang terpilih adalah desain *keel* nomor 3.

3.7 Metode Pengujian

Metode pengujian pada kaki palsu tipe SACH dilakukan untuk memvalidasi kekuatan, kenyamanan, dan ketahanan desain *keel* yang telah diproduksi. Prosedur pengujian mengacu pada standar kekuatan struktur kaki palsu yang meliputi tiga tahap utama:

3.7.1 Pengujian Dorsifleksi

Pengujian dorsifleksi bertujuan mengevaluasi respon elastis dan kekauan kaki SACH ketika mengalami pembebanan ke arah depan, khususnya pada fase *heel strike* dan *stance* [16]. Pada pengujian ini, gaya diberikan pada bagian *forefoot* parameter yang wajib diamati meliputi besar deformasi dan kemampuan material dalam menyerap serta mengembalikan energi tanpa mengalami kerusakan pada permukaan maupun *keel*. Contoh pengujian dorsifleksi pada kaki palsu jenis SACH yang ada di Gambar 3.9 dibawah ini.



Gambar 3.9. Pengujian dorsifleksi.

3.7.2 Pengujian Statik

Pengujian statik dilakukan dengan memberikan beban tetap pada kaki prostetik untuk mensimulasikan kondisi saat pengguna berdiri atau menahan beban tubuh dalam waktu tertentu. Pengujian ini digunakan untuk menilai kekuatan struktur, kestabilan bentuk, serta faktor keamanan dari kaki SACH terhadap beban maksimum yang bekerja. Hasil pengujian statik menunjukkan kemampuan komponen dalam menahan beban tanpa mengalami kegagalan struktural. Untuk pengujian statik terdapat dua bagian yang harus di uji yaitu bagian depan dan belakang seperti pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11 dibawah ini.



Gambar 3.10. Pengujian statik (belakang).



Gambar 3.11. Pengujian statik (depan).

3.7.3 Pengujian Fatik

Pengujian fatik bertujuan untuk mengetahui ketahanan kaki SACH terhadap beban berulang yang terjadi selama aktivitas berjalan. Beban diberikan secara siklik dalam jumlah siklus tertentu untuk mensimulasikan penggunaan jangka panjang [17]. Parameter utama yang dievaluasi meliputi umur pakai, penurunan kekakuan, serta potensi terjadinya retak atau deformasi akibat kelelahan material. Pengujian ini penting untuk memastikan bahwa kaki palsu memiliki daya tahan yang memadai selama masa penggunaannya. Contoh pengujian fatik kaki palsu jenis SACH ada pada Gambar 3.12 dibawah ini.



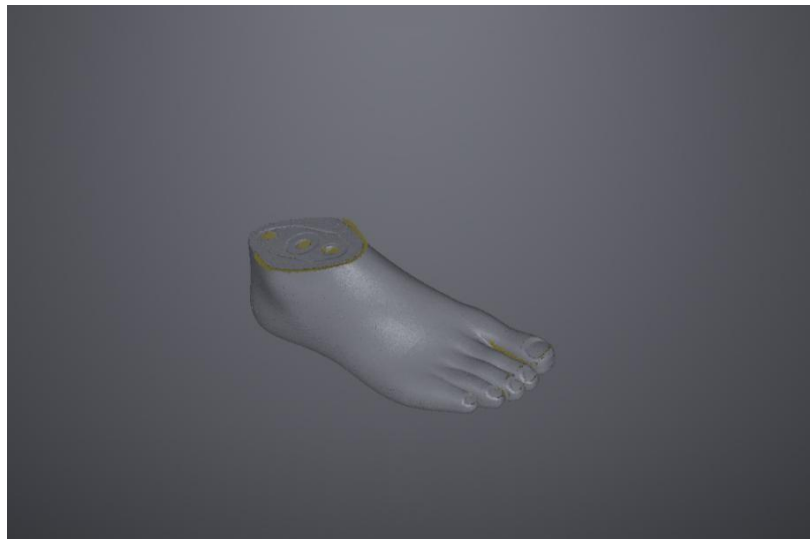
Gambar 3.12. Pengujian fatik.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

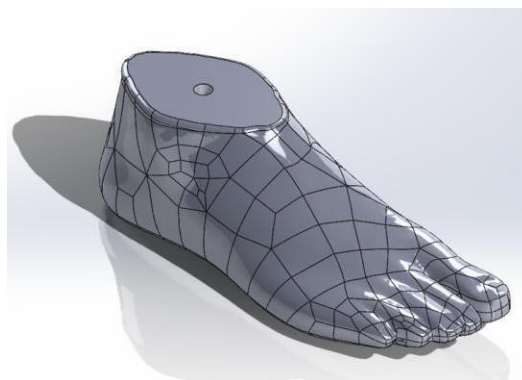
4.1 3D *scan* SACH

3D *scan* SACH terhadap bentuk kaki prostetik untuk bisa mendapatkan desain *keel* ini merupakan tahap awal proses perancangan SACH. Proses ini dilakukan dengan menggunakan 3D *Scanner Ev Scan* berbasis fotogrametri yang menghasilkan desain data digital dengan format .STL seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dibawah ini



Gambar 4.1. Hasil *scan* kaki palsu jenis SACH.

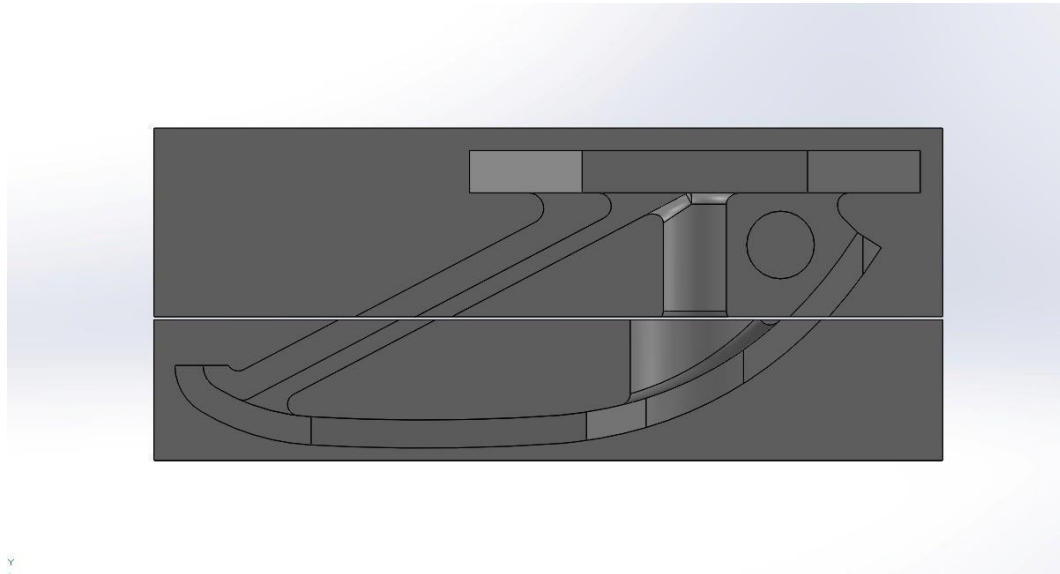
Data hasil *scan* yang sudah didapatkan lalu dimodifikasi menggunakan *software SolidWorks*. Pada tahapan ini bertujuan untuk mengekstrak geometri yang presisi sehingga desain SACH dan *keel* dapat disesuaikan dengan akurat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dibawah ini.



Gambar 4.2. Modifikasi desain kaki palsu jenis SACH.

4.2 Desain JIG *Fixture*

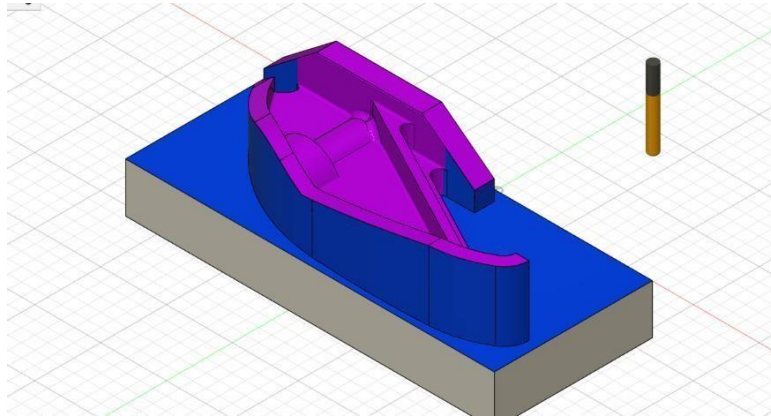
Pada Gambar 4.3 menunjukkan desain JIG *Fixture* dibuat dengan menyesuaikan desain *part keel* dengan menyesuaikan beberapa bagian penting yang sudah di desain untuk mendapatkan sisi yang rata dan halus pada produk.



Gambar 4.3. Desain JIG *fixture*.

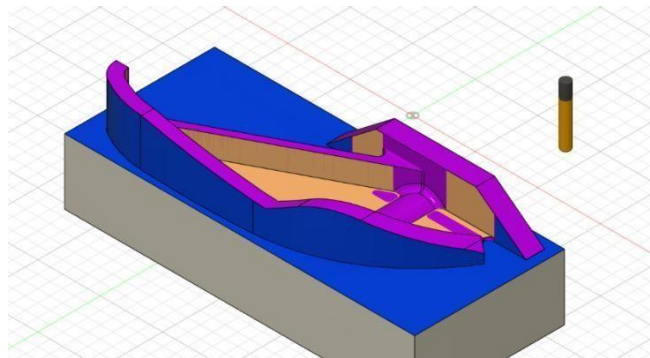
4.3 Simulasi CAM *part keel*

Setelah mendapatkan desain *keel* yang sesuai lalu dilanjutkan untuk simulasi *machining part keel* dengan menggunakan perangkat lunak *Fusion 360* untuk merencanakan dan memverifikasi proses pemesinan sebelum produksi aktual. Simulasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa desain *keel* dapat diproduksi secara efisien menggunakan mesin CNC 3 *axis*, meminimalkan kesalahan pemotongan, serta menghasilkan kualitas permukaan yang sesuai dengan kebutuhan kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 simulasi sisi 1 untuk mendapatkan 60 % dari hasil produk.



Gambar 4.4. Simulasi sisi 1.

Lalu pada Gambar 4.5 simulasi sisi 2 pada *part keel* melanjutkan simulasi sisi 1 dengan membalikan sisi yang pertama di cekam menggunakan JIG lalu untuk sisi yang kedua dapat di *machining* sesuai strategi pemotongan.



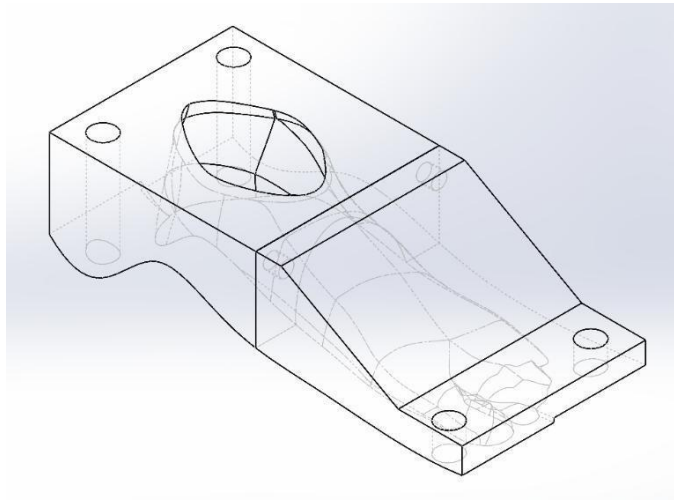
Gambar 4.5. Simulasi sisi 2.

