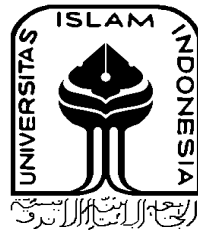


**PENAMBAHAN DAN PEMBUATAN MODEL MENISKUS DAN
LIGAMEN PADA MODEL 3-D *TOTAL KNEE REPLACEMENT***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh :

Nama : Athallah Firhan Pridayanto

No. Mahasiswa : 19525112

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025**

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**PENAMBAHAN DAN PEMBUATAN MODEL MENISKUS DAN
LIGAMEN PADA MODEL 3-D *TOTAL KNEE REPLACEMENT***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Athallah Firhan Pridayanto

No. Mahasiswa : 19525112

Yogyakarta, 14 Juli 2025

Pembimbing,

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and vertical strokes, representing the name Irfan Aditya Dharma.

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

PENAMBAHAN DAN PEMBUATAN MODEL MENISKUS DAN LIGAMEN PADA MODEL 3-D *TOTAL KNEE REPLACEMENT* TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Athallah Firhan Pridayanto

No. Mahasiswa : 19525112

Tim Penguji

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

Ketua



Tanggal : 30/07/2025

Ir. M. Ridlwan, ST. MT. IPP

Anggota I



Tanggal : 30/07/2025

Ir. Faisal Arif Nurgesang, S.T., M.Sc. IPP

Anggota II



Tanggal : 30/07/2025

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Athallah Firhan Pridayanto
NIM : 19525112
Fakultas / Prodi : FTI / Teknik Mesin
Judul Tugas Akhir : Penambahan Dan Pembuatan Model Meniskus Dan
Ligamen Pada Model 3-D Total Knee Replacement

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam penulisan skripsi ini merupakan asli (orisinil) hasil kerja saya sendiri dan tidak menjiplak (plagiat) dari karya tulis manapun dan dalam bentuk apapun.

Apabila kemudian hari terbukti pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia untuk menerima hukuman/sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 30 Juli 2025



Athallah Firhan Pridayanto

HALAMAN PERSEMBAHAN

Laporan tugas akhir ini saya persembahkan kepada :

1. Ibu Ida Rahayu Purnamawati dan Bapak Agus Priyanto selaku orang tua saya, yang selalu membimbing saya dan saya sayangi.
2. Dosen pembimbing saya bapak Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D. yang selalu memberikan masukan, saran, motivasi, nasihat, dan ilmu yang bermanfaat.
3. Teman-teman Teknik Mesin angkatan 2019 yang saya banggakan

HALAMAN MOTTO

All is good

“Semuanya baik-baik saja”

(ISTP-A)

“Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.”

“Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.”

(Q.S. Al-Insyirah: 5-6)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil 'alamin, segala puja dan puji syukur atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah melimpahkan rahmat dan inayah-Nya sehingga dapat menyusun Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Penambahan dan Pembuatan Model Meniskus dan Ligamen Pada Model 3-D *Total Knee Replacement*” dengan tepat baik.

Dalam proses penulisan laporan ini, penulis dibimbing, dibantu, dan didukung oleh banyak pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang terkait :

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan nikmat waktu dan kesempatan sehingga penulis dapat menjalankan, menyelesaikan, dan menerapkan ilmu-ilmu yang telah didapat selama menjalani pendidikan di Universitas Islam Indonesia.
2. Ayah dan Ibu yang selalu memberikan dukungan dan do'a kepada penulis selama menjalani pendidikan ini.
3. Bapak Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir.
4. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dan banyak membantu hingga terselesaikannya Laporan Tugas Akhir ini.

ABSTRAK

Total Knee Replacement (TKR) adalah prosedur bedah yang umum dilakukan untuk meredakan nyeri dan memulihkan mobilitas pada pasien dengan kerusakan sendi lutut berat. Namun, model 3D saat ini kekurangan komponen jaringan lunak esensial, seperti meniskus dan ligamen, yang berperan penting dalam stabilitas dan fungsi sendi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan membuat model meniskus dan ligamen yang akurat guna meningkatkan model 3D yang sudah ada. Dengan menggunakan bantuan perangkat lunak desain (CAD) dan prinsip-prinsip biomekanik, untuk merancang dan membangun model meniskus dan ligamen yang detail, yang kemudian diimplementasikan ke dalam model 3D. Model yang dihasilkan memberikan representasi sendi lutut yang lebih baik, memungkinkan simulasi gerakan sendi agar hasil *total knee replacement* (TKR) yang lebih akurat. Dengan model 3D yang akurat, pengguna dari model 3D dapat merasakan situasi yang sama pada saat tindakan sebenarnya.

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iii
Pernyataan Keaslian	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar	vii
Abstrak	viii
Daftar Isi	ix
Daftar Tabel	xii
Daftar Gambar	xiii
Daftar Notasi	xvii
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan	2
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
Bab 2 Tinjauan Pustaka.....	4
2.1 Kajian Pustaka	4
2.2 Dasar Teori.....	5
2.2.1 Total Knee replacement.....	5
2.2.2 Meniskus.....	6
2.2.3 Ligamen.....	7
2.2.3.1 Anterior Cruciate Ligament (ACL).....	7
2.2.3.2 Posterior Cruciate Ligament (PCL).....	8
2.2.3.3 Patellar Ligament (PL)	9
2.2.3.4 Fibular Collateral Ligament (FCL)	10
2.2.3.5 Tibial Collateral Ligament (TCL).....	10

2.2.4	Osteoarthritis.....	11
2.2.5	CT-Scan/MRI.....	12
2.2.6	Computer Aided Design (CAD)	13
2.2.7	<i>Silicon Rubber</i> RTV	13
2.2.8	3D <i>Print Filament</i> PLA.....	13
2.2.9	<i>Casting Mold</i>	14
2.2.9.1	<i>Slush Casting Molding</i>	14
2.2.9.2	<i>Injection Casting Molding</i>	14
Bab 3	Metode Penelitian	16
3.1	Alur Penelitian.....	16
3.2	Kriteria Rekonstruksi	17
3.3	Kriteria Desain.....	17
3.4	Alat dan Bahan	17
3.5	Rekonstruksi Sendi Lutut.....	18
3.6	Pembuatan Desain 3D Ligamen dan Meniskus Pada Sendi Lutut	19
3.6.1	Proses Penghalusan Ligamen dan meniskus	19
3.6.2	Mengubah Bentuk <i>File STL</i> ke <i>Solid Part</i>	20
3.7	Pembuatan Desain Cetakan Meniskus dan Ligamen.....	21
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	22
4.1	Hasil Rekonstruksi.....	22
4.2	Hasil Desain	22
4.2.1	Hasil <i>Solid Body</i> Ligamen dan meniskus	22
4.2.2	Hasil Desain Cetakan Ligamen dan Meniskus	23
4.3	Proses Pembuatan	24
4.3.1	Cetakan Silikon Ligamen dan Meniskus.....	24
4.3.2	Model 3D Silikon Ligamen dan Meniskus.....	27
4.3.3	Merangkai Model 3D	30
4.4	Analisis.....	30
4.4.1	Perbandingan Ukuran.....	30
4.4.1.1	Pengukuran Anatomi.....	32
4.4.1.2	Pengukuran Rekonstruksi	36
4.4.1.3	Pengukuran Produk Model 3D.....	39

4.4.2	Mudah Untuk Lepas Pasang	41
4.4.2.1	Pemasangan Bahan Material <i>Slime</i>	42
4.4.2.2	Pemasangan Menggunakan Bahan Material <i>Sealant</i>	43
4.4.3	Penggunaan Model 3D Sebagai Alat Peraga	43
4.4.4	Perbandingan model 3D dengan model 3D lain	46
Bab 5	Penutup.....	48
5.1	Kesimpulan.....	48
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1 Alat	18
Tabel 3-2 Bahan	18
Tabel 4-1 Formula Pembuatan Model 3D.	27
Tabel 4-2 Perbandingan dimensi model 3D	31
Tabel 4-3 Keterangan kordinat	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Letak meniskus No.8 pada sendi lutut [9].....	7
Gambar 2-2 Dimensi ACL [12]	8
Gambar 2-3 Bentuk Posterior Cruciate Ligament [15].	9
Gambar 2-4 Lokasi patellar ligamen (R. Putz, 2006).	9
Gambar 2-5 Lokasi FCL pada sendi lutut (R. Putz, 2006).....	10
Gambar 2-6 Lokasi MCL [21].	11
Gambar 2-7 CT-Scan penderita OA, (A) tampak depan (B) tampak samping [23].	12
Gambar 2-8 <i>Computer Aided Design</i> [26].....	13
Gambar 2-9 <i>3D Print Filament PLA</i> [29].....	14
Gambar 3-1 (A) Diagram alur penelitian. (B) Diagram kriteria model 3D.....	16
Gambar 3-2 Gambar proses rekonstruksi sendi lutut	19
Gambar 3-3 Hasil penghalusan model 3D meniskus dan ligamen.	20
Gambar 3-4 Proses mengubah bentuk STL ke <i>solid body</i>	21
Gambar 3-5 Hasil desain cetakan ligamen.	21
Gambar 4-1 Hasil rekonstruksi ligamen dan meniskus.....	22
Gambar 4-2 Hasil solid body ligamen.....	23
Gambar 4-3 Hasil solid body meniskus.....	23
Gambar 4-4 Desain awal cetakan.....	24
Gambar 4-5 Hasil akhir cetakan silikon.	24
Gambar 4-6 Proses penempatan desain pada perangkat lunak 3D <i>print</i>	25
Gambar 4-7 Proses mengatur ketebalan filamen pada cetakan.	25
Gambar 4-8 Proses pengaturan penyangga/ <i>support</i> pada desain yang akan dicetak.	25
Gambar 4-9 hasil pengaturan pada perangkat lunak 3D <i>print</i>	26
Gambar 4-10 Proses 3D <i>print</i> cetakan silikon.	26
Gambar 4-11 Hasil 3D <i>print</i> cetakan silikon.	26
Gambar 4-12 (A) Takaran silikon, (B) Takaran katalis.	27
Gambar 4-13 Alur pembuatan model 3D	29
Gambar 4-14 Hasil model 3D yang telah dibersihkan.	29

Gambar 4-15 Alur proses perakitan	30
Gambar 4-16 (A) Grafik perbandingan panjang, (B) Grafik perbandingan lebar, (C) Grafik volume	31
Gambar 4-17 Gambar kordinat pada 3D-Slicer	32
Gambar 4-18 Volume meniskus	33
Gambar 4-19 Volume ligamen.....	33
Gambar 4-20 Pengukuran <i>lateral meniskus</i> dari posisi <i>superior</i>	33
Gambar 4-21 Hasil pengukuran <i>lateral meniskus</i>	33
Gambar 4-22 Pengukuran <i>medial meniskus</i> dari posisi <i>superior</i>	34
Gambar 4-23 Hasil pengukuran <i>medial meniskus</i>	34
Gambar 4-24 Pengukuran ACL dari posisi kanan	34
Gambar 4-25 Hasil pengukuran ACL	34
Gambar 4-26 Pengukuran PCL dari posisi <i>anterior</i>	34
Gambar 4-27 Hasil pengukuran PCL	35
Gambar 4-28 Pengukuran FCL dari posisi kiri.....	35
Gambar 4-29 Hasil pengukuran FCL	35
Gambar 4-30 Pengukuran TCL dari posisi kanan.....	35
Gambar 4-31 Hasil pengukuran TCL.....	35
Gambar 4-32 Pengukuran PL dari posisi anterior.....	36
Gambar 4-33 Hasil pengukuran PL.....	36
Gambar 4-34 Pengukuran lateral meniskus (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran	36
Gambar 4-35 Pengukuran medial meniskus (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran	37
Gambar 4-36 Pengukuran ACL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran.....	37
Gambar 4-37 Pengukuran PCL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran.....	37
Gambar 4-38 Pengukuran FCL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran.....	38
Gambar 4-39 Pengukuran TCL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran.....	38

Gambar 4-40 Pengukuran PL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran.....	38
Gambar 4-41 Pengukuran hasil model 3D lateral meniskus (A) panjang, (B) lebar	39
Gambar 4-42 Pengukuran hasil model 3D medial meniskus (A) panjang, (B) lebar	39
Gambar 4-43 Pengukuran hasil model 3D ACL (A) panjang, (B) lebar.....	40
Gambar 4-44 Pengukuran hasil model 3D PCL (A) panjang, (B) lebar	40
Gambar 4-45 Pengukuran hasil model 3D FCL (A) panjang, (B) lebar	40
Gambar 4-46 Pengukuran hasil model 3D TCL (A) panjang, (B) lebar	41
Gambar 4-47 Pengukuran hasil model 3D PL (A) panjang, (B) lebar.....	41
Gambar 4-48 Pemasangan menggunakan <i>slime</i>	42
Gambar 4-49 Kekurangan bahan material <i>slime</i>	42
Gambar 4-50 Kekurangan bahan material <i>slime</i>	42
Gambar 4-51 Kegagalan pada perekat <i>sealant</i>	43
Gambar 4-52 (A) Melihat sendi bagian dalam dan pita lateral meniskus dipotong, (B) Melihat sendi bagian dalam menggunakan model 3D, (C) Pemotongan pita lateral meniskus menggunakan model 3D.....	43
Gambar 4-53 (A) Melepas medial meniskus dan lateral meniskus yang tersisa, (B) Melepas medial meniskus dan lateral meniskus yang tersisa menggunakan model 3D.....	44
Gambar 4-54 (A) Pelepasan jaringan lunak medial meniskus dengan mengangkat MCL, (B) Pelepasan jaringan lunak medial meniskus dengan mengangkat MCL menggunakan model 3D.....	44
Gambar 4-55 (A) Sendi lutut ditekuk dan tulang anterior kedua meniskus dipotong, (B) Sendi lutut ditekuk dan tulang anterior kedua meniskus dipotong menggunakan model 3D.	44
Gambar 4-56 (A) Pembersihan sisa meniskus, (B) Pembersihan sisa meniskus menggunakan model 3D.....	45
Gambar 4-57 (A) Pengangkatan ACL dan PCL agar lutut dapat stabil, (B) Pengangkatan ACL dan PCL agar lutut dapat stabil menggunakan model 3D.	45

Gambar 4-58 (A) Pembuatan garis <i>whiteside</i> untuk menentukan lubang implan TKR, (B) Pembuatan garis <i>whiteside</i> untuk menentukan lubang implan TKR menggunakan model 3D.....	45
Gambar 4-59 (A) Model 3D yang dipasarkan situs jual beli online luar negeri, (B) Model 3D yang dipasarkan situs jual beli online dalam negeri.....	46
Gambar 4-60 (A) Model 3D yang dibuat pada penelitian ini, (B) Model 3D yang dibuat pada penelitian lain.....	47

DAFTAR NOTASI

TKR = *Total Knee Replacment*

ACL = *Anterior Cruciate Ligament*

PCL = *Posterior Cruciate Ligament*

PL = *Patellar Ligament*

FCL = *Fibular Collateral Ligament*

TCL = *Tibial Collateral Ligament*

MCL = *Medial Collateral Ligament*

Varus = Gerakan atau tekanan pada tubuh menuju sisi dalam/tengah.

mm = Milimeter

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sendi lutut merupakan bagian anatomi tubuh cukup penting untuk menunjang aktivitas sehari-hari, sendi lutut terbagi menjadi dua bagian, yaitu bagian atas (*superior*) dan bawah (*inferior*). Bagian atas terdiri dari tulang paha (*femur*) dan tulang tempurung lutut (*patella*), sedangkan pada bagian bawah terdiri dari tulang kering (*tibia*) dan tulang betis (*fibula*) keempat bagian tersebut merupakan bagian utama pada sendi lutut (Dharmawan, 2023). Selain bagian utama terdapat juga bagian penunjang agar lutut dapat bekerja dengan normal, yaitu meniskus dan ligamen, kedua bagian tersebut memiliki fungsi yang sangat penting untuk menunjang aktivitas lutut dalam kehidupan sehari-hari. Apabila sendi lutut mengalami masalah kesehatan akan sangat mempengaruhi aktivitas sehari-hari, maka dari itu TKR dapat menjadi salah satu solusi untuk mengurangi rasa sakit pada bagian sendi lutut yang bermasalah.