4.4 Desain *cavity* dan *core*

Solid Ankle Cushioned Heel (SACH) umumnya diproduksi menggunakan proses *casting* dengan material *polyurethane*. Oleh karena itu, desain *mold* dan *core* menjadi aspek penting untuk menghasilkan bentuk *foot* yang presisi, kualitas permukaan yang baik, serta memudahkan proses pelepasan produk setelah *casting*.

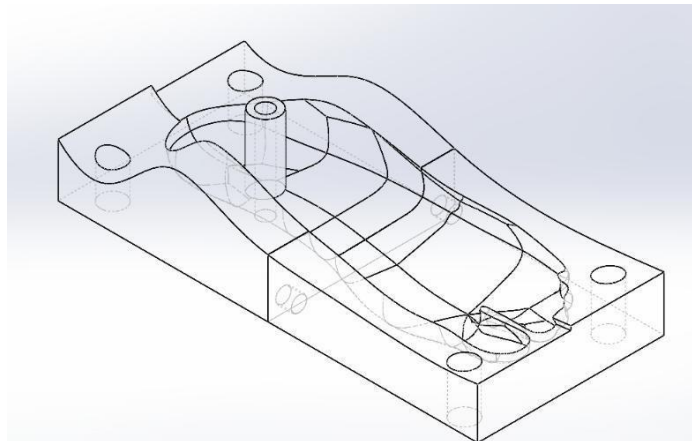
Mold dirancang dengan sistem *plug and play* yang basisnya seperti lego, hal ini berarti *mold* dicetak dalam beberapa bagian terpisah untuk menghindari keterbatasan volume maksimal 3D *printer*, serta mengurangi resiko kegagalan dalam proses *printing*. Desain disambung antara modul *mold* dibuat menyerupai lego, sehingga dapat dirakit secara akurat pada setiap bagiannya. Seperti yang

ditunjukkan pada contoh Gambar 4.6 menunjukan bagian desain *molding* yaitu desain *cavity* SACH.



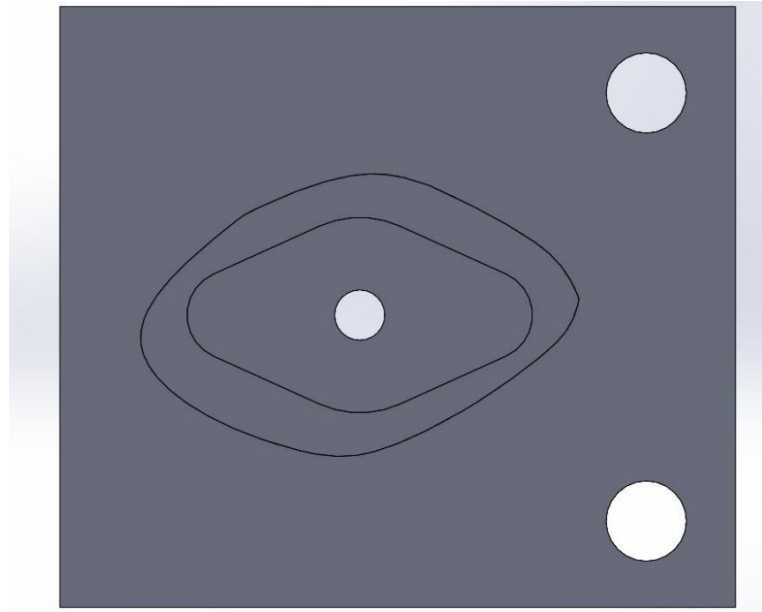
Gambar 4.6. Cavity SACH.

Pada Gambar 4.7 menunjukan bagian desain *molding* yaitu desain *core* SACH.



Gambar 4.7. Core SACH.

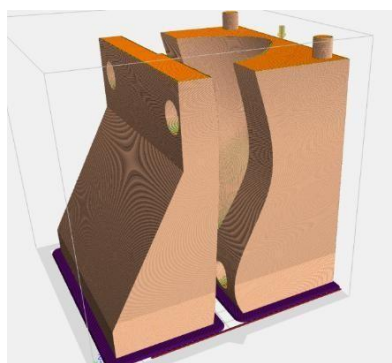
Pada Gambar 4.8 menunjukan *part* bantuan untuk proses *casting* yaitu *part* penutup pada bagian atas *cavity*, ini berfungsi untuk mendapatkan profil permukaan SACH yang datar dan rapi.



Gambar 4.8. *Part penutup molding.*

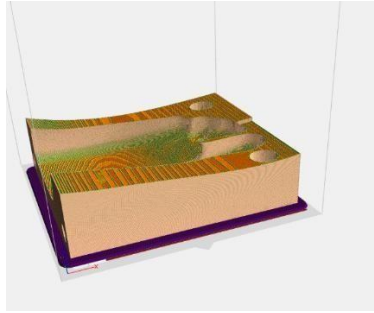
4.5 *Slicing cavity dan core*

Cavity dan *core* pada *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) dapat diproduksi menggunakan teknologi *3D printing* sebagai alternatif pembuatan cetakan yang cepat dan fleksibel. Untuk memastikan hasil cetakan sesuai dengan desain dan mampu digunakan pada proses *casting polyurethane*, tahap *slicing* menjadi langkah penting sebelum proses pencetakan dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 merupakan *part cavity* yang akan di *slicing*.



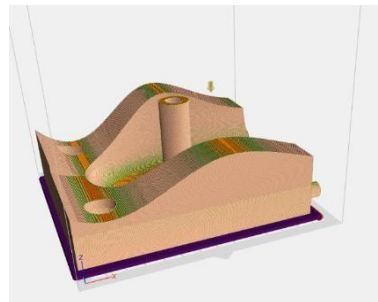
Gambar 4.9. *Slicing cavity.*

Slicing part core pada *molding* kaki palsu jenis SACH menjadi dua proses terpisah dikarenakan dimensi mesin *3D Print* tidak cukup. Untuk proses *slicing core-1* dapat dilihat pada Gambar 4.10 dibawah ini.



Gambar 4.10. Slicing core-1.

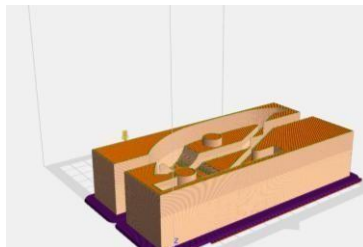
Dilanjutkan setelah *slicing core-1* kemudian *slicing core-2* dapat dilihat pada Gambar 4.11 dibawah ini.



Gambar 4.11. Slicing core-2.

4.6 *Slicing JIG Fixture*

JIG Fixture merupakan alat bantu cekam pada saat proses pemesinan CNC 3 axis , Pada sisi desain *keel* terlihat dua sisi permukaan tidak simeteris sehingga susah untuk pengeckamaan pada saat proses pemesinan di permukaan selanjutnya, maka dari itu untuk produksi *keel* diperlukan *JIG Fixture* agar pengeckaman dapat rata dan hasil sesuai dengan desain yang ada. Pada Gambar 4.12 menunjukan *slicing* untuk *part* bantu yaitu *JIG Fixture*.



Gambar 4.12. *Slicing JIG fixture.*

4.7 Hasil Produksi JIG Fixture

JIG *fixture* yang digunakan pada proses *machining* sisi kedua *keel* dirancang untuk menjamin kestabilan posisi benda kerja selama proses pemesinan lanjutan setelah sisi pertama selesai dikerjakan. *Fixture* ini berfungsi sebagai alat bantu pencekaman yang memastikan orientasi *keel* tetap presisi dan konsisten terhadap sistem koordinat mesin CNC pada Gambar 4.13. Pada tahap ini, *keel* ditempatkan pada JIG *fixture* dengan posisi terbalik mengikuti bentuk kontur sisi pertama yang telah dimesin. Permukaan hasil *machining* sisi pertama digunakan sebagai datum utama, sehingga keselarasan antara sisi pertama dan sisi kedua dapat terjaga. JIG *fixture* dilengkapi dengan dudukan berbentuk negatif (*contour pocket*) yang menyesuaikan geometri *keel*, sehingga mampu meminimalkan pergeseran dan getaran selama proses pemotongan. Pada Gambar 4.13 menunjukkan hasil JIG *fixture* yang sudah diproduksi menggunakan mesin 3D *print*.



Gambar 4.13. Hasil 3D *print* JIG *fixture*.

4.8 Proses & Hasil Produksi *Keel*

Hasil dari produksi *part keel* kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) diperoleh melalui proses pemesinan menggunakan mesin CNC 3 *axis* dengan material kayu. Proses CNC dipilih untuk menghasilkan dimensi yang presisi, kontur permukaan yang konsisten, serta repetabilitas yang baik sesuai dengan desain yang telah dirancang pada perangkat lunak CAD seperti contoh yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 proses *machining* sisi yang pertama.



Gambar 4.14. Proses *machining* sisi-1.

Setelah mendapatkan sisi yang pertama dilanjutkan dengan mencekam sisi yang pertama menggunakan *JIG fixture* dan melanjutkan proses *machining* sisi yang kedua seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 dibawah ini.



Gambar 4.15. Proses *machining* sisi-2.

Pada Gambar 4.16 hasil pemesinan menunjukkan kesesuaian bentuk dengan model desain, khususnya pada bagian lengkungan bawah dan area kontak dengan SACH. Dimensi utama *keel* berada dalam toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi prostetik, sehingga memungkinkan integrasi yang baik. Permukaan *keel* setelah proses CNC relatif halus dengan bekas pahat yang minimal, terutama pada area yang dikerjakan menggunakan strategi *finishing toolpath*.



Gambar 4.16. Hasil proses CNC.

Beberapa bagian tertentu masih memerlukan proses *finishing* manual seperti pengamplasan ringan untuk menghilangkan sisa *tool mark* dan meningkatkan kualitas permukaan untuk mendapatkan produk yang sesuai pada desain yang sudah ada seperti Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Produk *keel*.

Secara struktural, *keel* hasil produksi memiliki kekakuan yang baik dan tidak menunjukkan cacat seperti retak atau deformasi akibat proses pemesinan. Dengan demikian, hasil produksi *keel* menggunakan mesin CNC memenuhi kriteria fungsional dan geometris yang dibutuhkan untuk diaplikasikan pada kaki palsu jenis SACH serta layak untuk dilanjutkan ke tahap pengujian mekanik dan perakitan. Untuk hasil setelah produksi perlu penimbangan untuk mengetahui nilai berat *part keel* yang sudah diproduksi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

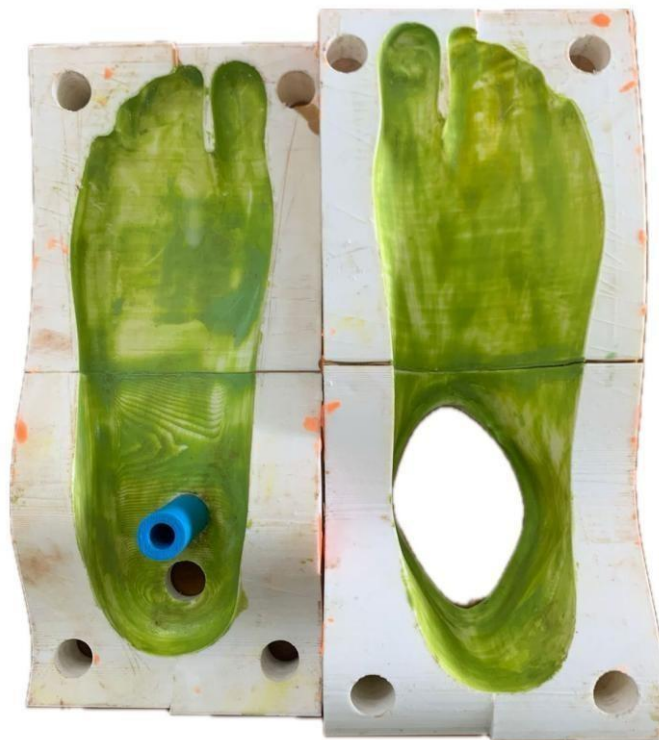
Tabel 4.1. Berat produk *keel* tiap material.

Material	Berat (gram)
Mahoni	49
Kalimantan	62
Jati	57

4.8.1 Hasil Produksi *Cavity* dan *Core*

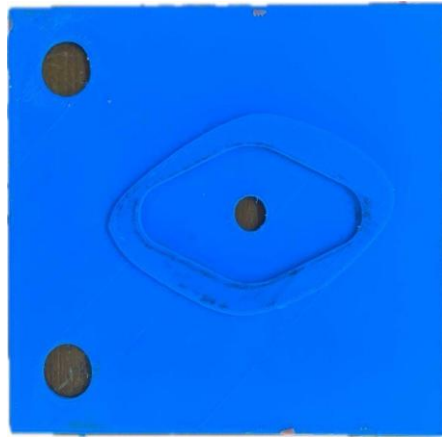
Setelah proses desain dan simulasi pada perangkat lunak selesai, tahapan selanjutnya adalah merealisasikan *cavity* dan *core* dengan *3D Print*. *Cavity* dan *Core Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) yang telah diproduksi melalui proses *3D printing* selanjutnya dilakukan tahap *finishing* untuk meningkatkan kualitas permukaan dan akurasi hasil cetakan. Proses *finishing* diawali dengan pengamplasan bertahap menggunakan amplas dengan tingkat kekasaran kasar hingga halus. Tahapan ini bertujuan untuk mengurangi garis lapisan (*layer lines*) yang dihasilkan dari proses pencetakan *Fused Deposition Modeling* (FDM) serta meratakan permukaan *mold*.

Setelah proses pengamplasan awal, dilakukan aplikasi dempul pada bagian permukaan *cavity* dan *core* yang masih memiliki ketidak sempurnaan, seperti poripori kecil, celah antar lapisan, dan ketidakrataan permukaan. Dempul diaplikasikan secara merata dan dibiarkan mengering sesuai waktu yang direkomendasikan, kemudian dilanjutkan dengan proses pengamplasan ulang hingga diperoleh permukaan yang lebih halus. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 dibawah ini hasil *3D print molding* dan melakukan *finishing* pada *molding*.



Gambar 4.18. Hasil *print* dan *finishing molding*.

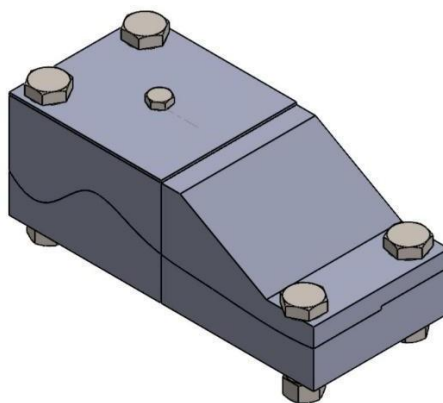
Hasil *finishing* menunjukkan peningkatan signifikan pada kualitas permukaan *mold*, ditandai dengan berkurangnya tekstur lapisan cetak dan meningkatnya kehalusan permukaan *cavity* dan *core*. Kondisi permukaan yang lebih halus ini berpengaruh positif terhadap kualitas hasil *casting polyurethane* TMPU-70, karena dapat meminimalkan cacat permukaan pada SACH, seperti bekas garis cetak atau ketidakaturan bentuk. Selain meningkatkan kualitas visual, proses *finishing* juga membantu memastikan kesesuaian antara *cavity* dan *core* saat proses perakitan *mold*. Dengan permukaan yang lebih rata dan presisi, potensi terjadinya kebocoran material *polyurethane* selama proses pengecoran dapat diminimalkan. Secara keseluruhan, proses *finishing* menggunakan amplas dan dempul terbukti efektif dalam meningkatkan fungsi dan kualitas *mold cavity* dan *core* sebagai alat bantu produksi kaki palsu jenis SACH. Selain *cavity* dan *core* ada juga bagian *molding* yang perlu diperhatikan yaitu *part* penutup *molding*. Pada Gambar 4.19 menunjukkan hasil *part* penutup *mulding* yang sudah diproduksi menggunakan mesin 3D print .



Gambar 4.19. Hasil *print part* penutup *molding*.

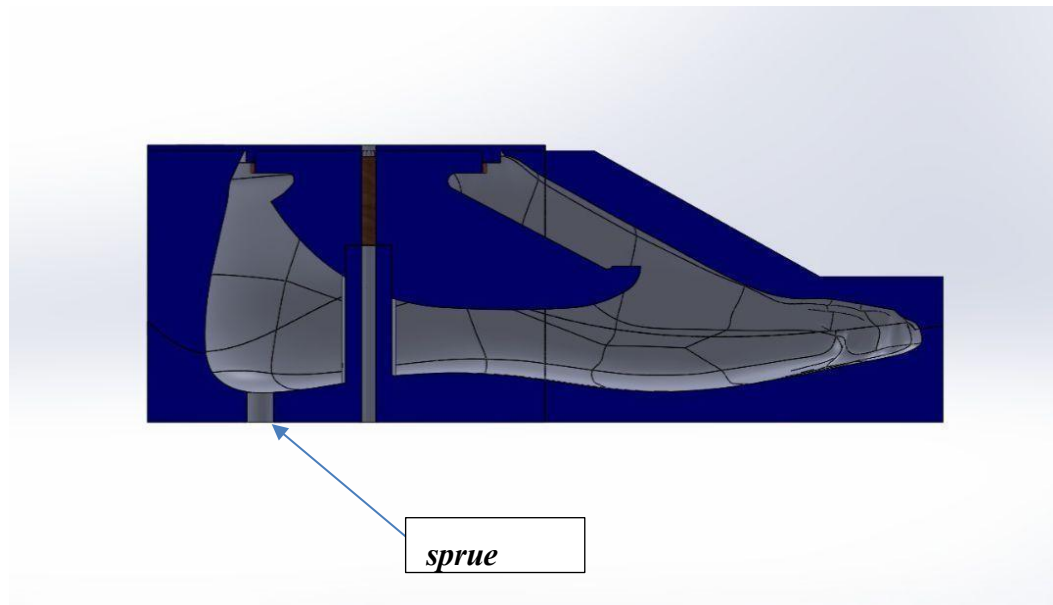
4.8.2 Perancangan *part* untuk produksi kaki palsu

Proses produksi kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) dilakukan menggunakan metode *casting* dengan memanfaatkan *mold cavity* dan *core* yang telah disiapkan sebelumnya. *Mold* tersebut dirancang sesuai dengan geometri kaki palsu jenis SACH dan diproduksi melalui proses *3D printing*, kemudian dilakukan *finishing* menggunakan metode pengamplasan dan pendempulan untuk meningkatkan kualitas permukaan. Material yang digunakan pada proses *casting* adalah *polyurethane* tipe TPU-70, yang berfungsi sebagai elemen elastis dan peredam gaya pada kaki palsu, Pada Gambar 4.20 menunjukkan contoh perancangan *molding*.



Gambar 4.20. Contoh perancangan *molding*.

Pada Gambar 4.21 merupakan contoh *molding* dan *keel* yang sudah digabungkan untuk siap di *casting* melalui jalur utama masuknya material (*sprue*)



Gambar 4.21. *Assembly keel dan molding.*

4.8.3 Hasil produksi Kaki palsu jenis SACH

Pada tahap produksi, material *polyurethane* dicampur sesuai dengan perbandingan yang sudah ditentukan seperti Tabel 4.7, kemudian dituangkan ke dalam *mold* melalui lubang hingga *cavity* terisi secara merata. Proses *casting* dilakukan pada kondisi lingkungan yang terkontrol untuk meminimalkan terbentuknya gelembung udara dan cacat pada produk. Setelah proses penuangan selesai, *mold* dibiarkan selama hingga material *polyurethane* mengeras secara sempurna. Komposisi *polyurethane* dengan pewarna bisa dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.2. Komposisi *polyurethane* dan pewarna.

PU-A(gram)	PU-B (gram)	Pewarna kuning (gram)	Pewarna coklat (gram)	Pewarna putih (gram)
500	500	6	4	4.5

Hasil produksi menunjukkan bahwa kaki palsu jenis SACH yang dihasilkan memiliki bentuk geometris yang sesuai dengan desain awal serta permukaan yang relatif halus. Detail kontur telapak kaki dapat terbentuk dengan baik, menandakan

bahwa *mold cavity* dan *core* berfungsi secara optimal dalam membentuk produk. Selain itu, tidak ditemukan cacat signifikan seperti retak, deformasi berlebih, atau kekosongan material (*void*) pada bagian utama SACH. Untuk contoh hasil yang sudah diproduksi tampak atas dapat dilihat pada Gambar 4.23 dibawah ini.



Gambar 4.22. Hasil produksi SACH (tampak atas).

Dan untuk hasil produksi SACH tampak bawah yang ditunjukkan seperti pada Gambar 4.24 dibawah ini.



Gambar 4.23. Hasil produksi SACH (tampak bawah).

Setelah hasil produksi kaki palsu SACH sudah jadi maka perlu mengukur dimensi dan dibandingkan dengan skema telapak kaki orang indonesia yang sudah ditentukan pada Gambar 2.1. Untuk dimensi kaki palsu jenis SACH yang sudah diproduksi dapat dilihat pada Tabel 4.8 dibawah ini.

Tabel 4.3. Tabel dimensi produksi SACH.

No	Keterangan	Dimensi (mm)
1	Panjang telapak kaki	255
2	Panjang telapak lengan	170
3	Panjang kaki sampai jari kelingking	230
4	Lebar kaki	85
5	Lebar tangkai kaki	60
6	Tinggi mata kaki	65
7	Tinggi bagian tengah kaki	70
8	Jarak horisontal tangkai mata kaki	55
9	Jarak lubang <i>keel</i> sampai jari jempol	190

Secara fungsional, SACH hasil *casting* memiliki sifat elastis yang baik sesuai karakteristik material TPU-70, sehingga mampu berperan sebagai peredam gaya saat fase *heel strike* dan memberikan dukungan stabil selama fase *stance*. Dengan demikian, metode *casting* menggunakan *mold* yang telah dipersiapkan terbukti efektif dalam memproduksi kaki palsu jenis SACH dengan kualitas bentuk dan sifat mekanik yang sesuai untuk tahap pengujian.

4.9 Hasil Pengujian

Hasil pengujian yang sudah diuji pada penelitian ini adalah dorsifleksi, statik dan fatik pada kaki palsu jenis SACH .

4.9.1 Uji Dorsifleksi

Pengujian dorsifleksi dilakukan pada kaki palsu jenis SACH yang sudah diproduksi, Penelitian ini dilakukan sebanyak 3 kali pada produk, sistem kerja pada alat pengujian dorsifleksi adalah memberikan pembebanan pada bagian telapak kaki palsu sehingga telapak kaki palsu akan mengalami *bending*. Dengan demikian dapat dihitung nilai selisih perpindahan jarak pada saat kondisi awal dan pada saat kondisi

maksimum untuk mencari nilai dorsifleksi yang terjadi pada telapak kaki palsu. Berikut ini merupakan dokumentasi dari proses pengujian dorsifleksi yang telah dilakukan. Pengujian dorsifleksi hasil yang didapatkan dari pengujian ini ada tabel dibawah ini.

Tabel 4.4. Dorsifleksi produk jati.