Masalah pada sendi lutut sangat beragam mulai dari *arthritis*, cedera ligamen, maupun robeknya meniskus, ketiga penyakit ini sangat umum yang muncul pada setiap kasus tindakan TKR. *Arthritis* merupakan penyakit radang sendi yang berupa pembengkakan, kekakuan, serta nyeri yang dialami pada penderitanya, penyakit ini biasanya terjadi pada orang dengan usia 60 tahun keatas sudah jarang melakukan aktivitas. Sedangkan untuk cedera ligamen dan robek meniskus biasanya dapat kita temui pada orang dengan aktivitas tinggi seperti atlet olahraga. Apabila ketiga penyakit ini sudah sangat parah maka tindakan yang dapat dilakukan adalah TKR.

Total knee replacement (TKR) merupakan tindakan medis yang bertujuan untuk mengurangi rasa sakit, dengan cara mengganti beberapa bagian anatomi sendi lutut dengan sendi buatan. Tindakan ini pertama kali dilakukan pada tahun 1970-an (Novalianita, 2021). Tindakan ini merupakan cara yang paling efektif untuk mengurangi rasa sakit pada sendi lutut yang mengalami masalah, tindakan

ini sangat umum dilakukan di luar negeri, tercatat lebih dari 63.000 orang melakukan hal ini di Amerika pada tahun 2012 (Liddle & Pandit, 2013).

1.2 Rumusan Masalah

Berikut ini merupakan rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini:

1. Bagaimana cara melakukan rekonstruksi data CT-Scan/MRI pada jaringan ligamen dan meniskus?
2. Apakah alat peraga yang dibuat sudah memenuhi kriteria yang ditentukan untuk digunakan sebagai media pembelajaran ?
3. Bagaimana hasil uji coba yang dilakukan pada alat peraga yang telah dibuat ?

1.3 Batasan Masalah

Berikut adalah batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini:

1. Rekonstruksi jaringan ligamen dan meniskus dibuat berdasarkan data CT-Scan/MRI pada anatomi aslinya.
2. Proses rekonstruksi menggunakan perangkat lunak *3D Slicer*, *Autodesk Meshmixer*, dan *solidworks*.
3. Pada proses rekonstruksi jaringan ligamen dan meniskus hanya akan menjelaskan tahapan rekonstruksi.
4. Model 3D yang dibuat akan melengkapi model 3D yang sudah dibuat sebelumnya.
5. Penelitian ini tidak melakukan analisis pada bahan yang digunakan.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Berikut adalah tujuan dari penelitian ini:

1. Merekonstruksi dan merancang jaringan ligamen dan meniskus dari data CT-Scan/MRI menjadi model 3D jaringan ligamen dan meniskus menggunakan perangkat lunak CAD.

2. Menambahkan anatomi sendi lutut yang kurang pada alat peraga sebelumnya agar dapat digunakan sebagai media pembelajaran untuk tindakan operasi TKR di dunia medis.
3. Mencari bahan material yang digunakan pada model 3D meniskus dan ligamen agar sesuai dengan kriteria yang dibuat.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat yang dapat diambil dalam penelitian ini adalah:

1. Membantu penelitian lain agar dapat merekonstruksi jaringan ligamen dan meniskus.
2. Melengkapi alat peraga yang sebelumnya sudah dibuat agar dapat digunakan sebagai media pembelajaran dari proses tindakan operasi TKR.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dibuat pada penulisan laporan tugas akhir akan dibuat menjadi 5 bab yaitu:

1. BAB I Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan untuk penelitian ini.

2. BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini menjelaskan kajian pustaka dan penjelasan untuk memperjelas dasar teori yang digunakan.

3. BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan tentang alur penelitian, metode penelitian yang dipakai, dan perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini.

4. BAB IV Hasil Dan Pembahasan

Bab ini berisikan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini.

5. BAB V Penutup

Bab ini berisikan seluruh hasil dari penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan yang sebelumnya telah dilakukan oleh Muhammad Fernanda Dharmawan (2023) dengan judul *“PEMBUATAN ALAT PERAGA DAN ANALISIS ELEMEN HINGGA TOTAL KNEE REPLACEMENT UNTUK PENDERITA POST TRAUMATIC ARTHRITIS BERDASARKAN REKONSTRUKSI CT-SCAN TULANG LUTUT”*. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pembuatan tulang untuk alat peraga dengan metode *Reverse Engineering* dengan menggunakan data *CT-Scan* atau *file DICOM* menggunakan aplikasi perangkat lunak 3D untuk pengerjaannya. Penelitian ini akan menambahkan bagian anatomi sendi lutut yaitu meniskus dan ligamen yang bertujuan agar 3D model yang sudah dibuat sebelumnya dapat digunakan sebagai alat bantu pembelajaran *total knee replacment* (Dharmawan, 2023).

Hasil dari pembacaan *file CT-Scan-MRI* menjadi hal yang penting pada penelitian ini, dengan hasil yang baik pembuatan model 3D akan menjadi lebih mudah dan tidak memakan waktu yang lama. hal ini dapat dilihat dari jurnal yang dibuat oleh Annapaola Parrilli dkk (2023) dengan judul *“3D visualization of the human anterior cruciate ligament combining micro-CT and histological analysis”*. Penelitian mereka menjelaskan tentang bagaimana cara agar hasil dari pembacaan *file CT-Scan/MRI* dapat dilihat dengan baik, sehingga dapat menghasilkan 3D model yang mirip dengan anatomi aslinya. Walaupun penelitian ini tidak menggunakan metode yang sama, hal ini dapat menjadi acuan penulis sebagai standar model 3D yang akan dibuat dengan metode yang berbeda (Annapaola Parrilli, 2023).

Pada penelitian ini, penulis akan membuat bagian ligamen dan meniskus dengan bahan material silikon agar model 3D yang dibuat dapat mendekati anatomi aslinya, maka dari itu penulis telah melakukan kajian dengan melihat penelitian yang sudah ada. Pada penelitian yang dilakukan oleh Riri Murtani (2018) yang berjudul *“NANOKOMPOSIT KARET ALAM/SILIKON SEBAGAI OTOT*

SINTETIK DENGAN SIFAT MEKANIK SEPERTI OTOT MANUSIA". Menjelaskan bahwa silikon dapat dijadikan alat peraga medis karena adanya beberapa persamaan pada anatomi tubuh manusia. penelitian ini menggunakan bahan dasar silikon agar alat peraga yang dibuat dapat semirip mungkin dengan anatomi aslinya, hal ini membantu pengguna agar mendapatkan rasa yang sama ketika membedah anatomi aslinya dengan bahan material yang murah dan mudah didapat (Murtani, 2018).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Khafid, dkk (2020) dengan judul "*Analisis Sifat Mekanik Karet Silikon sebagai Kandidat Prepusium Sintetik pada Alat Peraga Khitan*". Juga menjelaskan tentang kegunaan karet silikon sebagai alat peraga medis. Pada penelitiannya menunjukkan bahwa karet silikon dapat menjadi kandidat dalam penggunaan alat peraga medis yang lebih murah dan mudah didapatkan, hal ini selaras dengan penelitian yang penulis buat dan dapat menjadi acuan sebagai indikator penulis apakah bahan material silikon dapat digunakan pada alat peraga medis yang akan dibuat (Muhammad Khafidh, 2020).

Semakin dekat karakteristik dari material yang dibuat, akan semakin dekat juga tingkat kemiripan pada anatomi aslinya, hal ini bertujuan agar pengguna dapat merasakan hal yang sebenarnya dilakukan pada bagian anatomi aslinya. Selain itu dengan tingkat kemiripan yang tinggi dapat menambahkan pengalaman yang sama dengan membedah anatomi aslinya, tetapi dengan material yang lebih murah dan mudah didapat.

2.2 Dasar Teori

Berikut adalah dasar teori yang penulis gunakan sebagai landasan untuk penelitian ini:

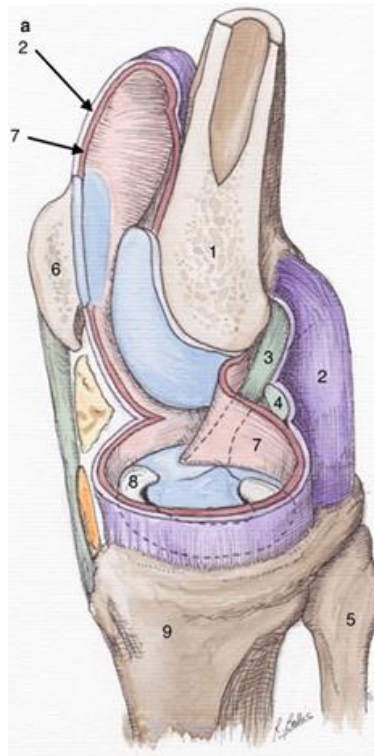
2.2.1 Total Knee replacement

Total knee replacement merupakan tindakan operasi yang bertujuan untuk mengurangi rasa sakit yang dirasakan oleh pasien *osteoarthritis*, tindakan ini bisa dikatakan paling efektif untuk meredakan rasa sakit yang dirasakan oleh pasien (Nining Tri Maryani, 2021). Tindakan ini pertama kali dilakukan pada tahun

1970an untuk pasien dengan penyakit *arthritis* stadium akhir, dengan adanya tindakan ini pasien dapat menghemat biaya yang sebelumnya digunakan untuk pengobatan *arthritis*. Tindakan TKR akan menggantikan beberapa anatomi pada sendi lutut dengan implan buatan yang dibuat khusus agar dapat menggantikan peran anatomi sendi lutut. Rata-rata orang dengan umur 70 tahun akan mengambil tindakan ini agar dapat melakukan aktivitas dengan normal tanpa adanya rasa sakit yang dirasakan (Andre J Carr, 2012).

2.2.2 Meniskus

Meniskus merupakan 2 struktur organ yang berbentuk bulan sabit. fungsi dari meniskus sangat penting bagi sendi lutut, menurut R. Gaillard, dkk (2015), dalam buku "*Total Knee Arthroplasty*" menjelaskan bahwa meniskus memiliki fungsi mentransmisikan kekuatan dari tubuh serta untuk penyerapan guncangan yang diterima oleh tubuh, meniskus terbagi menjadi dua bagian yaitu medial meniskus dan lateral meniskus (R Gaillard, 2015). Pada saat aktivitas normal meniskus akan menerima beban sebesar 2,7 – 4,9 kali berat tubuh dan diperkirakan meniskus pada lutut akan menanggung 45% - 75% dari beban total yang diterima oleh sendi lutut, tanpa jaringan meniskus tulang pada sendi lutut sangat berpotensi cedera akibat dari robeknya jaringan robeknya meniskus (Kyriacos A. Athanasiou, 2009).



Gambar 2-1 Letak meniskus No.8 pada sendi lutut [9].

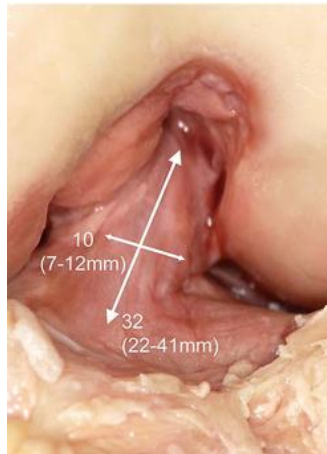
2.2.3 Ligamen

Ligamen merupakan jaringan khusus dengan sifat biomekanik yang berfungsi sangat penting bagi sendi lutut, yaitu untuk stabilitas lutut dalam gerakan rotasi dan translasi anterior dan posterior jaringan ini terdiri dari kolagen yang membentang dan melekat pada sendi lutut, serat kolagen pada ligamen berkesinambungan dengan serat kolagen pada tulang (Frank C. , 2004).

2.2.3.1 Anterior Cruciate Ligament (ACL)

ACL merupakan bagian anatomi dari sendi lutut yang berfungsi untuk menahan beban translasi pada bagian anterior lutut. ACL terletak pada bagian tengah dari sendi lutut yaitu diantara tulang paha (*femur*) dan tulang kering (*tibia*), dengan panjang 22-41 mm dan lebar 7-12 mm. (V. B. Duthon, 2006). Cedera pada ACL disebabkan oleh robeknya jaringan ligamen yang disebabkan oleh aktivitas berat, dalam kasus ini olahraga atletik menjadi kasus yang paling banyak. Robeknya jaringan ACL akan menimbulkan rasa sakit pada penderitanya. Jaringan

ACL yang robek dapat menutup kembali seperti semula, akan tetapi penderita cedera ACL akan meningkatkan risiko *osteoarthritis*, oleh karena itu dokter akan merekomendasikan untuk melakukan tindakan operasi TKR (Efsthopoulos, 2012).