Percobaan	Y0 (cm)	Y1 (cm)
1	0	15,3
2	0	15
3	0	14,5
Rata – rata (cm)		14,93
Standar deviasi (-)		0.06

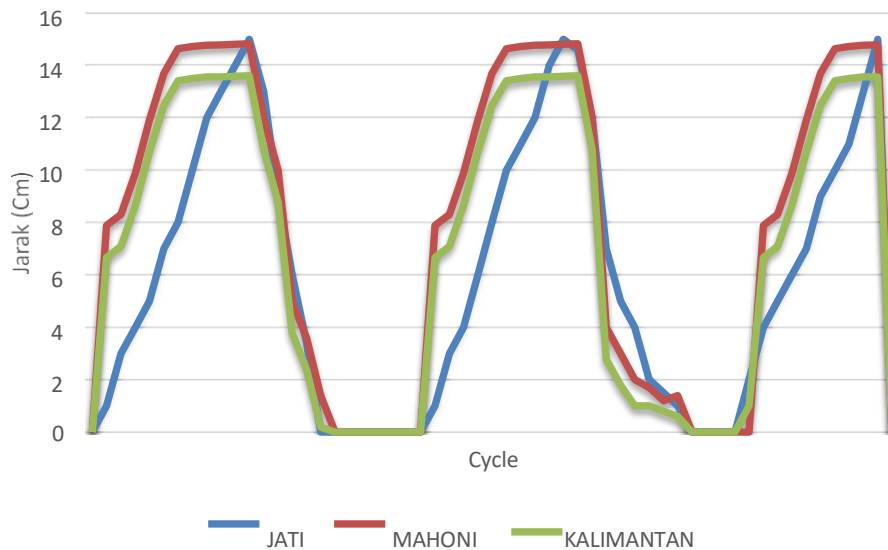
Tabel 4.5. Dorsifleksi produk mahoni.

Percobaan	Y0 (cm)	Y1 (cm)
1	0	14,8
2	0	14,6
3	0	14,8
Rata – rata (cm)		14,73
Standar deviasi (-)		0.06

Tabel 4.6. Dorsifleksi produk kalimantan.

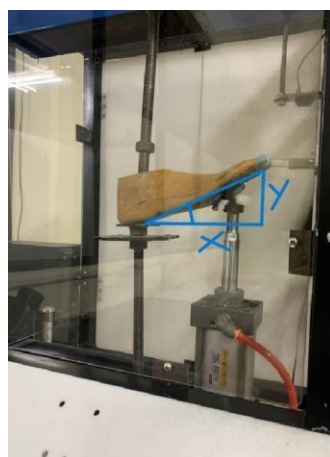
Percobaan	Y0 (Cm)	Y1 (cm)
1	0	13,6
2	0	13,8
3	0	13,7
Rata – rata (cm)		13,7
Standar deviasi (-)		0.06

Setelah mendapatkan nilai dorsifleksi pada setiap produk lalu dilanjutkan membuat grafik perbandingan antara 3 produk SACH tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.24 dibawah ini.



Gambar 4.24. Perbandingan 3 produk *keel* pada SACH.

Pada beberapa nilai dorsifleksi memiliki nilai dalam bentuk sudut dan derajat, sehingga data jarak pada tabel diatas dikonversi menjadi sudut yang dicari adalah sudut antara garis lurus dan perubahan telapak kaki ketika berada pada titik maksimal pengujian. Pada gambar 4.25 menunjukan skema perhitungan mengubah jarak menjadi sudut menggunakan rumus $\tan$ dengan skema perhitungan.



Gambar 4.25. Skema pencarian sudut dorsifleksi.

Berdasarkan perhitungan sudut yang dilakukan, jarak x adalah 15,5 cm, kemudian pada contoh produk hasil penelitiannya dapat dilihat pada Tabel 4.7– Tabel 4.9 sebagai berikut.

Tabel 4.7. Tabel perhitungan sudut produk jati.

Produk <i>keel</i> jati					
X (cm)	Y (cm)	Tan (-)	Nilai sudut(°)	Rata-rata (°)	Standar deviasi (-)
15,5	15,3	0,98	44,42°	43,72°	0,75
15,5	15	0,96	43,83°		
15,5	14,5	0,93	42,92°		

Tabel 4.8. Tabel perhitungan sudut produk kalimantan.

Produk <i>keel</i> kalimantan					
X (cm)	Y (cm)	Tan (-)	Nilai sudut (°)	Rata-rata (°)	Standar deviasi (-)
15,5	14,8	0,95	43,53°	43,43°	0,174
15,5	14,6	0,94	43,23°		
15,5	14,8	0,95	43,53°		

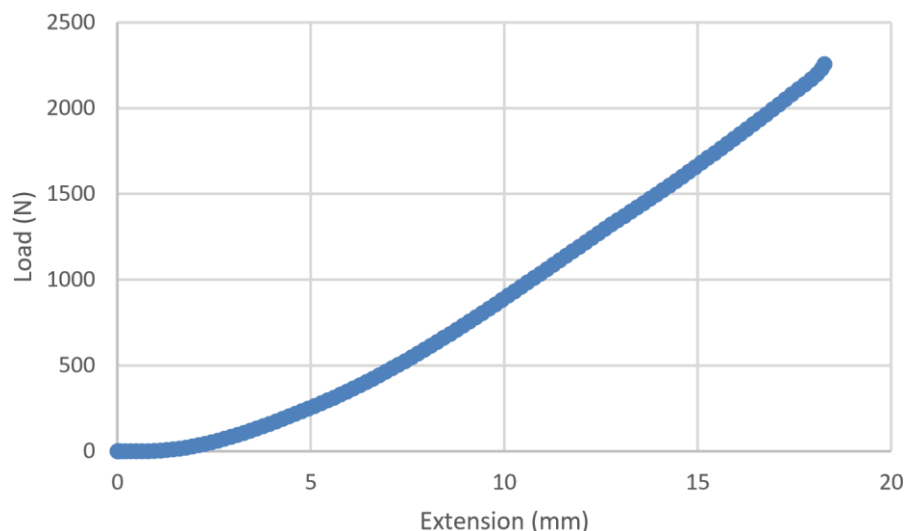
Tabel 4.9. Tabel perhitungan sudut produk mahoni.

Produk <i>keel</i> mahoni					
X (cm)	Y (cm)	Tan (-)	Nilai sudut(°)	Rata-rata	Standar deviasi (-)
15,5	14,8	0,95	43,68°	43,55°	0,22
15,5	14,6	0,94	43,29°		
15,5	14,8	0,95	43,68°		

4.9.2 Uji Statik

Uji statik dilakukan untuk mengetahui kemampuan struktur kaki palsu jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) dalam menahan beban tekan maksimum tanpa mengalami kegagalan struktur. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi kekuatan mekanik *keel* dan material SACH terhadap beban yang merepresentasikan kondisi berdiri pengguna.

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tekan *tensilon* (*Universal Testing Machine*) dengan metode pembebanan kompresi vertikal. Spesimen kaki palsu dipasang padaudukan khusus dengan sudut kemiringan tertentu untuk mensimulasikan kondisi aktual saat fase *stance* pada siklus berjalan. Beban diberikan secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum 2250 N. Nilai ini digunakan sebagai representasi beban statis tinggi yang dapat terjadi saat kaki menopang berat tubuh dengan faktor keamanan tambahan.



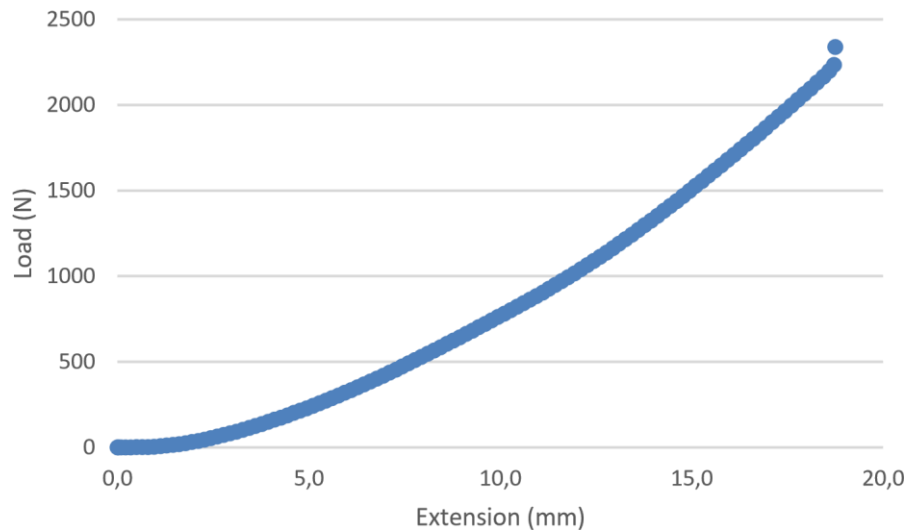
Gambar 4.26. Uji statik *keel* kayu mahoni (belakang)

Pada gambar diatas pengujian statik arah belakang dilakukan untuk menganalisis respon mekanik *keel* kayu mahoni terhadap pembebanan tekan statis dari arah posterior. Parameter yang diamati adalah hubungan antara beban (*Load*) dan pertambahan panjang (*Extension*). Berdasarkan grafik hasil pengujian, terlihat bahwa kurva menunjukkan hubungan non-linier dengan kecenderungan meningkat secara progresif. Pada tahap awal pembebanan (0–3 mm), peningkatan beban relatif kecil dan bertahap. Kondisi ini menunjukkan bahwa material berada pada daerah

elastis awal, dimana deformasi yang terjadi masih bersifat linier-elastis dan struktur belum mengalami konsentrasi tegangan yang signifikan.

Memasuki tahap pembebanan menengah ($\pm 3\text{--}10\text{ mm}$), grafik menunjukkan kenaikan beban yang semakin curam. Hal ini mengindikasikan peningkatan kekakuan sistem. Pada fase ini, struktur *keel* mahoni mulai bekerja secara dominan dalam menahan momen lentur akibat beban tekan, sehingga terjadi peningkatan kapasitas dukung secara signifikan. Sifat mekanik kayu mahoni yang memiliki kekuatan lentur dan modulus elastisitas cukup tinggi berkontribusi terhadap peningkatan resistansi terhadap deformasi. Pada tahap pembebanan akhir ($\pm 10\text{--}18\text{ mm}$), kurva menunjukkan peningkatan beban yang konsisten hingga mencapai nilai maksimum sekitar 2200–2300 N pada deformasi $\pm 18\text{ mm}$. Tidak terlihat adanya penurunan beban secara signifikan pada akhir kurva, yang menunjukkan bahwa spesimen belum mengalami kegagalan struktural selama pengujian berlangsung. Hal ini mengindikasikan bahwa *keel* mahoni memiliki kapasitas dukung statis yang tinggi pada arah *back*. Jika dibandingkan dengan hasil uji arah *front*, kapasitas beban maksimum pada arah *back* jauh lebih besar. Perbedaan ini disebabkan oleh orientasi pembebanan dan distribusi tegangan yang berbeda, dimana pada arah *back* struktur *keel* bekerja lebih optimal dalam menahan gaya tekan dan momen lentur. Secara biomekanik, kondisi ini merepresentasikan fase *toe-off* dalam siklus berjalan, dimana gaya reaksi tanah pada bagian belakang kaki relatif lebih besar.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa *keel* mahoni memiliki kekakuan dan kapasitas dukung yang baik pada arah *back*, dengan karakteristik deformasi progresif tanpa indikasi kegagalan dini. Hal ini menunjukkan bahwa material kayu mahoni layak digunakan sebagai elemen struktural pada desain kaki palsu dengan mempertimbangkan batas beban kerja yang aman.



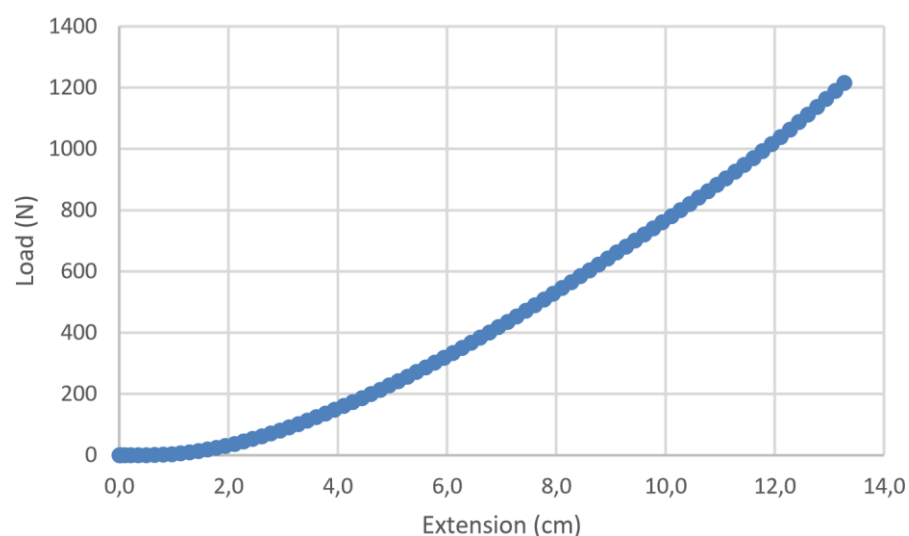
Gambar 4.27. Uji statik *keel* kayu kalimantan (belakang).

Pada gambar diatas pengujian statik arah belakang dilakukan untuk menganalisis respons mekanik *keel* kayu kalimantan terhadap pembebanan tekan statis. Parameter yang diamati adalah hubungan antara beban (*Load*) dan pertambahan panjang (*Extension*). Berdasarkan grafik hasil pengujian, terlihat bahwa kurva menunjukkan hubungan non-linier dengan kecenderungan meningkat secara progresif. Pada tahap awal pembebanan (0–3 mm), peningkatan beban relatif kecil dan bertahap. Kondisi ini menunjukkan bahwa material berada pada daerah elastis awal, dimana deformasi yang terjadi masih bersifat linier-elastis dan struktur belum mengalami konsentrasi tegangan yang signifikan.

Memasuki tahap pembebanan menengah (± 3 –10 mm), grafik menunjukkan kenaikan beban yang semakin curam. Hal ini mengindikasikan peningkatan kekakuan sistem (*stiffness*). Pada fase ini, struktur *keel* mahoni mulai bekerja secara dominan dalam menahan momen lentur akibat beban tekan, sehingga terjadi peningkatan kapasitas dukung secara signifikan. Sifat mekanik kayu mahoni yang memiliki kekuatan lentur dan modulus elastisitas cukup tinggi berkontribusi terhadap peningkatan resistansi terhadap deformasi. Pada tahap pembebanan akhir (± 10 –18 mm), kurva menunjukkan peningkatan beban yang konsisten hingga mencapai nilai maksimum sekitar 2200–2300 N pada deformasi ± 18 mm. Tidak terlihat adanya penurunan beban secara signifikan pada akhir kurva, yang menunjukkan bahwa spesimen belum mengalami kegagalan struktural selama

pengujian berlangsung. Hal ini mengindikasikan bahwa *keel* mahoni memiliki kapasitas dukung statis yang tinggi pada arah *back*. Jika dibandingkan dengan hasil uji arah *front*, kapasitas beban maksimum pada arah *back* jauh lebih besar. Perbedaan ini disebabkan oleh orientasi pembebanan dan distribusi tegangan yang berbeda, dimana pada arah *back* struktur *keel* bekerja lebih optimal dalam menahan gaya tekan dan momen lentur. Secara biomekanik, kondisi ini merepresentasikan fase *toe-off* dalam siklus berjalan, dimana gaya reaksi tanah pada bagian belakang kaki relatif lebih besar.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa *keel* mahoni memiliki kekakuan dan kapasitas dukung yang baik pada arah *back*, dengan karakteristik deformasi progresif tanpa indikasi kegagalan dini. Hal ini menunjukkan bahwa material kayu mahoni layak digunakan sebagai elemen struktural pada desain kaki palsu dengan mempertimbangkan batas beban kerja yang aman.

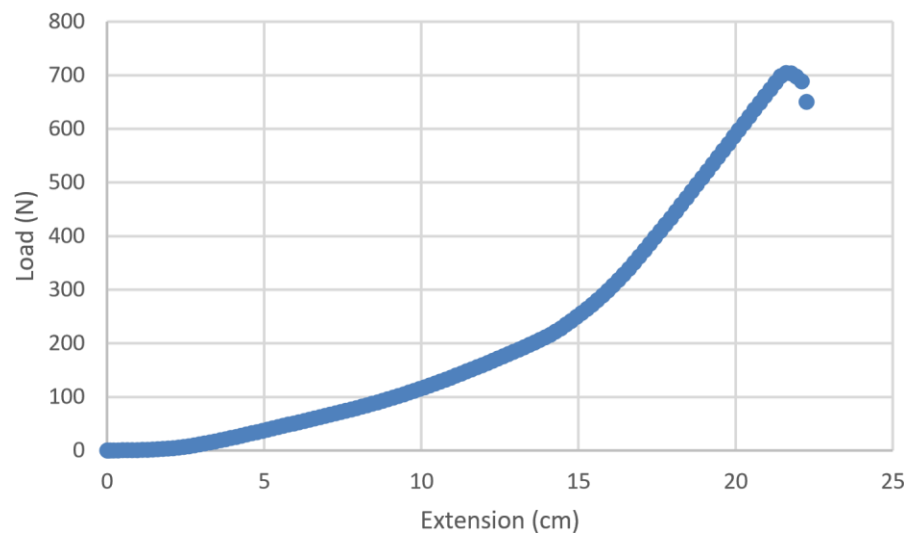


Gambar 4.28. Uji statik *keel* kayu jati (belakang).

Pada gambar diatas pengujian statik arah belakang dilakukan untuk menganalisis respons mekanik *keel* kayu kalimantan terhadap pembebanan tekan statis dari arah posterior. Parameter yang diamati adalah hubungan antara beban (*Load*) dan pertambahan panjang (*Extension*). Berdasarkan grafik hasil pengujian, terlihat bahwa kurva menunjukkan hubungan non-linier dengan kecenderungan meningkat secara progresif. Pada tahap awal pembebanan (0–1 mm), peningkatan

beban relatif kecil dan bertahap. Kondisi ini menunjukkan bahwa material berada pada daerah elastis awal, dimana deformasi yang terjadi masih bersifat linierelastis dan struktur belum mengalami konsentrasi tegangan yang signifikan.

Memasuki tahap pembebanan menengah ($\pm 3\text{--}10\text{ mm}$), grafik menunjukkan kenaikan beban yang semakin curam. Hal ini mengindikasikan peningkatan kekakuan sistem. Pada fase ini, struktur *keel* jati mulai bekerja secara dominan dalam menahan momen lentur akibat beban tekan, sehingga terjadi peningkatan kapasitas dukung secara signifikan. Sifat mekanik kayu mahoni yang memiliki kekuatan lentur dan modulus elastisitas cukup tinggi berkontribusi terhadap peningkatan resistansi terhadap deformasi. Pada tahap pembebanan akhir ($\pm 12\text{--}13\text{ mm}$), kurva menunjukkan peningkatan beban yang konsisten hingga mencapai nilai maksimum sekitar 1200 N pada deformasi $\pm 13\text{ mm}$. Tidak terlihat adanya penurunan beban secara signifikan pada akhir kurva, yang menunjukkan bahwa spesimen belum mengalami kegagalan struktural selama pengujian berlangsung. Hal ini mengindikasikan bahwa produk SACH *keel* jati tidak mampu menahan beban yang diinginkan, dikarenakan pada saat nilai 1200 N lapisan *polyurethane* sudah retak dan *keel* pada bagian dalam juga sudah mulai retak.



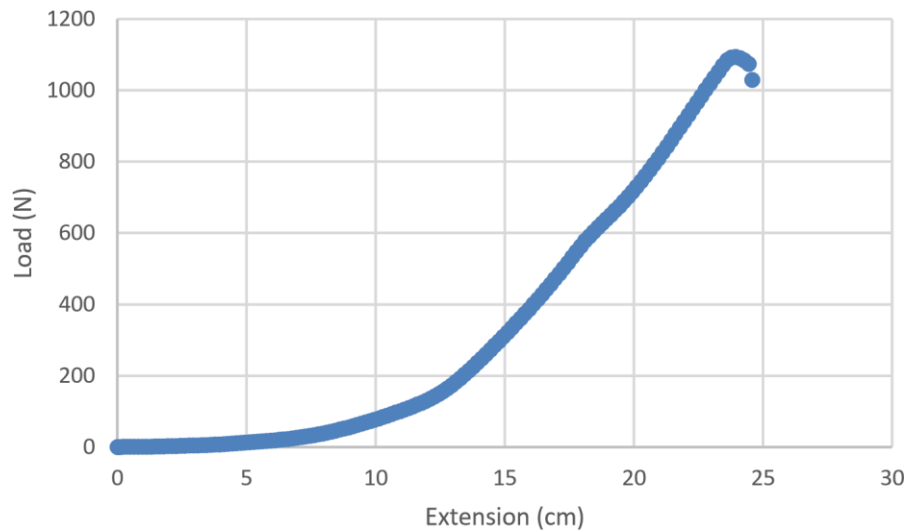
Gambar 4.29. Uji statik *keel* kayu mahoni (depan).

Pada gambar diatas pengujian statik arah *front* dilakukan untuk mengetahui karakteristik mekanik kaki palsu tipe SACH berbahan *polyurethane* TPU-70 dengan *keel* menggunakan kayu mahoni terhadap pembebanan tekan statis.

Parameter yang diamati adalah hubungan antara beban (*Load*) dan pertambahan panjang (*Extension*). Berdasarkan grafik hasil pengujian, diperoleh hubungan nonlinier antara beban dan deformasi. Pada tahap awal pembebanan (0–5 mm), terjadi peningkatan beban yang relatif kecil terhadap pertambahan deformasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa material masih berada pada daerah elastis awal, dimana *polyurethane* TPU-70 berperan dominan dalam menyerap beban dan memberikan respons fleksibel.

Memasuki tahap pembebanan menengah (± 5 –15 mm), kurva menunjukkan kenaikan yang lebih signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem struktur mulai mengalami peningkatan kekakuan. Pada tahap ini, *keel* kayu mahoni mulai menerima distribusi beban yang lebih besar sehingga kontribusi kekuatan lentur dari material kayu menjadi dominan. Interaksi antara elastisitas *polyurethane* dan kekakuan mahoni menghasilkan peningkatan kapasitas dukung secara progresif. Pada tahap akhir pembebanan (± 15 –21 mm), grafik menunjukkan kenaikan beban yang cukup tajam hingga mencapai beban maksimum sekitar 700 N pada deformasi ± 21 mm. Setelah mencapai titik puncak, terjadi sedikit penurunan nilai beban. Fenomena ini mengindikasikan bahwa struktur mendekati batas kemampuan mekaniknya, yang kemungkinan disebabkan oleh awal terjadinya deformasi plastis pada *polyurethane*, retak mikro pada kayu mahoni, atau redistribusi tegangan pada sistem pengujian. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kaki palsu mampu menahan beban statis hingga ± 700 N pada arah *front*. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem masih berada dalam batas elastis sebelum terjadi indikasi penurunan kapasitas struktural. Karakteristik non-linier yang dihasilkan menunjukkan kombinasi sifat elastis dari *polyurethane* TPU-70 dan sifat kaku dari kayu mahoni bekerja secara sinergis dalam menopang beban.

Dengan demikian, struktur kaki palsu pada pengujian arah *front* memiliki kemampuan deformasi yang cukup baik serta kapasitas dukung yang memadai untuk pembebanan statis sesuai dengan fungsi biomekanik fase *heel strike* pada siklus berjalan.



Gambar 4.30. Uji statik *keel* kayu kalimantan (depan).

Pada gambar diatas pengujian statik arah *front* dilakukan untuk mengetahui karakteristik mekanik kaki palsu tipe SACH berbahan *polyurethane* TPU-70 dengan *keel* menggunakan kayu kalimantan terhadap pembebanan tekan statis.