Gambar 2-2 Dimensi ACL [12]

2.2.3.2 Posterior Cruciate Ligament (PCL)

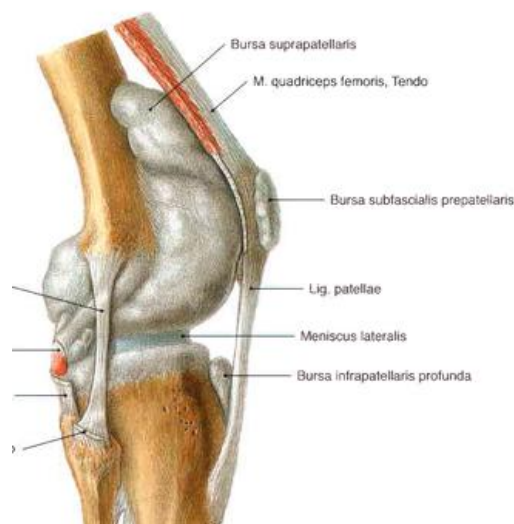
PCL merupakan anatomi sendi lutut yang memiliki ketebalan 2x lipat dari ACL, dengan dimensi panjang 32 mm – 38 mm dan lebar 13 mm. PCL memiliki fungsi yang hampir mirip dengan ACL yaitu menahan beban translasi dari tulang kering (*tibia posterior*) dan paha (*femur*), akan tetapi PCL hanya sebagai penahan sekunder dari berat total yang diterima dari sendi lutut (Frank S. L., 2018). Cedera pada PCL merupakan tantangan terbesar bagi dokter ortopedi, karena PCL termasuk anatomi tubuh yang sangat sulit untuk dibedah, letak dari PCL bersilangan dengan ACL (Karl F. Bowman Jr, 2009).



Gambar 2-3 Bentuk Posterior Cruciate Ligament [15].

2.2.3.3 Patellar Ligament (PL)

ligamen *patellar* merupakan jaringan ligamen yang sangat kuat dibanding ligamen lainnya, sehingga ligamen ini dapat memberi kekuatan mekanis pada sendi lutut. *Patellar* ligamen menghubungkan bagian tempurung tulang lutut (*patella*) dengan tulang kering (*tibia*). Ligamen ini memiliki panjang 30-52 mm dan lebar 25-40 mm. ligamen *patellar* sering disebut juga tandon *patella* karena terlihat menyatu dengan *quadriiceps femoris* yang menyelubungi tulang *patella* (CHAD ZOOKER, 2013). Dimensi serta kekuatan ligamen *pateller* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Seperti, frekuensi aktivitas, panjang kaki, rasio pinggang dan indeks massa tubuh (Aaron Schwartz, 2015).



Gambar 2-4 Lokasi patellar ligamen (R. Putz, 2006).

2.2.3.4 Fibular Collateral Ligament (FCL)

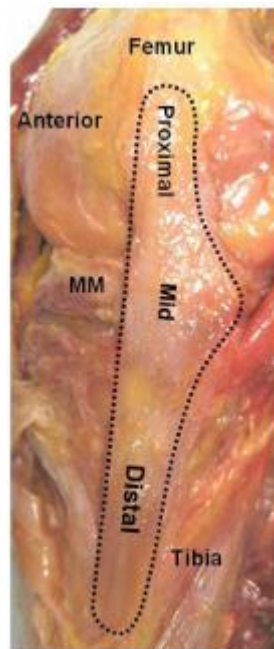
Ligamen *fibular collateral* (FCL) atau yang biasa disebut ligamen *lateral collateral* (LCL), merupakan jaringan ligamen yang berfungsi untuk menstabilkan gerakan serta mencegah adanya tekanan *varus* berlebih pada sendi lutut agar terhindar dari cedera (Yaras, 2022). Pada penelitian yang dilakukan oleh (Tood M. Chappell, dkk, 2014) FLC memiliki panjang rata-rata 38-60,5 mm dan lebar 2,3-6.2 mm untuk paha sebelah kanan dan panjang rata-rata 38.0-60.0 mm dan lebar 2.5-6,7 mm untuk paha sebelah kiri (TODD M. CHAPPELL, 2014).



Gambar 2-5 Lokasi FCL pada sendi lutut (R. Putz, 2006).

2.2.3.5 Tibial Collateral Ligament (TCL)

Ligamen *tibial collateral* atau yang biasa disebut ligamen *medial collateral* (MCL) merupakan jaringan ligamen yang kompleks, fungsi utama dari MCL adalah sebagai penstabil statis utama terhadap rotasi yang dilakukan oleh lutut. Dimensi pada MCL dibagi menjadi dua area, yaitu *superficial medial collateral ligament* (sMCL) dan *deep medial collateral ligament* (dMCL), untuk sMCL rata-rata panjangnya adalah $9,0 \pm 1,9$ mm dan untuk lebarnya adalah $11,8 \pm 3,4$ mm. Untuk dMCL memiliki panjang rata-rata $9,4 \pm 3,3$ mm dan untuk lebarnya adalah $9,9 \pm 3,2$ mm (Fang Liu, 2010).



Gambar 2-6 Lokasi MCL [21].

2.2.4 Osteoarthritis

Osteoarthritis (OA) merupakan kekakuan, pembengkakan, dan keterbatasan fungsi gerak sendi yang menyebabkan rasa nyeri pada tubuh, hal ini disebabkan karena adanya perubahan anatomi dan jaringan sendi. OA dapat terjadi pada semua sendi dan tulang rawan. Beberapa studi menyebutkan, diperkirakan 240 juta orang di seluruh dunia memiliki OA, kebanyakan dari pengidap OA adalah orang dengan usia 50 tahun keatas (K.D. Allen, 2022).

Pada penelitian lainnya yang dilakukan oleh (Keith Sinusas, 2012). *Osteoarthritis* merupakan kelainan degeneratif umum yang terjadi pada tulang rawan, faktor yang mempengaruhi terjadinya OA meliputi genetika, jenis kelamin, trauma masa lalu, usia lanjut, dan obesitas. Pada saat penderita terindikasi OA langkah awal untuk mengurangi rasa nyeri adalah dengan berolahraga, apabila rasa sakit terus berkelanjutan, tenaga medis akan memberikan suplemen *glukosa* dan *kondroitin*, kedua suplemen tersebut digunakan untuk mengurangi indikasi OA pada penderita, hal ini dilakukan sebagai evaluasi awal untuk tenaga medis untuk mendiagnosis tingkatan OA. Apabila masih terasa nyeri maka tenaga medis akan meningkatkan golongan OA ke tingkat sedang, pada tingkat ini tenaga medis akan menyuntikan *kortikosteroid* untuk memberikan kelegaan jangka pendek. Bila

penderita masih mengeluhkan rasa nyeri maka tenaga medis akan melakukan rujukan untuk melakukan TKR, hal ini dilakukan setelah mengevaluasi penderita sejak empat hingga delapan minggu (KEITH SINUSAS, 2012).



Gambar 2-7 CT-Scan penderita OA, (A) tampak depan (B) tampak samping [23].

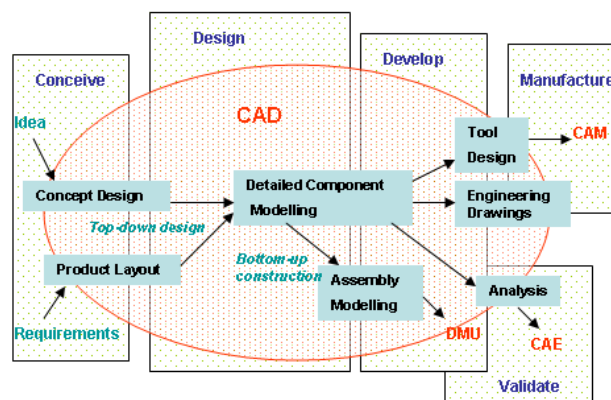
2.2.5 CT-Scan/MRI

Computed tomography scan merupakan alat pemindai kesehatan yang memanfaatkan sinar-x untuk melakukan pengambilan gambar bagian dalam tubuh manusia yang tidak dapat dilihat secara langsung. Pada awal penemuannya, CT-Scan digunakan untuk pemindai otak sapi yang dilakukan oleh Godfrey Hounsfield dan Allen Macleod, setelah dilakukan pengembangan CT-Scan dapat digunakan untuk melakukan pemindaian gambar pada otak manusia (Vladimir Petrik, 2006).

Magnetic Resonance Imaging (MRI) merupakan teknik pengambilan gambar bagian dalam tubuh yang memanfaatkan resonansi magnetik. Dengan teknik ini gambar yang dihasilkan akan lebih kompleks karena penggunaanya dapat mengatur parameter yang dibutuhkan, semakin banyak parameter yang digunakan hasil dari gambar akan semakin detail (Mulyono Notosiswoyo, 2004).

2.2.6 Computer Aided Design (CAD)

CAD merupakan perangkat lunak dan keras yang digunakan untuk membantu *engineer* pada saat melakukan pemodelan, modifikasi, analisis, dan optimalisasi pada suatu desain. Banyak *software* CAD yang dapat digunakan oleh *engineer*, seperti Solidworks, AutoCad, Ansys, dan lainnya. CAD sangat membantu *engineer* pada saat mengeksekusi suatu produk yang akan dibuat. *Engineer* dapat merancang konsep dasar (sketsa gambar), pembuatan model geometri, pembuatan 3D, dan melakukan simulasi serta analisa pada model 3D (Ningsih, 2005).



Gambar 2-8 Computer Aided Design [26].

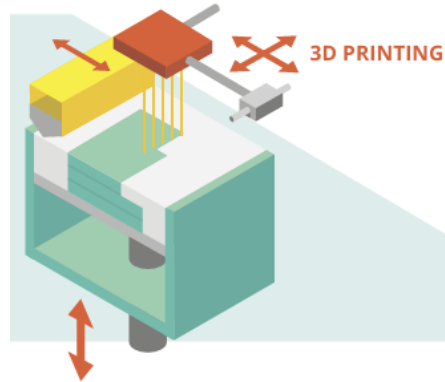
2.2.7 Silicon Rubber RTV

Karet silikon merupakan elastomer (bahan mirip karet) yang dapat tahan lama. Nama silikon diberikan pada tahun 1901 oleh Kipping untuk menggambarkan pada senyawa baru dengan rumus kimia R_2SiO (Curtis, 2004). bahan ini terdiri dari silikon (polimer) serta molekul pendukung yang terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen. Karet silikon memiliki keistimewaan yang terletak pada struktur molekulnya yang membawa gugus anorganik dan organik (Shah, 2013).

2.2.8 3D Print Filament PLA

3D *printing* merupakan teknologi baru yang dapat digunakan untuk mencetak suatu produk dengan cara mencetak lapisan demi lapisan yang tersusun dalam produk tersebut. 3D *printing* dikendalikan dengan perangkat lunak yang

sudah terdapat bahasa pemrograman (G-code) pada mesin. Salah satu jenis 3D *print* yang sering ditemukan adalah 3D *print* filamen PLA (Polylactic Acid). 3D *print* bekerja dengan cara melelehkan filamen yang terdapat pada mesin lalu dikeluarkan lewat *nozzle* yang dapat bergerak ke arah x,y, dan z (Wijk, 2015).



Gambar 2-9 3D Print Filament PLA [29].

2.2.9 Casting Mold

2.2.9.1 Slush Casting Molding

Slush casting merupakan metode pengecoran dengan cara menuangkan cairan ke dalam cetakan lalu menunggu hingga kering, teknik ini digunakan pada cetakan permanen. Dengan teknik ini bahan material yang digunakan dapat dikontrol agar barang yang dihasilkan sesuai dengan kriteria yang dibutuhkan. Teknik ini sering digunakan pada industri mainan untuk memproduksi komponen yang bersifat ornamen atau penghias (Vasylykiv V., 2021).

2.2.9.2 Injection Casting Molding

Injection molding merupakan salah satu proses manufaktur yang paling banyak dipakai, metode ini menggunakan tekanan angin untuk mengeluarkan cairan material plastik yang akan dicetak ke dalam cetakan. Metode ini banyak dipakai karena dapat menjangkau lekukan kecil pada cetakan, sehingga hasil

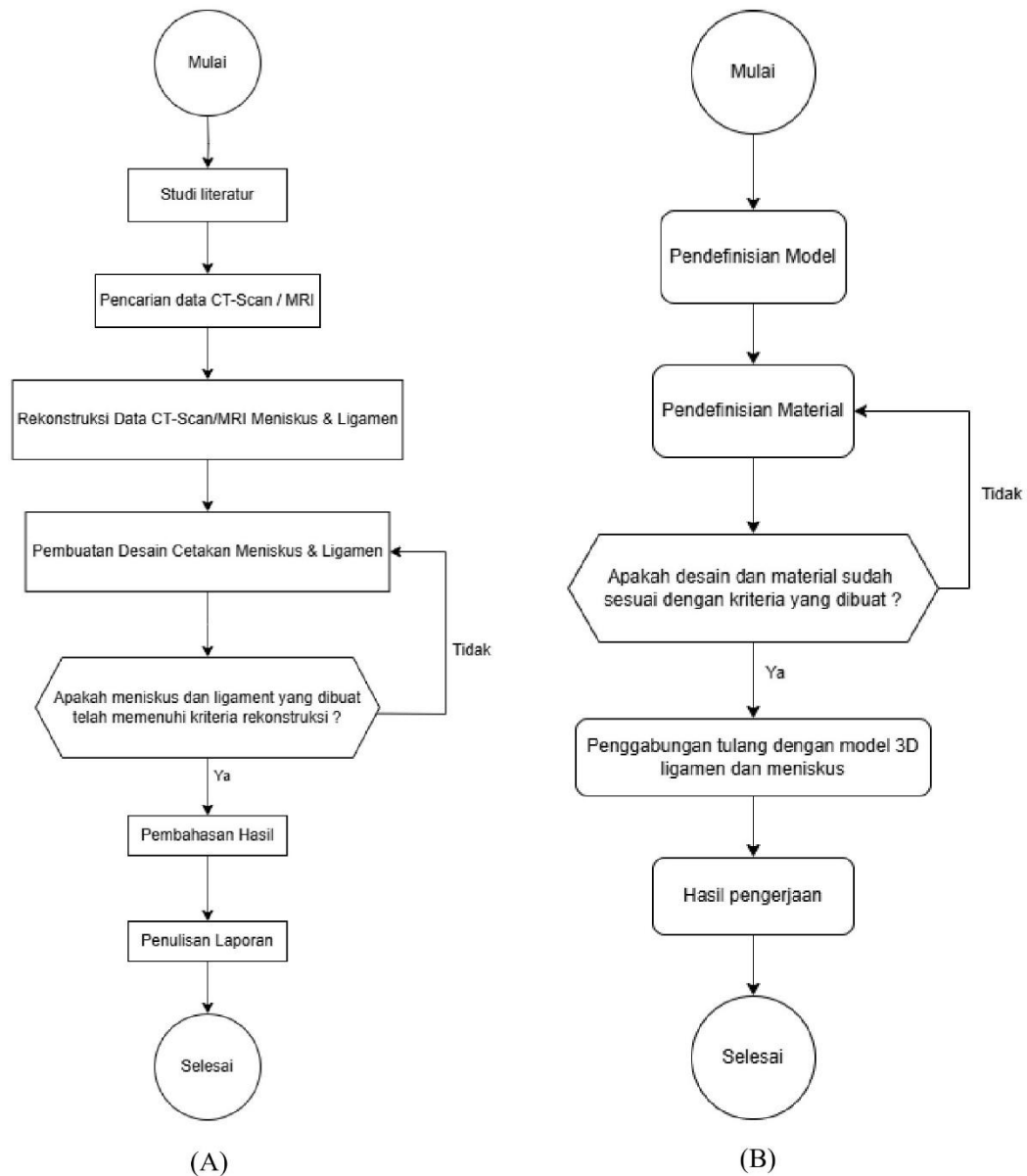
barang yang dicetak dapat sesuai dengan kriteria yang dibuat (Satriyo Adhi Nugroho¹, 2021).