Parameter yang diamati adalah hubungan antara beban (*Load*) dan pertambahan panjang (*Extension*). Berdasarkan grafik hasil pengujian, diperoleh hubungan nonlinier antara beban dan deformasi. Pada tahap awal pembebanan (0–5 mm), terjadi peningkatan beban yang relatif kecil terhadap pertambahan deformasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa material masih berada pada daerah elastis awal, dimana *polyurethane* TPU-70 berperan dominan dalam menyerap beban dan memberikan respons fleksibel.

Memasuki tahap pembebanan menengah (± 5 –25 mm), kurva menunjukkan kenaikan yang lebih signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem struktur mulai mengalami peningkatan kekakuan. Pada tahap ini, *keel* kayu mahoni mulai menerima distribusi beban yang lebih besar sehingga kontribusi kekuatan lentur dari material kayu menjadi dominan. Interaksi antara elastisitas *polyurethane* dan kekakuan mahoni menghasilkan peningkatan kapasitas dukung secara progresif. Pada tahap akhir pembebanan (± 15 –21 mm), grafik menunjukkan kenaikan beban yang cukup tajam hingga mencapai beban maksimum sekitar 1100 N pada deformasi ± 23 mm. Setelah mencapai titik puncak, terjadi sedikit penurunan nilai beban. Fenomena ini mengindikasikan bahwa struktur mendekati batas kemampuan

mekaniknya, yang kemungkinan disebabkan oleh awal terjadinya deformasi plastis pada *polyurethane*, retak mikro pada kayu mahoni, atau redistribusi tegangan pada sistem pengujian. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kaki palsu mampu menahan beban statis hingga ± 700 N pada arah *front*. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem masih berada dalam batas elastis sebelum terjadi indikasi penurunan kapasitas struktural. Karakteristik non-linier yang dihasilkan menunjukkan kombinasi sifat elastis dari *polyurethane* TMPU-70 dan sifat kaku dari kayu mahoni bekerja secara sinergis dalam menopang beban.

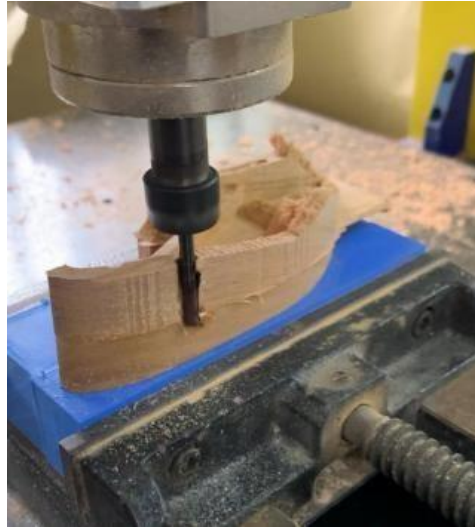
Dengan demikian, struktur kaki palsu pada pengujian arah *front* memiliki kemampuan deformasi yang cukup baik serta kapasitas dukung yang memadai untuk pembebanan statis sesuai dengan fungsi biomekanik fase *heel strike* pada siklus berjalan.

4.9.3 Uji Fatik

Dalam upaya mengetahui ketahanan SACH yang telah diproduksi, maka dilakukan pengujian *preliminary fatigue* menggunakan mesin uji pneumatik dua silinder. SACH 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 kaki prostetik ini diaplikasikan untuk pengguna beraktivitas seperti berjalan, berlari, dan aktivitas lainnya. 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.

4.10 Analisis dan Pembahasan

Pembuatan *keel* dan kaki palsu jenis SACH telah berhasil dilaksanakan sesuai dengan kriteria – kriteria yang ditentukan sebelumnya, hanya saja ada beberapa produk terdapat cacat pada area tertentu seperti produksi *keel* dengan mesin CNC 3 Axis, dapat dilihat pada Gambar 4.31 dibawah ini.



Gambar 4.31. *Defect* pada saat produksi *keel* sisi-2.

Error pada gambar diatas dikarenakan *conector* pada mesin sering terjadi *error* karena *conector* kurang erat penyambungan dan rentang lepas pada saat *running* mesin, terutama pada sumbu Y mesin sering mengalami *error*. Dapat dilihat penyebabnya pada Gambar 4.32 dibawah ini.



Gambar 4.32. *Connector* mesin CNC 3 Axis.

Selain itu ada kesalahan produksi SACH dikarenakan pencampuran antara *polyurethane* A dan B yang kurang merata menyebabkan produk SACH masih belum maksimal dapat dilihat pada Gambar 4.33 masih ada *polyurethane* yang belum kering pada beberapa permukaan dikarenakan pada saat waktu pengadukan kurang merata dan masih ada beberapa *bubble* pada permukaan SACH dikarenakan

gelombang udara terperangkap ini bisa disebabkan oleh ventilasi udara pada *mold* yang kurang.



Gambar 4.33. *Error produksi SACH keel kayu jati.*

Berdasarkan hasil penelitian *error* pada saat produksi SACH *keel* jati dapat menyebabkan juga kelemahan produk pada saat pengujian, terutama pada saat pengujian statik produk SACH *keel* jati mengalami kerusakan pada saat *load* menyentuh 1200 N. Dikarenakan pencampuran *polyurethane* kurang merata menyebabkan permukaan pada SACH tidak maksimal dan mudah sobek. *Defect* pada produk SACH *keel* jati dapat dilihat pada Gambar 4.34 berikut.



Gambar 4.34. *Defect pada pengujian statik SACH keel jati.*

Kerusakan pada permukaan SACH *keel* jati yang dikarenakan uji statik ini juga menyebabkan kerusakan *keel* pada bagian dalam, secara luar permukaan produk jika dilihat tidak kelihatan untuk kerusakan *keel* tetapi setelah produk SACH

keel jati dibelah menjadi dua menggunakan *cutter*, maka akan kelihatan kerusakan pada bagian *keel* jati. Kerusakan pada produk SACH *keel* jati dari hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.35 dibawah ini.



Gambar 4.35. *Defect* pada *keel* kayu jati.

Dalam pengujian fatik, kerusakan *load* atau kegagalan pembebanan merujuk pada kondisi di mana mesin tidak mampu memberikan atau mempertahankan siklus gaya yang presisi sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Hal ini sangat krusial karena uji fatik sangat bergantung pada konsistensi beban dalam jangka waktu yang lama. Untuk kerusakan *load* pada saat pengujian fatik dapat dilihat pada Gambar 4.37 dibawah ini.



Gambar 4.36. Kerusakan *load* pada mesin uji fatik.

Berdasarkan rangkaian proses yang sudah dilakukan secara keseluruhan, mulai dari proses perancangan, desain, produksi hingga pengujian, dapat dikatakan bahwa produk *keel* dan kaki palsu jenis SACH yang dihasilkan sudah mendekati aspek fungsional dan estetika. Salah satu indikasi keberhasilan produk *keel* kalimantan dan mahoni bertahan terhadap beban dorsifleksi, fatik dan statik.

4.11 Evaluasi produk kaki palsu jenis SACH

Berdasarkan hasil produk yang sudah dibuat dan diuji dengan kriteria kriteria yang sudah ditentukan sesuai standarnya, dapat disimpulkan bahwa:

1. Produk kaki palsu jenis SACH dan *part keel* telah berhasil diproduksi sesuai dengan desain yang ada, tetapi masih ada bagian permukaan kaki palsu yang belum rapi sesuai yang diinginkan, terutama adanya *bubble* pada permukaan kaki palsu jenis SACH.
2. Kerusakan *load* pada mesin uji fatik, menyebabkan kaki palsu jenis SACH belum berhasil melewati *giat cycle*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada penelitian Desain dan Produksi *Keel* untuk Kaki Palsu Jenis *Solid Ankle Cushioned Heel* (SACH) yang telah dilakukan ini, maka dapat disimpulkan bahwa :

- a. Pada penelitian ini telah berhasil membuat desain dan memproduksi *part keel* untuk kaki palsu jenis SACH dengan menggunakan *software CAD Solidworks 2022*. Dilanjutkan dengan simulasi produk *keel* yang sudah diperhitungkan dengan simulasi CAE untuk memberi beban pada produk yang sudah ditentukan. Lalu membuat simulasi program CNC menggunakan *software fusion 360*. Setelah mendapatkan startegi pemotongan yang sesuai maka dilanjutkan proses produksi dengan menggunakan mesin CNC 3 *axis*.
- b. Penelitian ini telah berhasil membuat produk kaki palsu jenis SACH dengan material *polyurethane* tipe TPU-70 melalui proses manufaktur dengan metode *casting* dapat mencapai kondisi yang optimal melalui desain *mold* dan *core* yang tepat.
- c. Berdasarkan uji dorsifleksi, statik dan fatik. Dari ketiga produk SACH yang sudah diproduksi hanya dua produk saja yang mampu melewati tiga pengujian yang sudah ditetapkan yaitu produk *keel* mahoni dan kalimantan. Performa SACH pada penelitian ini memiliki nilai dorsifleksi yang melebihi dorsifleksi telapak kaki manusia. Untuk SACH mahoni (dorsifleksi produk hasil penelitian = $43,55^{\circ}$) , SACH kalimantan (dorsifleksi produk hasil penelitian = $43,43^{\circ}$) dan SACH jati (dorsifleksi produk hasil penelitian = $43,72^{\circ}$). Bisa disimpulkan bahwa SACH yang sudah diproduksi memiliki tingkat elastis yang tinggi. Produk *keel* jati mengalami kerusakan pada saat uji statik.

5.2 Saran Penelitian Selanjutnya

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

1. Pastikan pada saat menggunakan mesin CNC *connector* terpasang rapat agar tidak terjadi *error*.
2. Pada saat proses pengadukan polyurethane dipastikan aduk secara perlahan agar tidak terjadi *bubble* dan merata agar pada saat sudah berhasil dicetak permukaannya kering dan halus.
3. Komposisi penuangan material *polyurethane* A&B harus dipastikan sesuai agar material dapat diproduksi secara maksimal.
4. Komposisi parameter material untuk agar produk lebih kuat melewati *gait cycle* bisa melebihi material *polyurethane* 1:1,1 ($A < B$), supaya produk lebih keras dan tidak mudah rapuh saat pemakaian.
5. Melakukan riset pigmen pewarna yang lebih mendekati warna kulit manusia untuk meningkatkan aspek estetika dan kepercayaan diri bagi pengguna.
6. Direkomendasikan setelah pengadukan *polyurethane* dan pewarna merata dilanjutkan dengan mesin vakum dengan tenaga yang lebih besar > 5 hp, supaya mempercepat proses vakum untuk keluarnya gelembung udara yang terjebak pada material *polyurethane*.
7. Sebelum proses metode *casting* pastikan permukaan *mold* dan *core* sudah dilapisi dengan *release agent*.
8. Sebelum proses *machining* CNC, material kayu direkomendasikan melalui proses *treatment* seperti pengeringan (*oven/drying*) dan pelapisan *coating* atau *wood sealer* untuk mengurangi kadar air, mencegah retak, serta meningkatkan kestabilan dimensi dan kualitas permukaan hasil *machining*.
9. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai metode peningkatan adhesi antara kayu dan karet, seperti penggunaan jenis adhesi yang lebih sesuai, penambahan *surface treatment* pada permukaan material, atau penggunaan sistem *mechanical bonding* agar ikatan antar material lebih kuat dan tahan lama saat digunakan.