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Berikut adalah alur dari penelitian ini :



Gambar 3-1 (A) Diagram alur penelitian. (B) Diagram kriteria model 3D.

3.2 Kriteria Rekonstruksi

Kriteria rekonstruksi berisikan tentang kriteria yang telah ditentukan sebelum melakukan rekonstruksi meniskus dan ligamen dari data CT-Scan/MRI. Berikut adalah kriteria rekonstruksi dari penelitian ini :

1. Hasil rekonstruksi model 3D meniskus dan ligamen pada sendi lutut memiliki bentuk serupa dengan meniskus dan ligamen aslinya.
2. Model 3D meniskus dan ligamen berupa *solid body* untuk mempermudah pembuatan cetakan dari meniskus dan ligamen.

3.3 Kriteria Desain

Kriteria desain berisikan tentang kriteria yang telah di tentukan sebelum melakukan suatu desain agar desain yang dihasilkan dapat sesuai dengan keadaan aslinya. Kriteria desain menjadi acuan utama agar model 3D yang dibuat dapat berfungsi dengan normal dan sesuai dengan keadaan sesungguhnya. Berikut adalah kriteria desain yang dipilih pada penelitian ini :

1. Model prototipe meniskus dan ligamen yang dibuat berdasarkan pada meniskus dan ligamen pada anatomi aslinya yang didapatkan data yang sudah ada dari hasil CT-Scan/MRI.
2. Prototipe yang dibuat dapat dilepas pasang untuk memudahkan pembelajaran.
3. Model 3D dapat digunakan untuk menjelaskan proses pelaksanaan *total knee replacement* serta dapat menjelaskan anatomi sendi lutut.

3.4 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini terdapat alat dan bahan yang digunakan untuk mendukung jalannya penelitian ini, adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3-1 dan 3-2.

No.	Alat	Fungsi
1	Laptop	Perangkat utama untuk melakukan penelitian yang dari awal hingga selesai
2	3D <i>Slicer</i>	Perangkat lunak untuk melakukan rekonstruksi dan mengubah format <i>file</i> CT-Scan/MRI menjadi STL
3	<i>Autodesk Mesh Mixer</i>	Perangkat lunak untuk memperhalus part STL
4	<i>SOLIDWORKS 2022</i>	Perangkat lunak untuk mengubah part STL menjadi part solid dan membuat cetakan silikon
5	<i>FlashPrint 5</i>	Perangkat lunak untuk memproses 3D print
6	3D Printer	Perangkat keras untuk pembuatan tulang dan cetakan silikon

Tabel 3-1 Alat

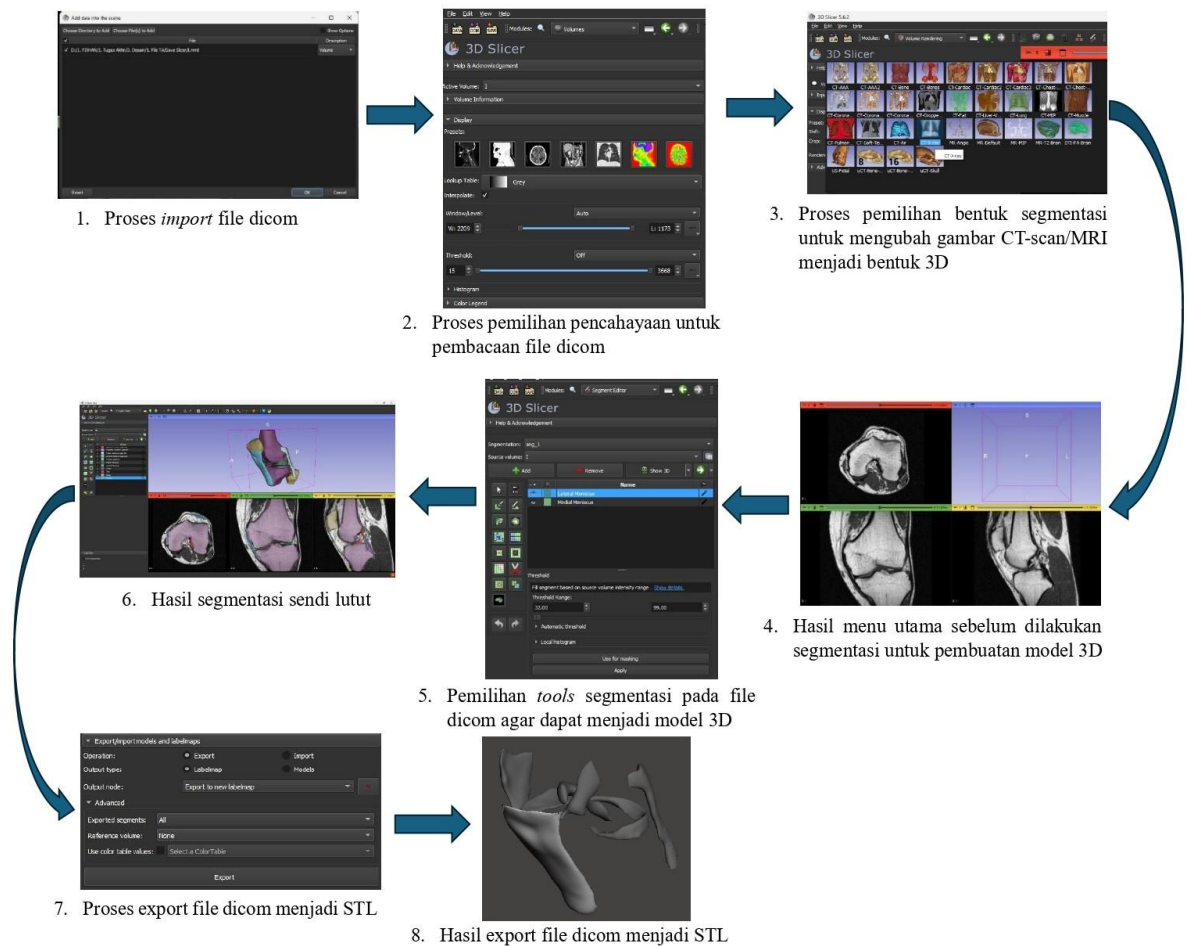
1	File CT-Scan/MRI lutut	Bahan utama penelitian
2	<i>Esun Filament PLA+</i>	Bahan pembuatan model 3D dan cetakan silikon
3	<i>Silicon RTV 42</i>	Bahan material untuk pembuatan meniskus dan ligamen
4	<i>Catalyst</i> silikon	Bahan campuran untuk memadatkan silikon
5	<i>Gorilla Heavy Duty Construction Adhesive</i>	Bahan untuk merekatkan silikon dengan model 3D tulang

Tabel 3-2 Bahan

3.5 Rekonstruksi Sendi Lutut

Tahap awal pada rekonstruksi sendi lutut adalah mencari file CT-Scan/MRI tulang lutut dengan format file dicom. File tersebut dapat ditemukan pada website www.embodi3d.com dengan nama pengunggah embodi3d. Setelah mendownload file CT-Scan/MRI sendi lutut, *import* file CT-Scan/MRI menggunakan perangkat lunak 3D *Slicer* untuk mengubah bentuk file dicom menjadi bentuk STL. Proses ini cukup penting agar pada saat file dicom telah di *import* menjadi file STL tidak

terlalu banyak *mesh* yang harus dihapus. Berikut adalah proses rekonstruksi sendi lutut.



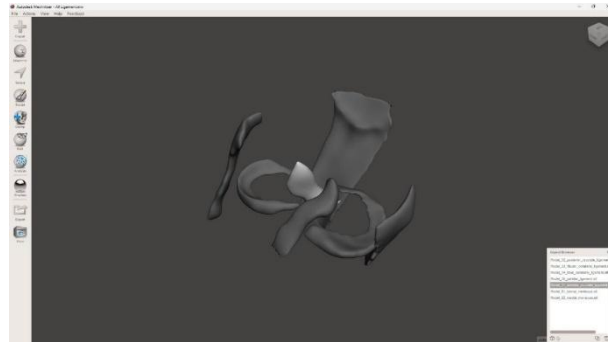
Gambar 3-2 Gambar proses rekonstruksi sendi lutut

3.6 Pembuatan Desain 3D Ligamen dan Meniskus Pada Sendi Lutut

3.6.1 Proses Penghalusan Ligamen dan meniskus

Setelah mengubah bentuk *file* DICOM menjadi STL, langkah berikutnya adalah penghalusan ligamen dan meniskus yang dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Meshmixer. Proses ini bertujuan agar bagian yang akan diubah menjadi bentuk solid tidak berlubang yang mengakibatkan *file* tidak dapat diubah menjadi ke bentuk solid. Selain itu tujuan dari proses ini untuk membuat

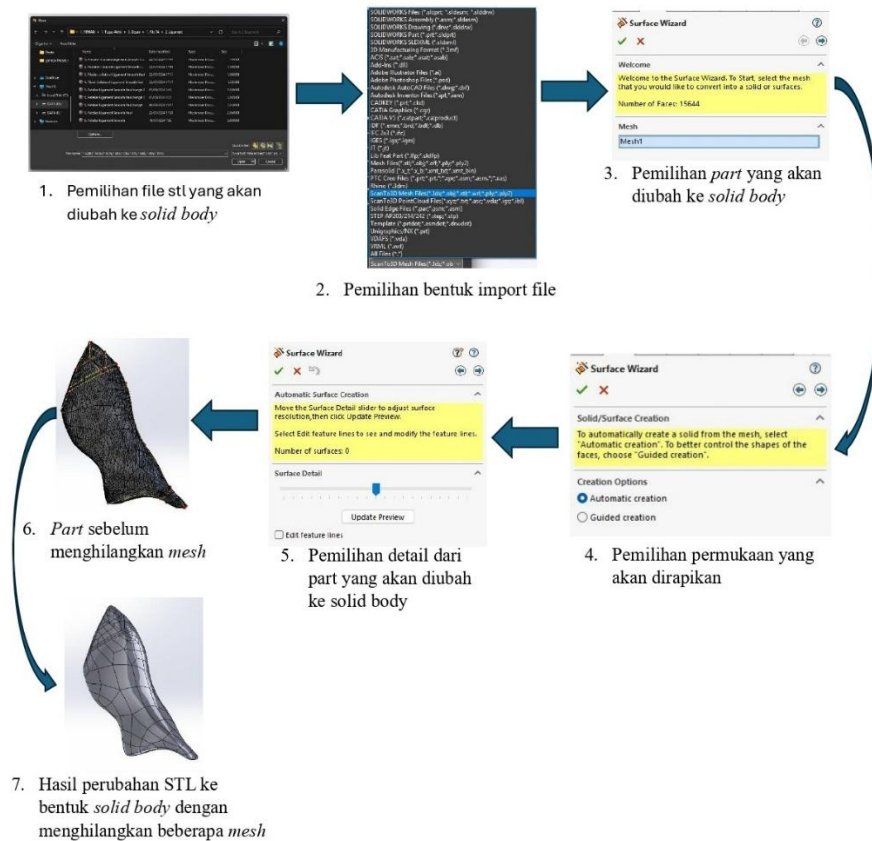
model 3D sesuai dengan bentuk model aslinya. Berikut adalah gambar dari hasil dari proses penghalusan:



Gambar 3-3 Hasil penghalusan model 3D meniskus dan ligamen.

3.6.2 Mengubah Bentuk *File STL* ke *Solid Part*

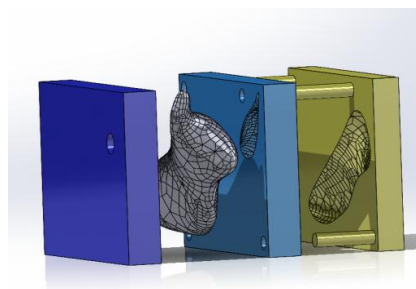
Pada proses ini hasil model 3D meniskus dan ligamen yang telah dihaluskan pada Meshmixer akan diubah bentuk dari STL ke *solid body* menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS 2020 dengan *tool Scanto3D*. Tujuan dari proses ini adalah untuk memudahkan pembuatan cetakan yang akan digunakan pada saat mencetak silikon. Berikut adalah gambar dari proses perubahan bentuk *file STL* ke *solid part*



Gambar 3-4 Proses mengubah bentuk STL ke *solid body*

3.7 Pembuatan Desain Cetakan Meniskus dan Ligamen

Pembuatan cetakan untuk silikon merupakan bagian yang penting pada penelitian ini, dengan adanya cetakan dapat mempermudah untuk membentuk silikon agar sesuai dengan bentuk meniskus dan ligamen aslinya. Cetakan yang dibuat menggunakan material filamen PLA+ 3D *print*, bahan ini dipilih karena cukup mudah didapatkan. Pembuatan cetakan dibuat menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS 2022 dengan menggunakan *tool cavity*. Berikut adalah gambar pembuatan desain cetakan meniskus dan ligamen:



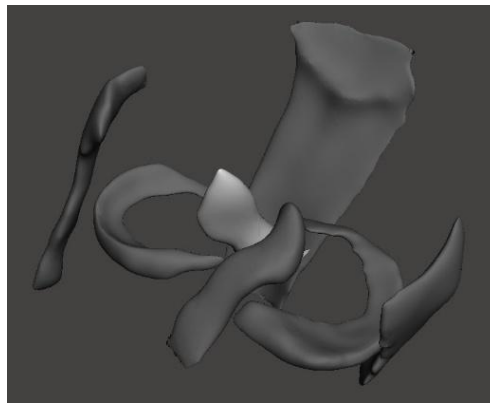
Gambar 3-5 Hasil desain cetakan ligamen.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Rekonstruksi

Hasil dari proses rekonstruksi ligamen dan meniskus menggunakan perangkat lunak 3D *slicer* cukup sesuai dengan kriteria rekonstruksi walaupun masih terdapat bagian yang kurang jelas. Berikut adalah gambar dari hasil rekonstruksi yang telah dilakukan:



Gambar 4-1 Hasil rekonstruksi ligamen dan meniskus.