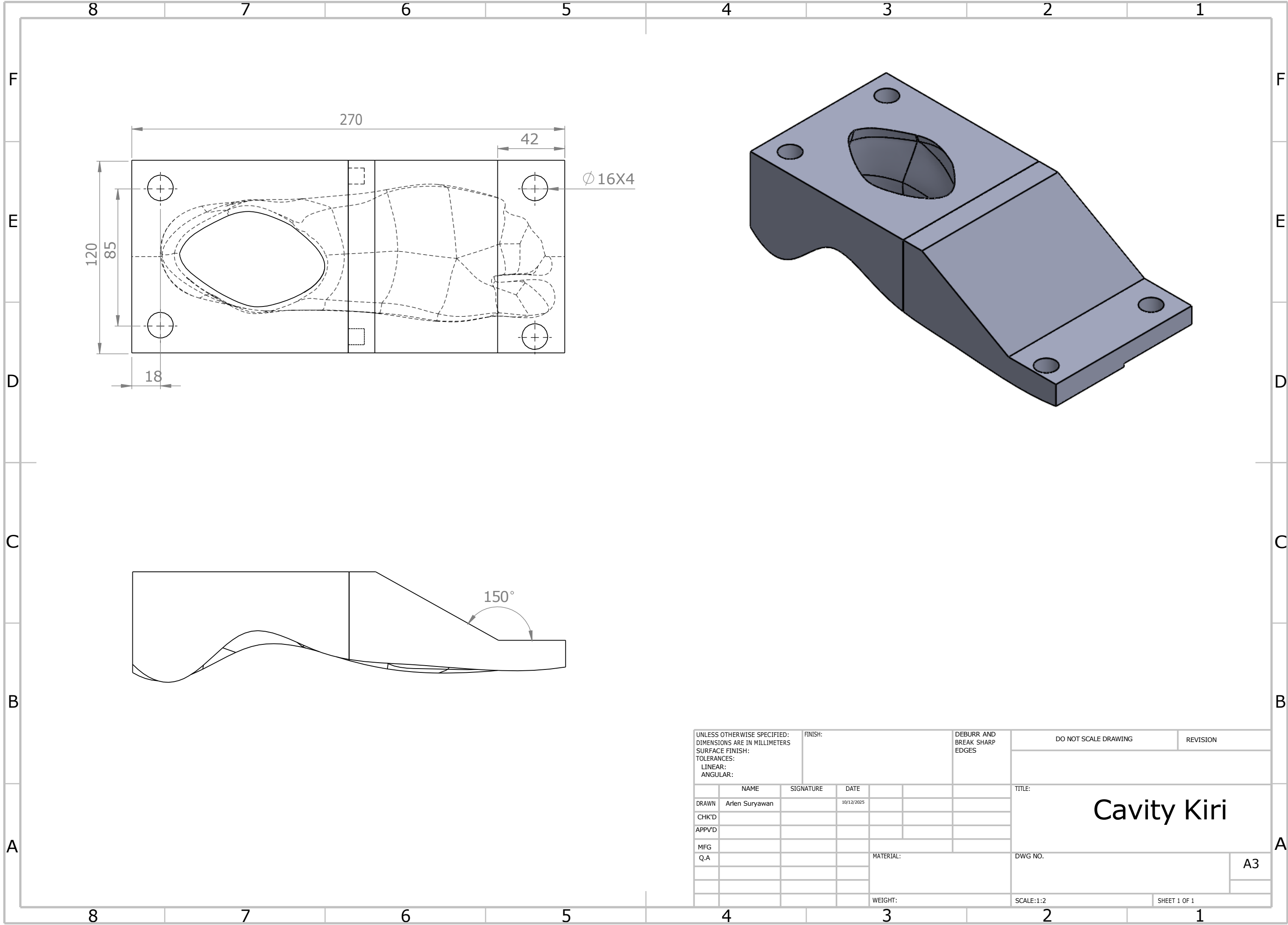
DAFTAR PUSTAKA

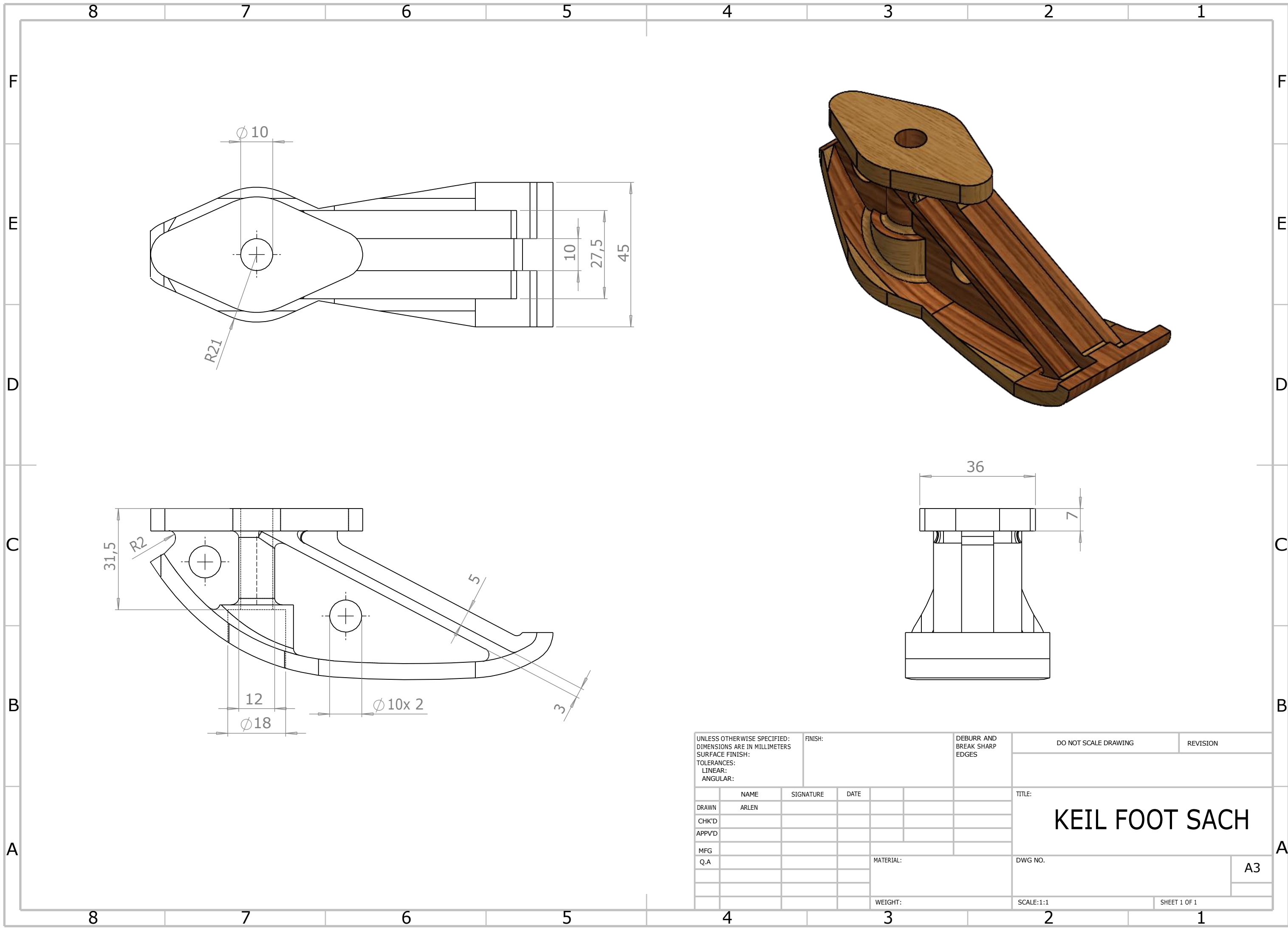
- [1] Dhafa Aria Pradana Anggaraksa (2022). *Rancang bangun telapak kaki palsu jenis solid ankle cushion heel (SACH)*.
- [2] Parengkuan, M., & Mile, S. (2021). Pengaruh latihan jogging terhadap (VO2Max). *Jambura Health and Sport Journal*, 3(1), 11–15.
- [3] Biyan, B. P., Alhakim, B. P., Setyawan, D., & Ismail, R. (2017). Analisis kinematis untuk menentukan dimensi transfemoral prosthetic tipe four-bar linkage dalam fase awal siklus gait cycle. *19*(2), 61–67.
- [4] Rodiah, S., Risna, A., & Agustin, M. N. (2024). Pola berjalan manusia (*Human walking patterns*). *1*, 54–58.
- [5] Emzain, Z. F., Amrullah, U. S., & Mufarrih, A. M. (n.d.). Analisis elemen hingga untuk siklus berjalan pada model prostetik lentur pergelangan kaki (*Finite element analysis for the gait cycle on the compliant ankle-foot prosthetic*), 91–98.
- [6] Suprayogi, D., Tri, C., & Ningsih, M. (2024). Differences in walking speed of SACH foot and single axis foot in transtibial prosthesis user. *3*(2).
- [7] Jia, Z., Jia, D., Sun, Q., & Wang, Y. (2021). Preparation and mechanical-fatigue properties of elastic polyurethane concrete composites.
- [8] Poliol, S., Modifikasi, P., & Menggunakan, E. (2015). Pengaruh 1,4-butandiol sebagai poliol pada modifikasi epoksi menggunakan poliuretan. *17*(1), 1–7.
- [9] Agusti, F., Buwono, R. I., Wahyono, A. T., & Ramadana, D. P. (2025). Product design training with SolidWorks in an effort to become independent of SMK 5 Surakarta students. *IJECS: Indonesian Journal of Empowerment and Community Services*, 6(2), 219–228.
- [10] Siahaan, M. Y. R., & Siregar, R. A. (2022). Analisis numerik terhadap sambungan prototipe pengganti tulang panggul patah pada manusia menggunakan perangkat lunak SolidWorks. *Jurnal Dinamis*, 10(1), 15–21.
- [11] Isametova, M., Abilezova, G., Duisengali, A., & Tursynbayeva, A. (2023). Application of rapid prototyping technology in pump engineering, 177– 192.
- [12] Harjono, A. S. (2022). *Proses manufacture spare part variasi sepeda motor dengan program Autodesk Fusion 360 pada mesin CNC milling 3 axis*. 10–14.

- [13] Ariyanto, N. A., & Budi, S. S. (2026). Rancang bangun jig & fixture pemesinan CNC milling dengan area kerja 300×300 mm. *Infotekmesin*, 17(1), 152–159.
- [14] Widodo, A., & Prasetyo, J. (2025). Perancangan dan pembuatan jig and fixture dengan mesin computer numerical control (CNC) milling di PT Prima Anugrah Teknik. *Jurnal Inkofar*, 9(1), 21–27.
- [15] Fierel Arga Perdana (2025). *Desain dan proses manufaktur cover kaki prostetik jenis energy storage and return (ESAR)*.
- [16] Saputro, Y. A., et al. (2022). The effect of injury rehabilitation therapy program. 21(2), 121–129.
- [17] Ardhitya Aryo Wicaksono (2021). *Rancang bangun alat uji fatigue telapak kaki*.