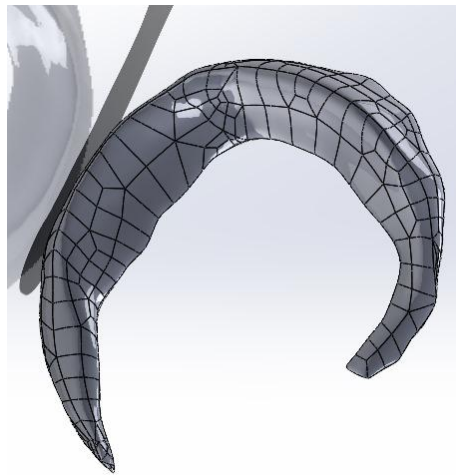
4.2 Hasil Desain

4.2.1 Hasil *Solid Body* Ligamen dan meniskus

Hasil *solid body* ligamen dan meniskus merupakan hasil akhir dari *file* STL yang telah diubah menjadi bentuk 3D *solid body part*. Proses ini dilakukan dengan mengkonversi *file* STL dari perangkat lunak *Meshmixer* lalu mengubahnya dengan perangkat lunak *solidworks* menggunakan *add-in scanto3D*. hasil ini dapat digunakan untuk membuat cetakan ligamen dan meniskus dan dapat digunakan untuk analisis jika dibutuhkan. Berikut adalah hasil *solid body* ligamen dan meniskus.



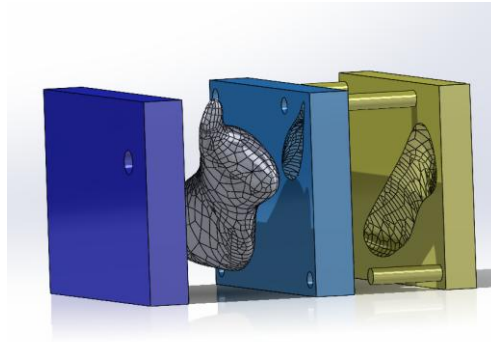
Gambar 4-2 Hasil solid body ligamen.



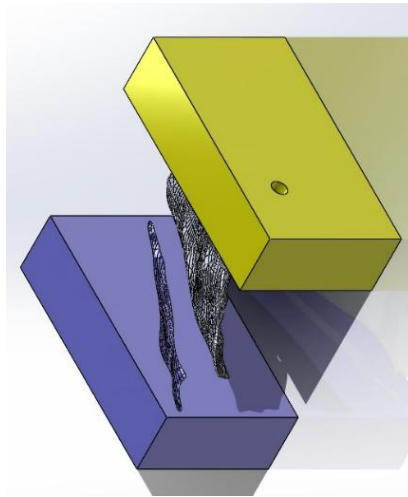
Gambar 4-3 Hasil solid body meniskus.

4.2.2 Hasil Desain Cetakan Ligamen dan Meniskus

Hasil desain cetakan dibuat menggunakan perangkat lunak *solidworks* dengan menggunakan *add-in cavity*, fitur tersebut berguna untuk membuat cetakan dari *part* yang akan dibuat. Cara menggunakan fitur *cavity* pada penelitian ini dengan menggunakan hasil dari *part* dari *solid body* ligamen dan meniskus yang telah dibuat sebelumnya. Pada desain cetakan terdapat perubahan pada desain akhir, yaitu dengan menghilangkan pengunci yang ada pada cetakan, perubahan tersebut tidak mempengaruhi hasil cetakan silikon yang dibuat. Berikut adalah hasil desain yang telah dibuat.



Gambar 4-4 Desain awal cetakan.

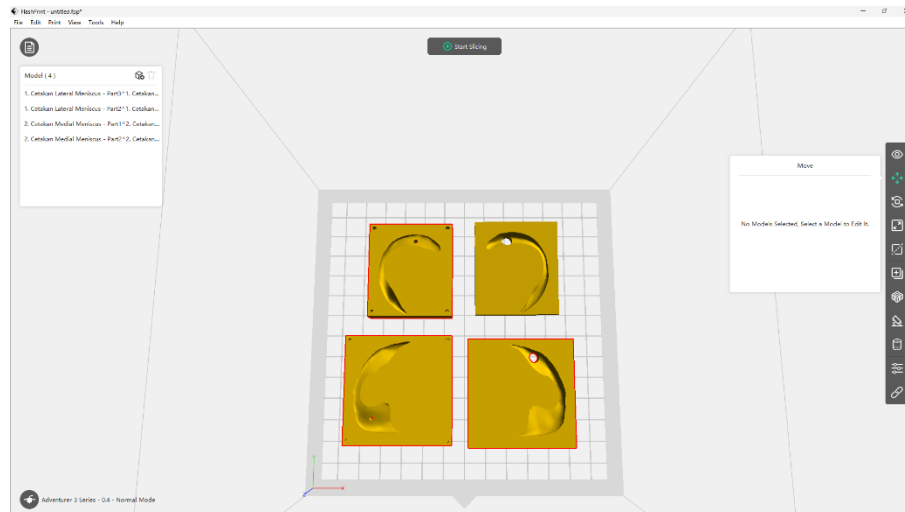


Gambar 4-5 Hasil akhir cetakan silikon.

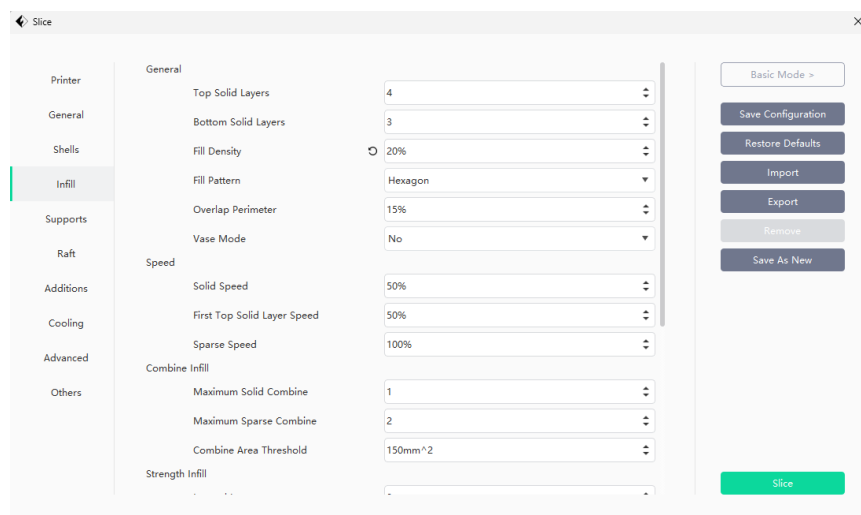
4.3 Proses Pembuatan

4.3.1 Cetakan Silikon Ligamen dan Meniskus

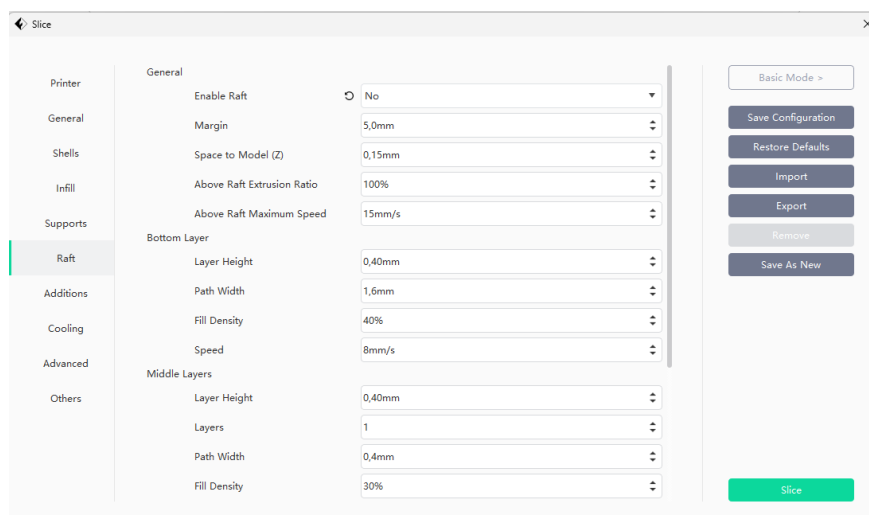
Pada proses ini cetakan silikon akan dibuat menggunakan mesin 3D *print*. penggunaan 3D *print* dipilih agar biaya maupun waktu yang diberikan dapat ditekan sehingga lebih efisien. Selain itu hasil dari cetakan bagian dalam menjadi halus, sehingga hasil model 3D silikon yang dicetak akan memiliki bentuk yang mirip dengan anatomi aslinya. Proses ini menggunakan perangkat lunak *FlashPrint* 5 untuk mengatur desain, agar cetakan yang dihasilkan dapat dicetak dengan efisien.



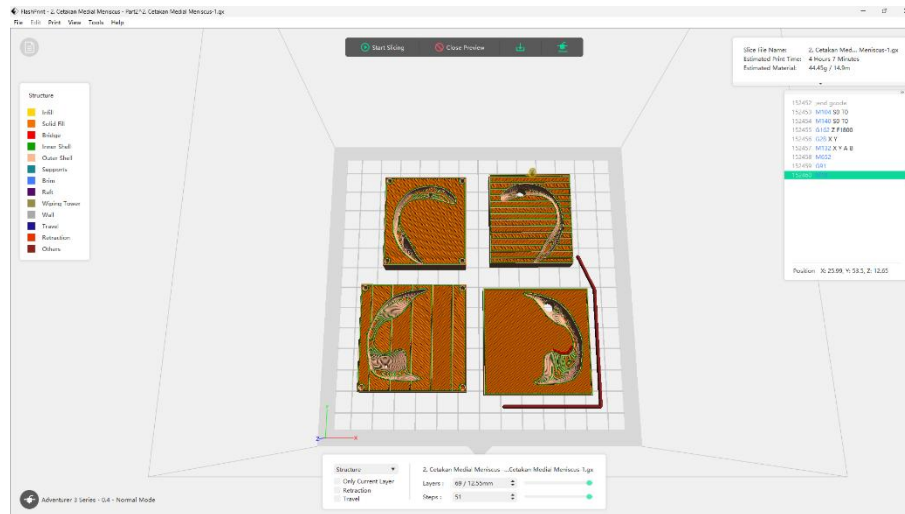
Gambar 4-6 Proses penempatan desain pada perangkat lunak 3D *print*.



Gambar 4-7 Proses mengatur ketebalan filamen pada cetakan.



Gambar 4-8 Proses pengaturan penyangga/*support* pada desain yang akan dicetak.



Gambar 4-9 hasil pengaturan pada perangkat lunak 3D *print*.



Gambar 4-10 Proses 3D *print* cetakan silikon.



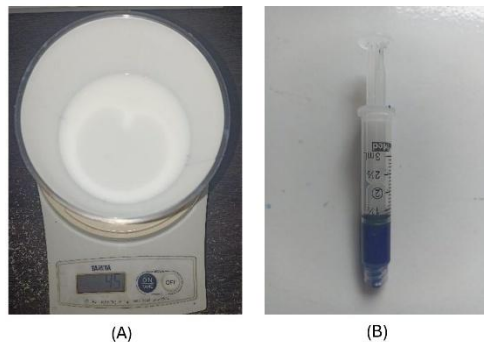
Gambar 4-11 Hasil 3D *print* cetakan silikon.

4.3.2 Model 3D Silikon Ligamen dan Meniskus

Proses ini merupakan proses pembuatan model 3D dengan mencampurkan bahan material silikon RTV-52 dengan katalis silikon untuk memadatkan hasil silikon. Formula yang dipakai untuk mencetak model 3D adalah sebagai berikut :

Bahan	Jumlah	Satuan
Silikon RTV-52	45	gram
Katalis	1	gram

Tabel 4-1 Formula Pembuatan Model 3D.



Gambar 4-12 (A) Takaran silikon, (B) Takaran katalis.

Untuk 1000 gram silikon membutuhkan 40 gram katalis jadi untuk perbandingan dari silikon dengan katalis sebesar 1:25, karena kebutuhan dari silikon sebesar 45 gram dan untuk kebutuhan katalisnya sebesar 1 gram. Formula ini digunakan untuk 7 anatomi dari bagian sendi lutut yang dibuat, formula tersebut didapatkan pada saat penelitian ini berlangsung.

Proses pencampuran silikon dengan katalis dilakukan dengan cara mengaduk kedua material sampai tercampur rata, hal ini bertujuan agar silikon yang akan dicetak cepat mengeras sehingga tidak memerlukan waktu lama untuk mengeluarkannya dari cetakan. Pada gambar alur di bawah ini dapat dilihat proses pencampuran silikon dengan katalis, setelah itu dilakukan pengadukan secara merata pada silikon agar katalis tercampur rata pada semua silikon, gambar hasil dari proses pengadukan yang telah dilakukan dapat dilihat pada gambar alur. setelah proses pencampuran dan pengadukan, silikon baru dapat dituangkan ke dalam cetakan ligamen dan meniskus.

Proses selanjutnya adalah penuangan material silikon ke dalam cetakan, terdapat 2 teknik penuangan ke dalam cetakan yang digunakan pada penelitian ini.

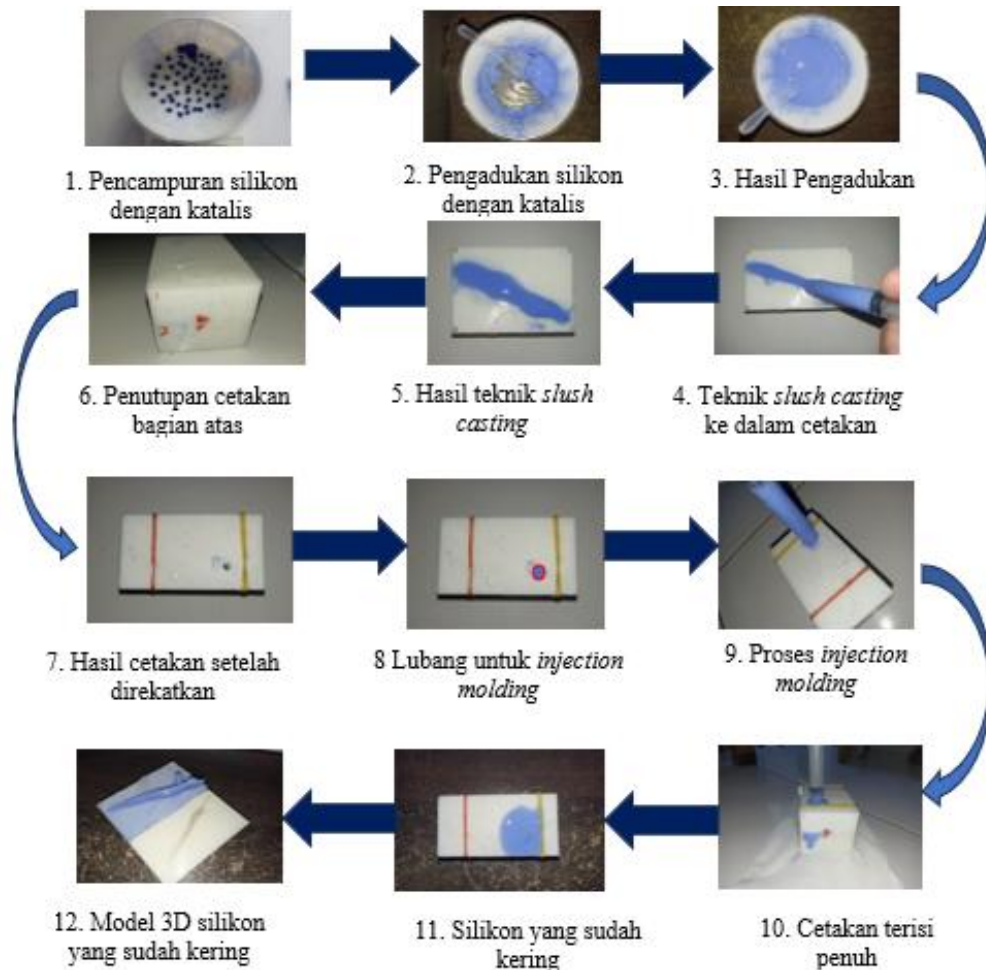
Pertama dengan teknik *slush casting* atau penuangan material secara langsung ke dalam cetakan, hal ini bertujuan agar silikon yang dituang ke dalam cetakan dapat menghasilkan bentuk sesuai dengan kriteria yang diinginkan. Dengan cara ini silikon dapat memenuhi seluruh area cetakan.

Langkah berikutnya adalah menutup bagian bawah cetakan dengan bagian atas cetakan, hal ini bertujuan untuk mencetak bagian atas model 3D dengan teknik *injection molding*. Dapat dilihat pada gambar alur pembuatan sebelum melakukan teknik *injection molding* cetakan akan ditutup dengan bagian atas serta dirapatkan menggunakan karet gelang. Setelah merekatkan dengan karet gelang, cairan silikon akan dituangkan lewat lubang kecil yang terdapat pada cetakan bagian atas. Cairan silikon dituangkan ke dalam cetakan menggunakan alat bantu suntikan 5ml. Cairan dituangkan ke dalam cetakan sebanyak dua kali sampai cetakan terisi penuh oleh cairan silikon.

Setelah bagian atas dan bawah dirapatkan, proses selanjutnya adalah menuangkan cairan silikon ke dalam cetakan menggunakan teknik *injection molding* atau teknik pengecoran dengan bantuan tekanan udara agar cairan dapat memenuhi seluruh bagian cetakan. Cairan silikon akan dituangkan menggunakan alat bantu suntik dengan ukuran 5ml lewat lubang kecil yang telah dibuat pada cetakan, lubang tersebut dapat dilihat pada gambar alur pembuatan. Teknik *injection molding* dipilih karena material cetakan dibuat permanen dan tidak memungkinkan untuk dihancurkan. Dapat dilihat pada gambar alur pembuatan cairan silikon didorong masuk oleh suntikan ke dalam cetakan. Proses penuangan cairan silikon dilakukan sampai ada cairan yang keluar dari sisi-sisi cetakan, hal ini untuk memastikan bahwa cairan silikon telah masuk ke semua area cetakan.

Setelah proses ini cairan silikon akan didiamkan selama 8-12 jam dengan tujuan agar silikon kering secara maksimal, cairan silikon dipantau setiap 4 jam untuk memastikan apakah silikon sudah kering atau belum. perkiraan jam tersebut didapatkan setelah penelitian ini berlangsung. Setelah kering dan menjadi elastis karet gelang yang mengikat cetakan akan dibuka, setelah cetakan akan dibuka menggunakan alat pencungkil untuk membuka cetakan.

Dibawah ini merupakan gambar alur proses pembuatan dari model 3D.



Gambar 4-13 Alur pembuatan model 3D

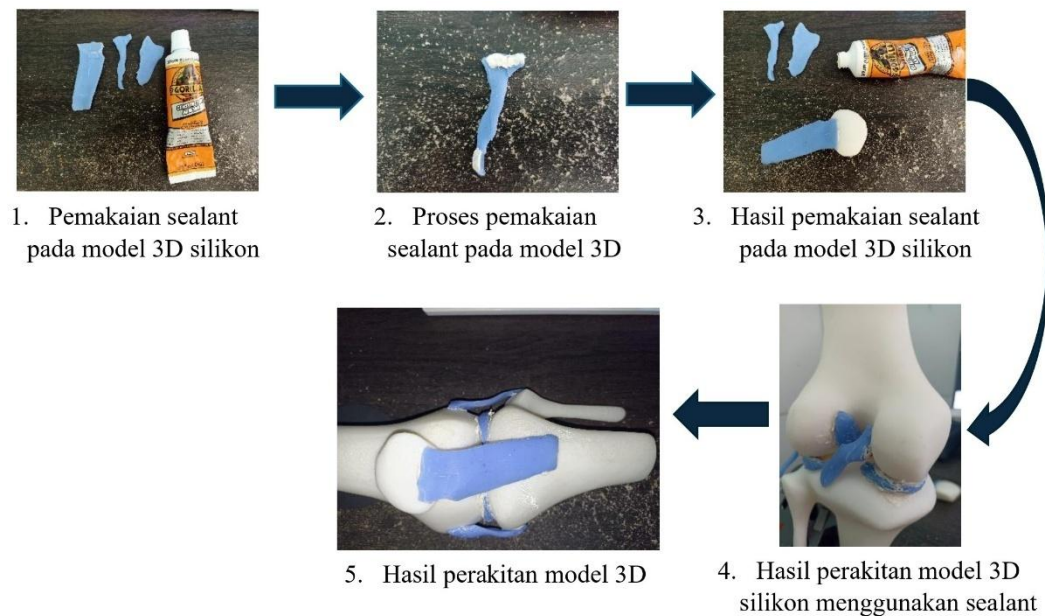
Setelah kering dan dapat dikeluarkan dari cetakan, langkah selanjutnya adalah membersihkan bagian silikon yang tidak digunakan pada model 3D silikon yang dibuat, hal ini bertujuan agar model 3D yang dicetak dapat sesuai dengan anatomi aslinya, pembersihan silikon yang tidak digunakan dilakukan dengan cara memotong menggunakan benda tajam seperti gunting dan pisau.



Gambar 4-14 Hasil model 3D yang telah dibersihkan.

4.3.3 Merangkai Model 3D

Proses ini merupakan tahap akhir dari seluruh proses pembuatan, pada proses ini model 3D silikon meniskus dan ligamen akan direkatkan dengan model 3D tulang menggunakan *sealant*. Pada saat merekatkan 3D model meniskus dan ligamen dengan model 3D tulang *sealant* diberikan dengan cara dioles ke bagian dalam model 3D silikon. Berikut adalah gambar alur proses merangkai model 3D.



Gambar 4-15 Alur proses perakitan

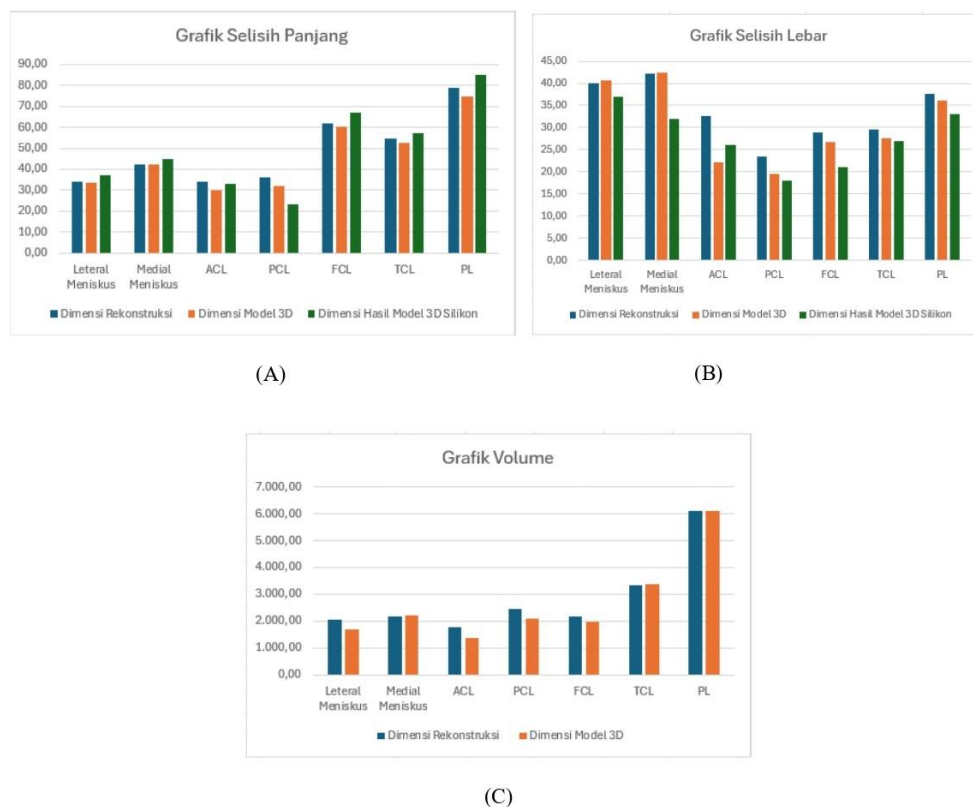
4.4 Analisis

4.4.1 Perbandingan Ukuran

Perbandingan ukuran pada model 3D yang dibuat cukup penting untuk mengetahui perbandingan antara model 3D yang dibuat dengan anatomi aslinya. Dengan mengetahui perbandingan dari model 3D yang dibuat dengan anatomi aslinya, model 3D yang dibuat akan semakin nyata sehingga pengguna dapat mengetahui tindakan asli dari *total knee replacement*. Berikut adalah tabel perbandingan dalam satuan milimeter (mm) antara model 3D yang dibuat dengan anatomi aslinya.

Anatomi	Dimensi Rekonstruksi		Dimensi Hasil Model 3D		Dimensi Hasil Model 3D Silikon	
	P	L	P	L	P	L
Lateral Meniskus	33,94	40,10	33,35	40,73	37	37
Medial Meniskus	42,45	42,22	42,29	42,38	45	32
ACL	33,79	32,69	29,72	22,16	33	26
PCL	36,32	23,39	32,17	19,52	23	18
FCL	62,02	29,00	60,25	26,68	67	21
TCL	54,73	29,57	52,52	27,58	57	27
PL	78,96	37,55	74,8	36,13	85	33

Tabel 4-2 Perbandingan dimensi model 3D



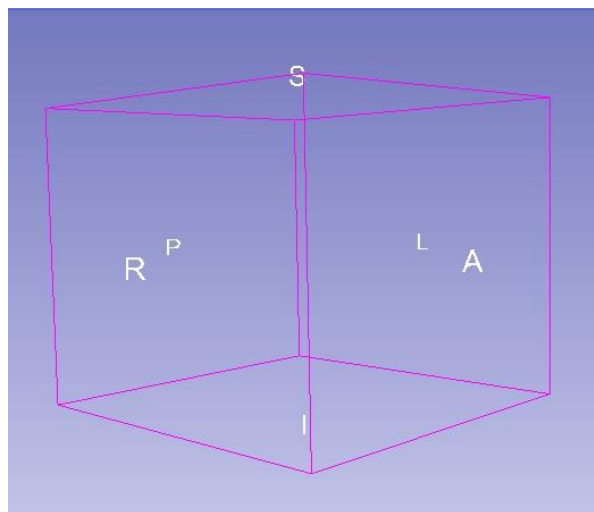
Gambar 4-16 (A) Grafik perbandingan panjang, (B) Grafik perbandingan lebar, (C) Grafik volume

Keterangan: ACL= *Anterior Cruciate Ligament*, PCL= *Posterior Cruciate Ligament*, PL= *Patellar Ligament*, FCL= *Fibular Collateral Ligament*, TCL= *Tibial Collateral Ligament*.

Perbandingan ini didapatkan menggunakan 2 metode yaitu pengukuran langsung dan tidak langsung. Untuk pengukuran langsung, dilakukan pada model 3D menggunakan penggaris/mistar. Sedangkan untuk dimensi anatomi dan rekonstruksi menggunakan metode pengukuran tidak langsung, dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *solidworks*. Pengukuran dimensi dilakukan dengan mengukur panjang (P), dan lebar (L) dari anatomi dan model 3D yang telah dibuat. Selain itu untuk menentukan adanya penyusutan dilakukan juga pengukuran volume pada proses rekonstruksi dan proses pembuatan model 3D.

4.4.1.1 Pengukuran Anatomi

Pengukuran ini dilakukan dengan mengukur hasil CT-Scan/MRI yang digunakan untuk pembuatan model 3D, dengan menggunakan perangkat lunak 3D-Slicer. Pengukuran dilakukan dengan mengukur tiap titik terluar dari bagian anatomi, dengan menggunakan bantuan *region of interest* (ROI). Penggunaan ROI bertujuan untuk membuat batasan pada anatomi yang akan diukur. Pembuatan ROI tidak terlepas dari menentukan kordinat pengukuran. Pada perangkat lunak 3D-Slicer kordinat yang digunakan adalah anatomi standar. Kordinat ini biasa digunakan pada bidang kesehatan. Untuk pengukuran volume dilakukan setelah proses segmentasi selesai. Berikut ini adalah gambar kordinat dan pengukuran pada 3D-Slicer .



Gambar 4-17 Gambar kordinat pada 3D-Slicer

Penjelasan kordinat di atas dapat dilihat pada tabel berikut.