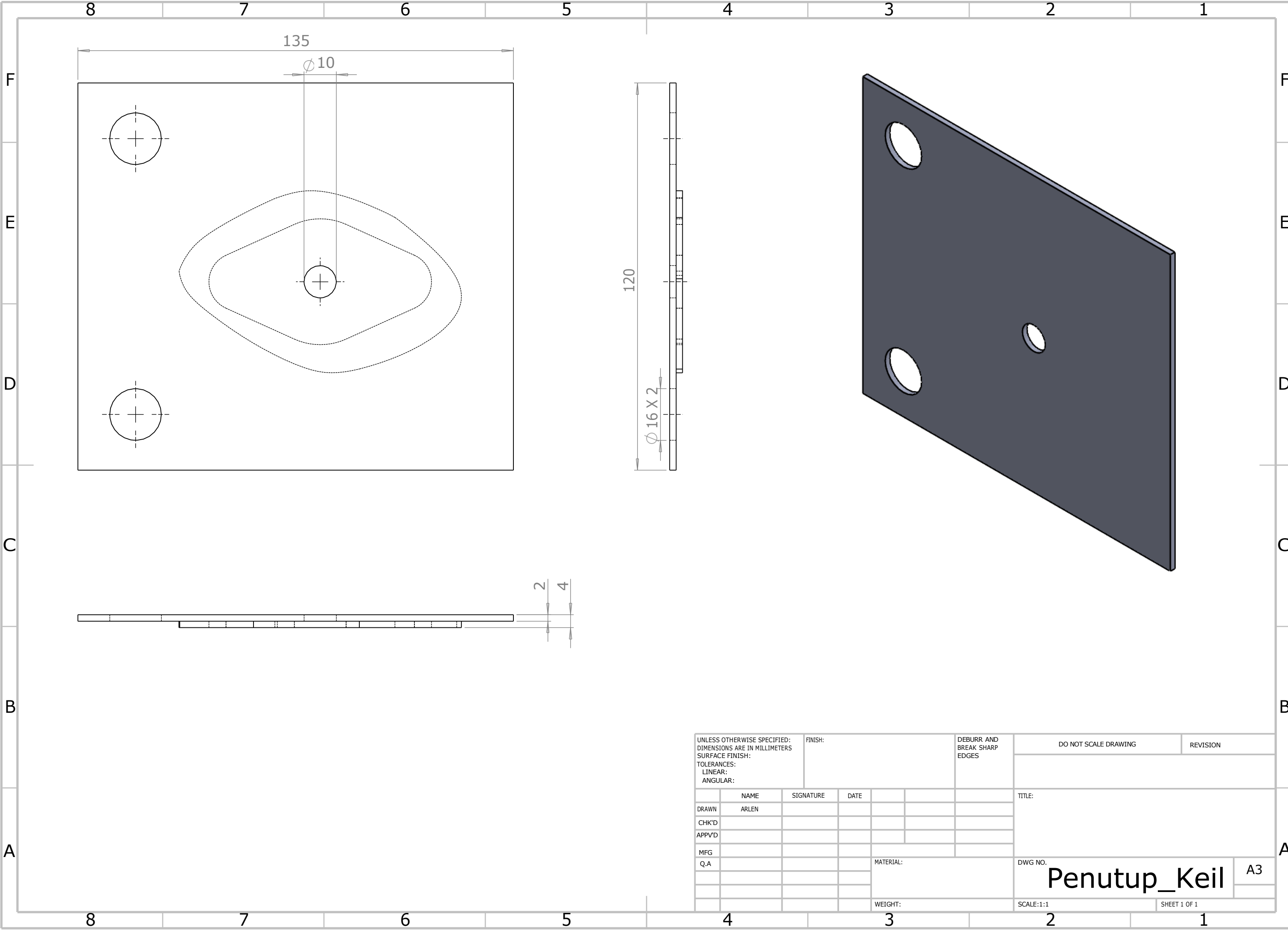
LAMPIRAN

1. Gambar teknik *cavity*
2. Gambar teknik *core*
3. Gambar teknik *keel*
4. Gambar teknik penutup *mold*
5. Gambar teknik *assembly*
6. Gambar teknik *explode view assembly*





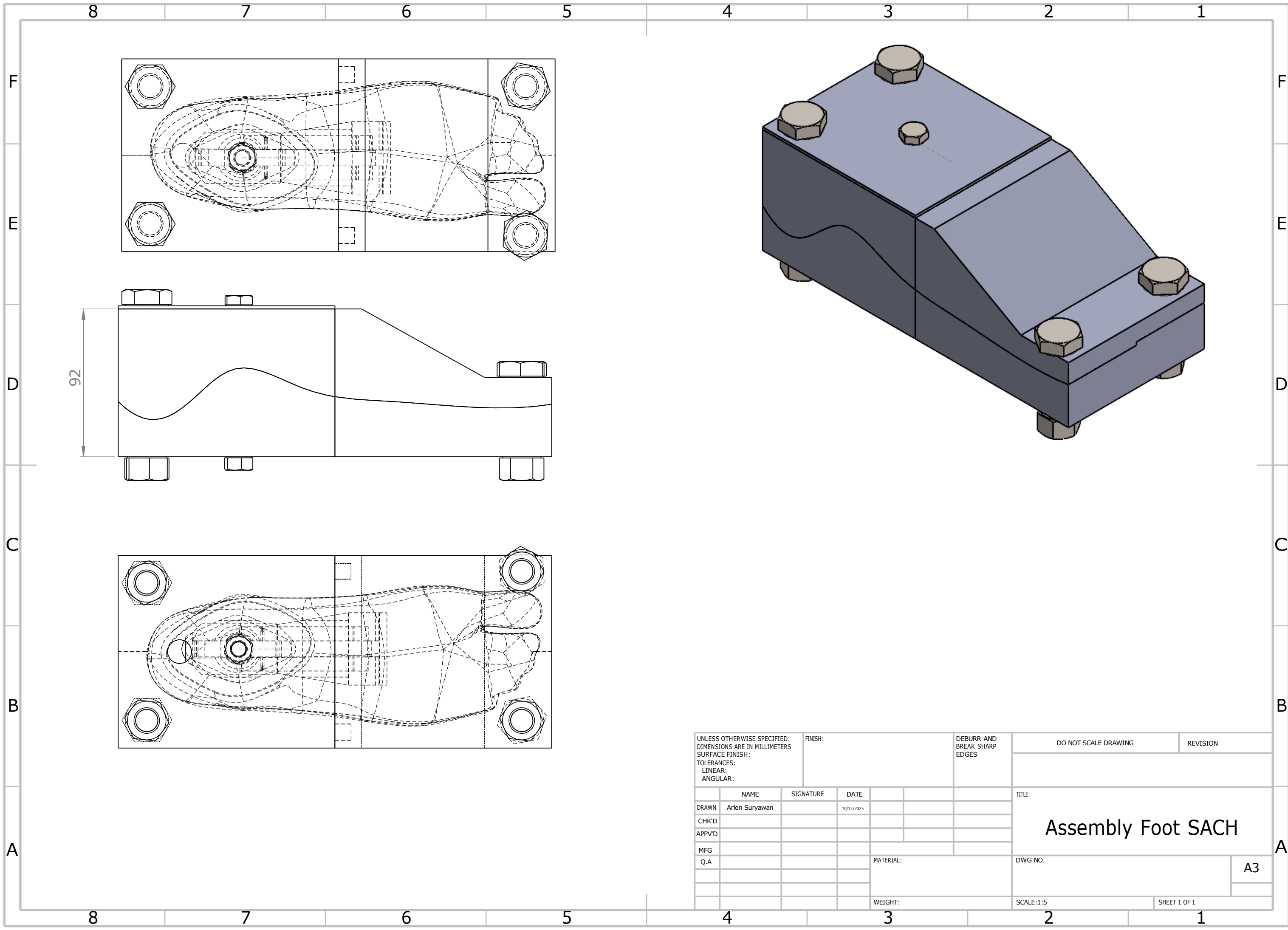
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:						FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
	NAME		SIGNATURE		DATE						TITLE: 			



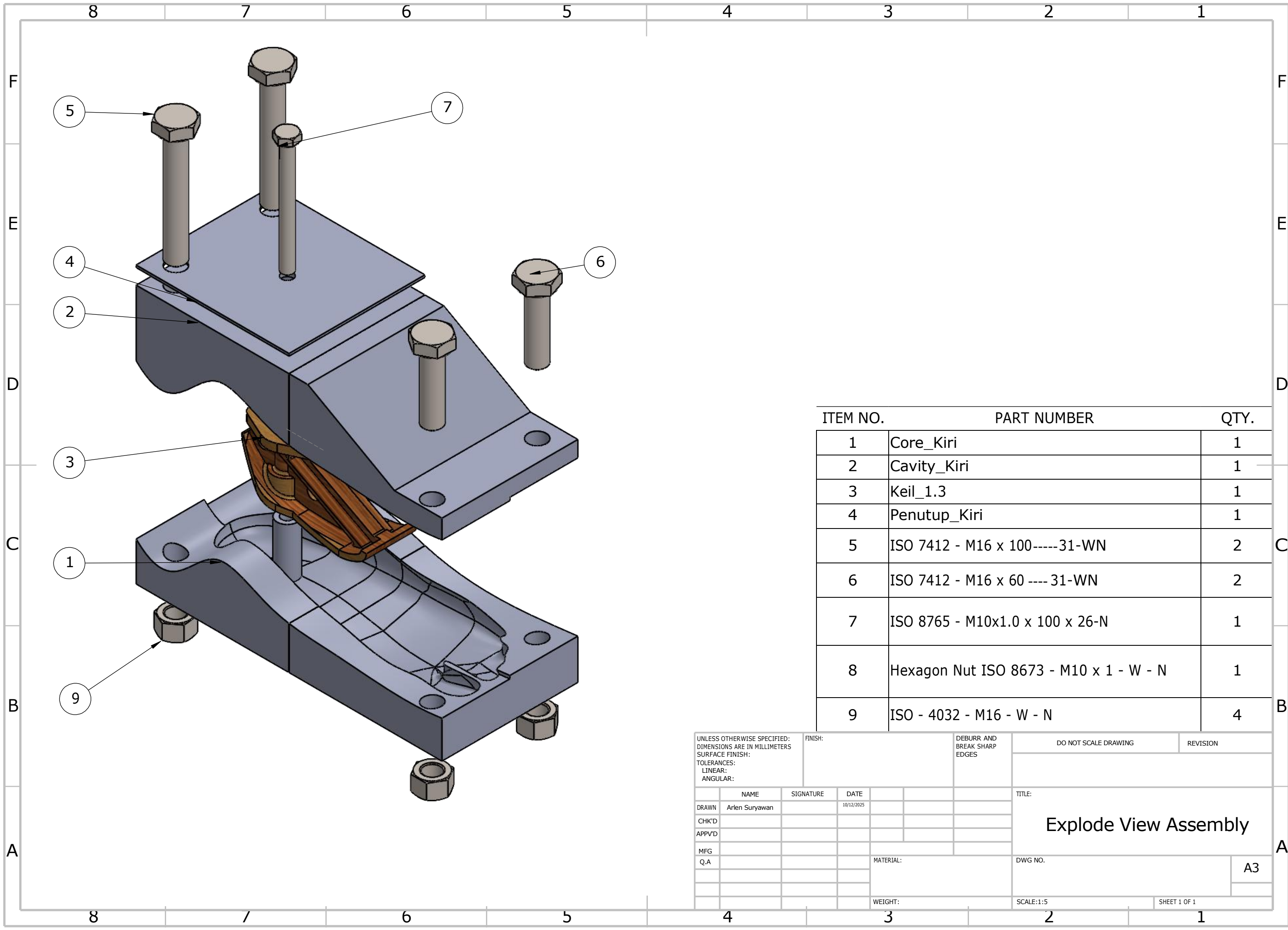
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE:	
DRAWN	ARLEN							
CHK'D								
APPV'D								
MFG							DWG NO.	
Q.A								
							SCALE:1:1	
							SHEET 1 OF 1	

Penutup_Keil

A3



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
							TITLE:		
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE				Assembly Foot SACH		
CHK'D	Arlen Suryawan		10/12/2025						
APPV'D							DWG NO.		A3
MFG									
Q.A						MATERIAL:	SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1
						WEIGHT:			



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Core_Kiri	1
2	Cavity_Kiri	1
3	Keil_1.3	1
4	Penutup_Kiri	1
5	ISO 7412 - M16 x 100-----31-WN	2
6	ISO 7412 - M16 x 60 ---- 31-WN	2
7	ISO 8765 - M10x1.0 x 100 x 26-N	1
8	Hexagon Nut ISO 8673 - M10 x 1 - W - N	1
9	ISO - 4032 - M16 - W - N	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
	NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE: Explode View Assembly					
DRAWN	Arlen Suryawan		10/12/2025									
CHK'D												
APPV'D												
MFG												
Q.A				MATERIAL:			DWG NO.					
				WEIGHT:			SCALE:1:5					
							SHEET 1 OF 1					

A3