Huruf	Arti	Posisi
S	<i>Superior</i>	Di atas
I	<i>Inferior</i>	Di bawah
A	<i>Anterior</i>	Di depan
P	<i>Posterior</i>	Di belakang
L	<i>Left</i>	Sebelah Kiri
R	<i>Right</i>	Sebelah Kanan

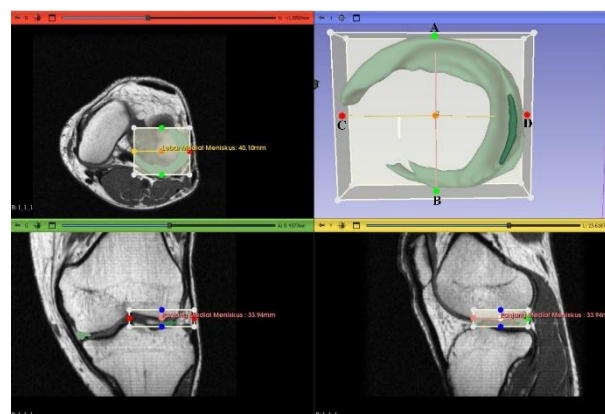
Tabel 4-3 Keterangan kordinat

Segment	Surface area [mm2]	Volume [mm3]	Volume [cm3]
1 Lateral Meniscus	1792.47	2044.77	2.04477
2 Medial Meniscus	1895.95	2176.45	2.17645

Gambar 4-18 Volume meniskus

Segment	Surface area [mm2]	Volume [mm3]	Volume [cm3]
1 ACL	1176.85	1758.84	1.75884
2 PCL	1594.92	2438.85	2.43885
3 FCL	1782.91	2184.83	2.18483
4 TCL	2499.61	3348.26	3.34826
5 PL	4813.62	6086.59	6.08659

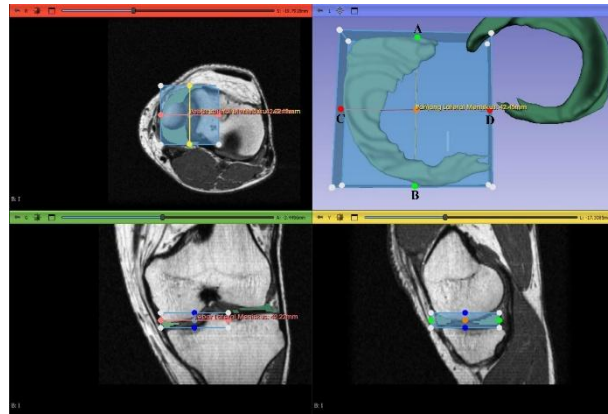
Gambar 4-19 Volume ligamen



Gambar 4-20 Pengukuran *lateral meniskus* dari posisi *superior*

R.		
Lebar Lateral Meniskus	length: 40.10mm	
Panjang Lateral Meniskus	length: 33.94mm	

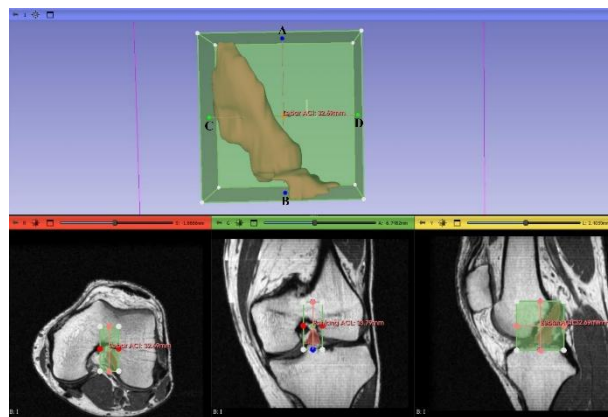
Gambar 4-21 Hasil pengukuran *lateral meniskus*



Gambar 4-22 Pengukuran *medial meniskus* dari posisi *superior*

R_2	MarkupsLine		
Panjang Medial Meniskus		length: 42.45mm	
Lebar Medial Meniskus		length: 42.22mm	

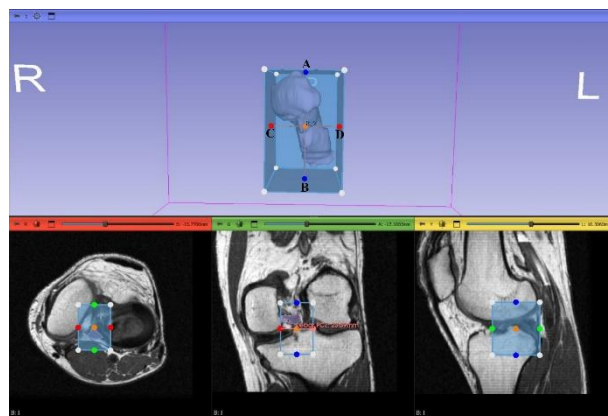
Gambar 4-23 Hasil pengukuran *medial meniskus*



Gambar 4-24 Pengukuran ACL dari posisi *kanan*

R_1			
Panjang ACL		length: 33.79mm	
Lebar ACL		length: 32.69mm	

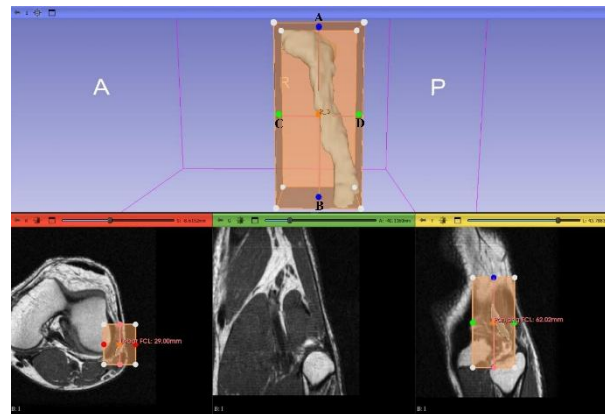
Gambar 4-25 Hasil pengukuran ACL



Gambar 4-26 Pengukuran PCL dari posisi *anterior*

R_2	
Panjang PCL	length: 36.32mm
Lebar PCL	length: 23.39mm

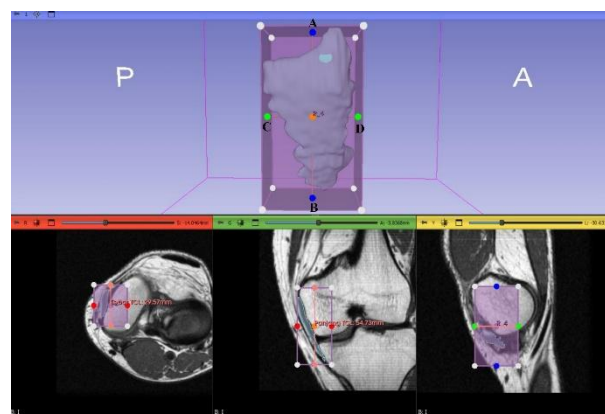
Gambar 4-27 Hasil pengukuran PCL



Gambar 4-28 Pengukuran FCL dari posisi kiri

R_3	
Panjang FCL	length: 62.02mm
Lebar FCL	length: 29.00mm

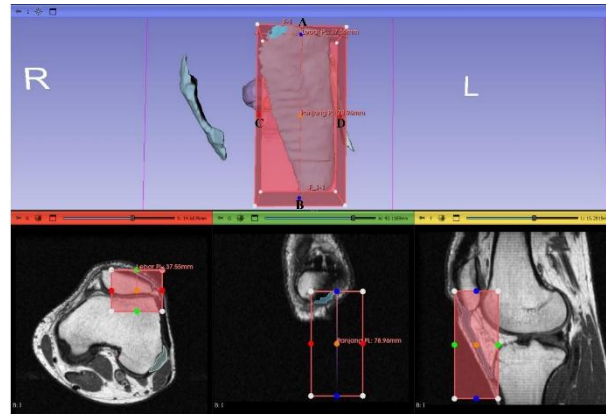
Gambar 4-29 Hasil pengukuran FCL



Gambar 4-30 Pengukuran TCL dari posisi kanan

R_4	
Panjang TCL	length: 54.73mm
Lebar TCL	length: 29.57mm

Gambar 4-31 Hasil pengukuran TCL



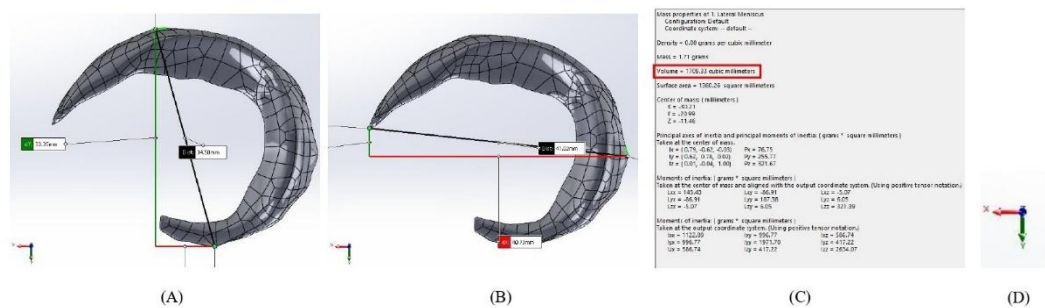
Gambar 4-32 Pengukuran PL dari posisi anterior

Node	Description
Point Atas	
Point Bawah	
Panjang PL	length: 78.96mm
1	
Lebar PL	length: 37.55mm

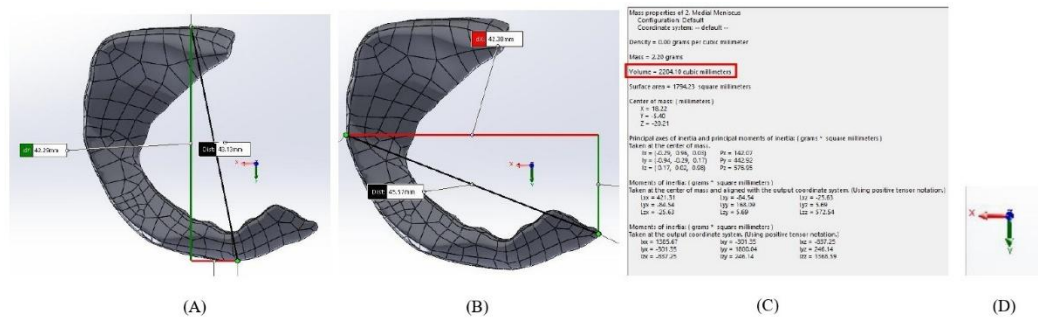
Gambar 4-33 Hasil pengukuran PL

4.4.1.2 Pengukuran Rekonstruksi

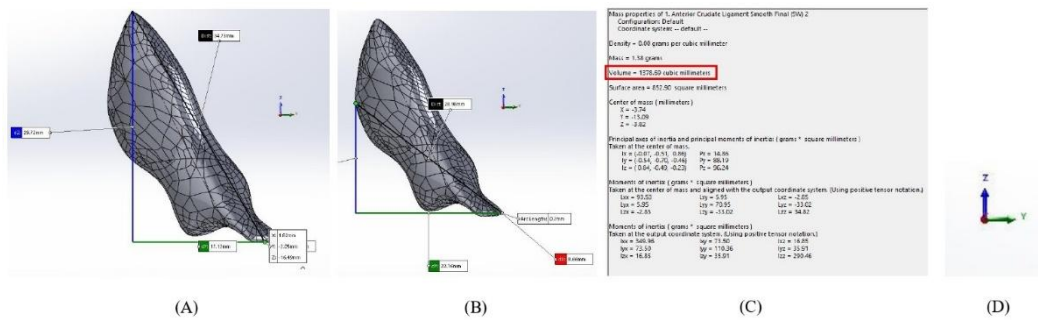
Pada pengukuran rekonstruksi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Solidworks 2022, menggunakan *tools measure* yang ada di perangkat lunak solidworks 2022. Untuk mengetahui volume dari model 3D menggunakan *tools mass propertise* pada menu *evaluate* yang ada di perangkat lunak solidworks 2022. Pengukuran pada rekonstruksi bertujuan untuk mengetahui selisih dari dimensi anatomi setelah dihilangkan *noise* pada hasil rekonstruksi. Berikut adalah gambar dari hasil pengukuran rekonstruksi.



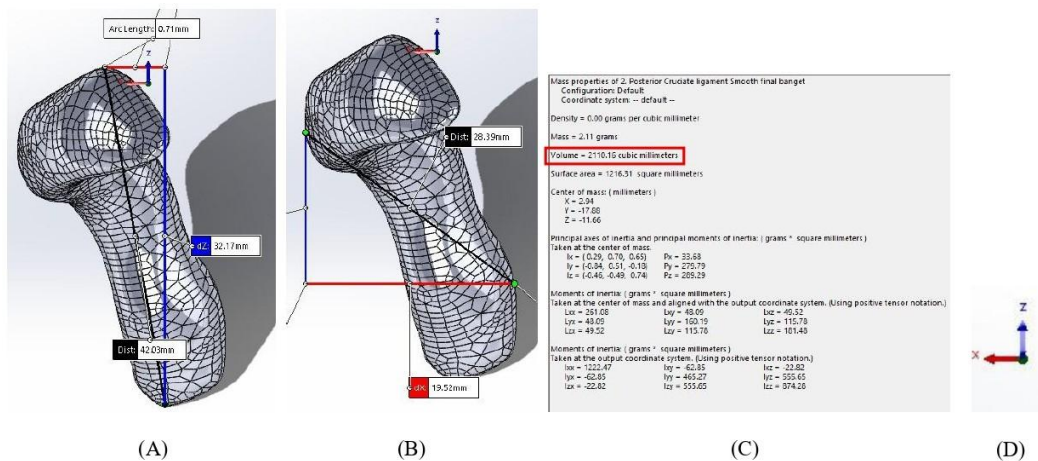
Gambar 4-34 Pengukuran lateral meniskus (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran



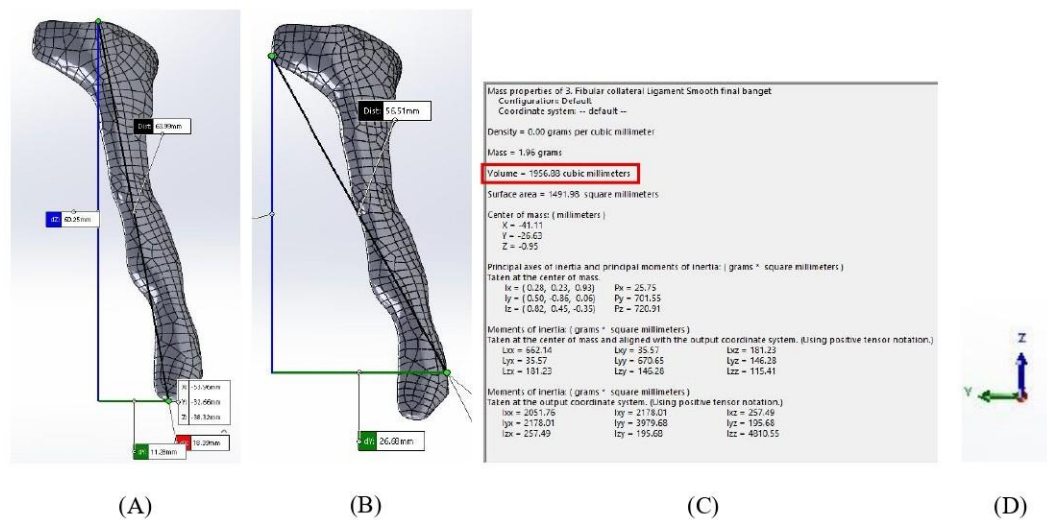
Gambar 4-35 Pengukuran medial meniskus (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran



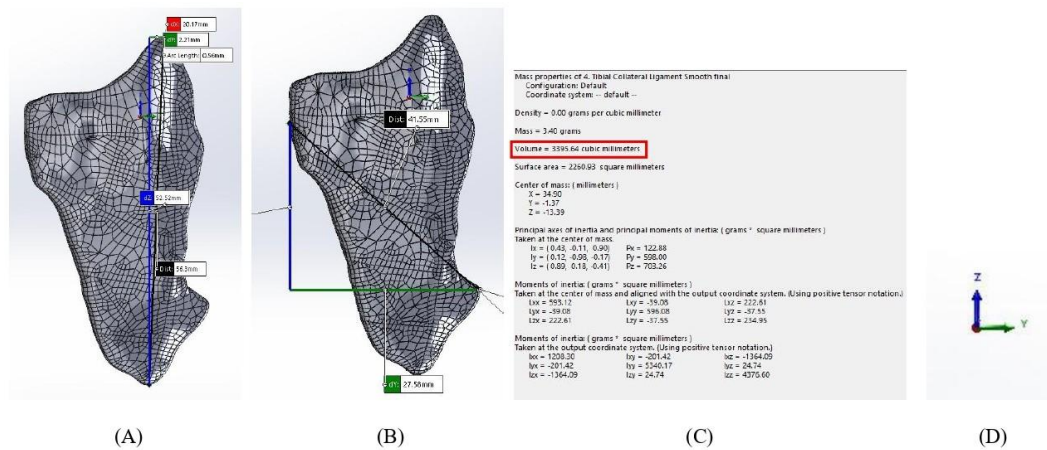
Gambar 4-36 Pengukuran ACL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran



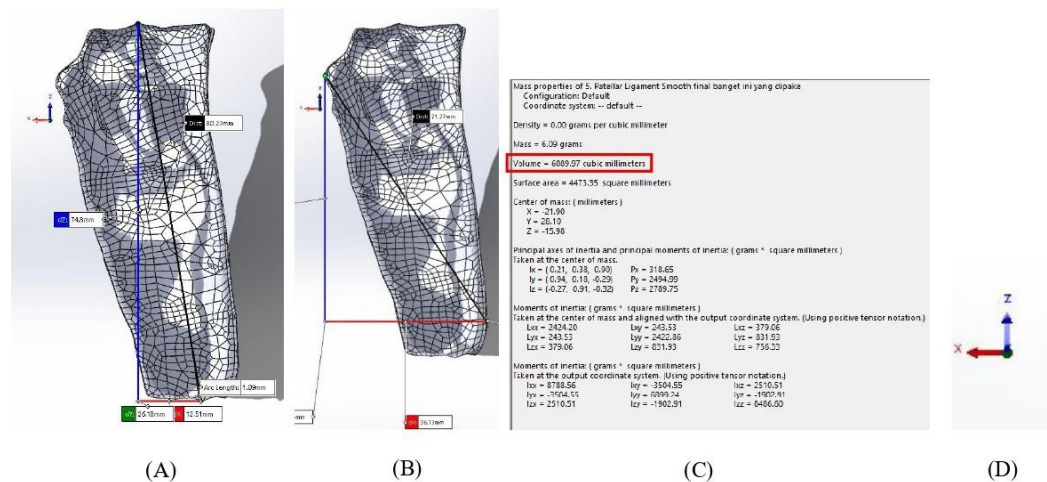
Gambar 4-37 Pengukuran PCL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran



Gambar 4-38 Pengukuran FCL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran



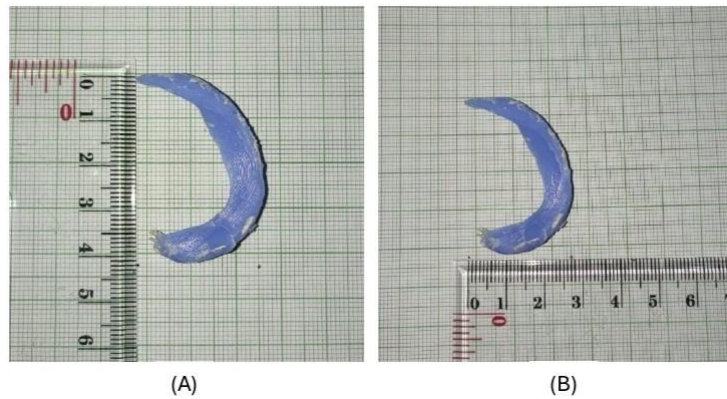
Gambar 4-39 Pengukuran TCL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran



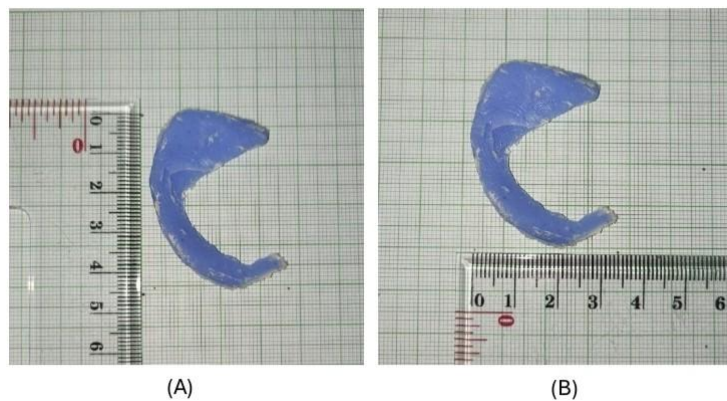
Gambar 4-40 Pengukuran PL (A) Panjang, (B) Lebar, (C) Data volume, (D) Kordinat pengukuran

4.4.1.3 Pengukuran Produk Model 3D

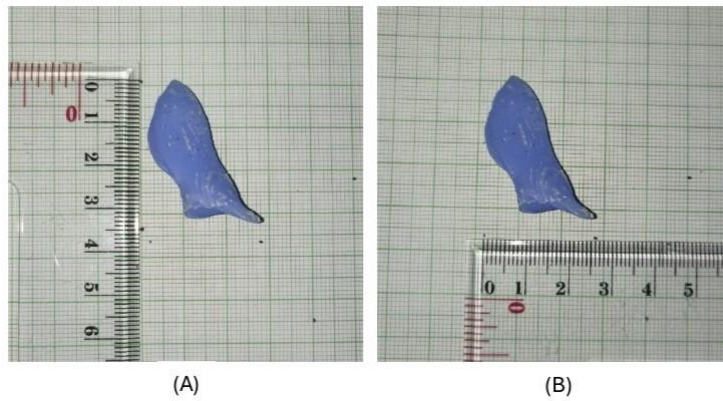
Pengukuran produk model 3D bertujuan untuk mengidentifikasi penyusutan pada hasil produk yang telah dibuat. Pengukuran pada hasil produk menggunakan metode pengukuran langsung, dengan menentukan panjang dan lebar dari hasil produk silikon yang telah dicetak menggunakan penggaris. Berikut adalah gambar dari pengukuran hasil produk model 3D.



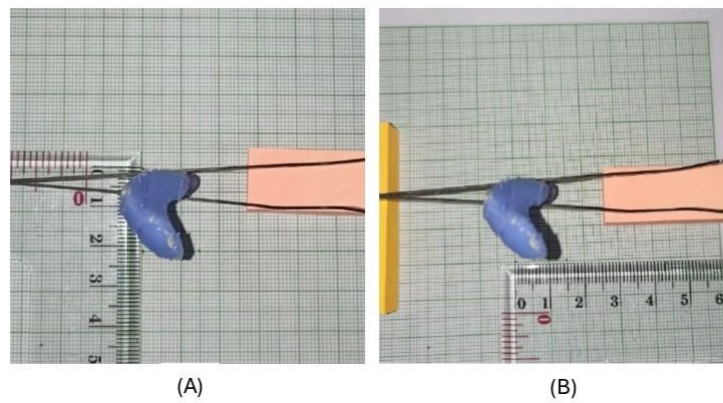
Gambar 4-41 Pengukuran hasil model 3D lateral meniskus (A) panjang, (B) lebar



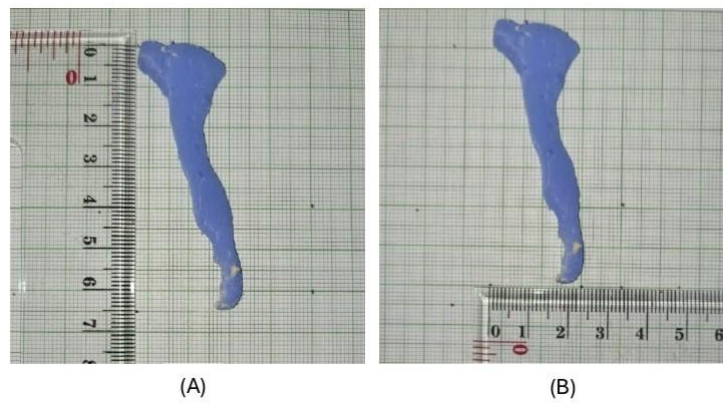
Gambar 4-42 Pengukuran hasil model 3D medial meniskus (A) panjang, (B) lebar



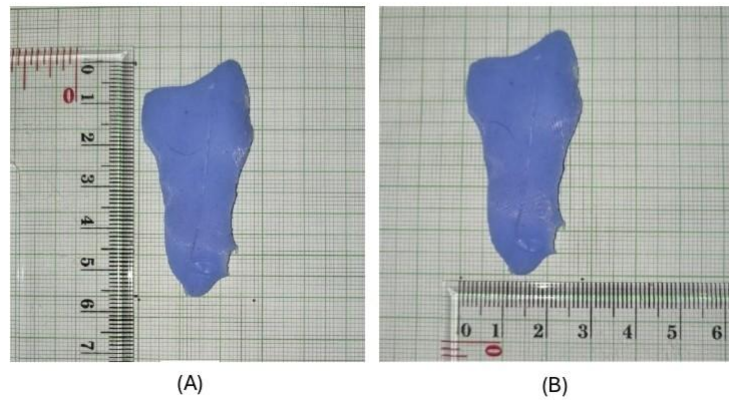
Gambar 4-43 Pengukuran hasil model 3D ACL (A) panjang, (B) lebar



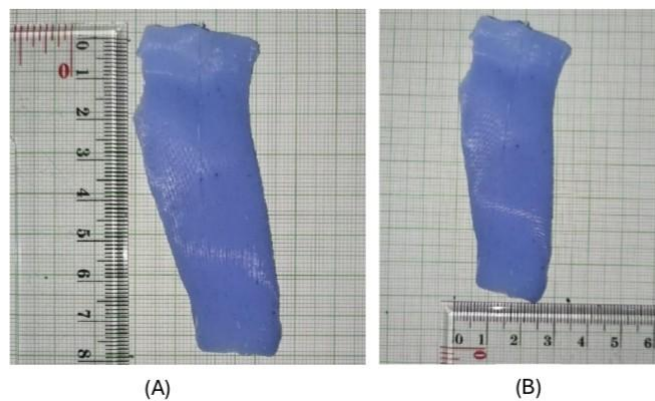
Gambar 4-44 Pengukuran hasil model 3D PCL (A) panjang, (B) lebar



Gambar 4-45 Pengukuran hasil model 3D FCL (A) panjang, (B) lebar



Gambar 4-46 Pengukuran hasil model 3D TCL (A) panjang, (B) lebar



Gambar 4-47 Pengukuran hasil model 3D PL (A) panjang, (B) lebar

4.4.2 Mudah Untuk Lepas Pasang

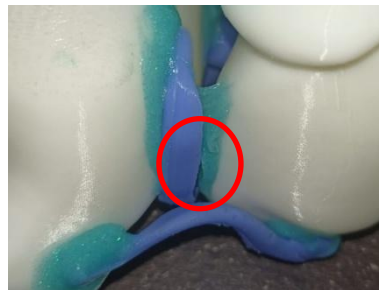
Pada saat menggunakan model 3D sebagai alat pembelajaran, pengguna dapat mengerti bagaimana cara tindakan dari *total knee replacement* dan dapat lebih efisien pada saat melakukan pemasangan. Bahan yang digunakan pada model 3D mudah untuk ditemukan serta murah, hal tersebut dapat memudahkan pengguna pada saat melakukan pemasangan kembali model 3D. Pada proses pembuatan model 3D terdapat 2 bahan material yang digunakan, yaitu *slime* dan *sealant*, hal ini bertujuan untuk mengetahui bahan mana yang dapat sesuai dengan kriteria desain.

4.4.2.1 Pemasangan Bahan Material *Slime*



Gambar 4-48 Pemasangan menggunakan *slime*.

Kelebihan dari bahan *slime* adalah mudah dibuat, murah dan mudah didapatkan, akan tetapi bahan *slime* memiliki kekurangan yaitu bahan tersebut memiliki kekentalan yang rendah apabila campuran tidak pas, yang menyebabkan model 3D mudah bergeser. Selain itu bahan *slime* tidak dapat rekat dengan model 3D yang mengakibatkan pengguna tidak dapat merasakan memotong yang sesuai dengan anatomi aslinya. Kekurangan dari *slime* dapat dilihat pada gambar 4-47 dan 4-48.



Gambar 4-49 Kekurangan bahan material *slime*.



Gambar 4-50 Kekurangan bahan material *slime*.

4.4.2.2 Pemasangan Menggunakan Bahan Material *Sealant*

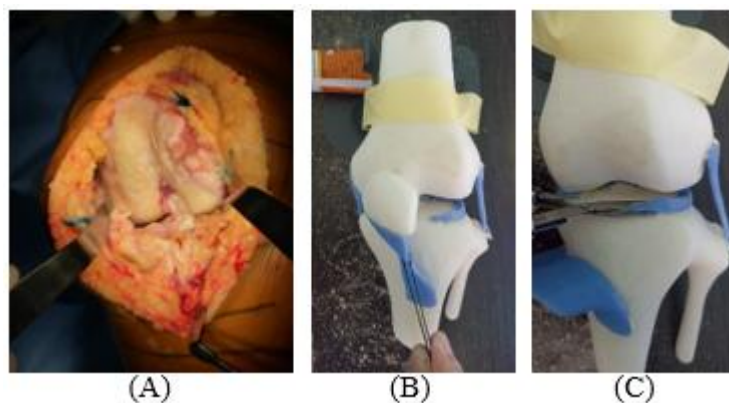
Pemasangan menggunakan bahan material *sealant* memiliki kelebihan dan kekurangan, kelebihan dari bahan material *sealant* adalah, mudah didapatkan, mudah digunakan untuk pemula, daya rekat cukup kuat. Adapun kekurangan dari *sealant* adalah, bahan material yang cukup mahal, tidak menempel sempurna apabila model 3D di gerakan secara terus menerus dan waktu pengeringan yang memakan waktu cukup lama. Pada waktu proses pembuatan model 3D, proses pengeringan *sealant* membutuhkan waktu ± 4 jam.



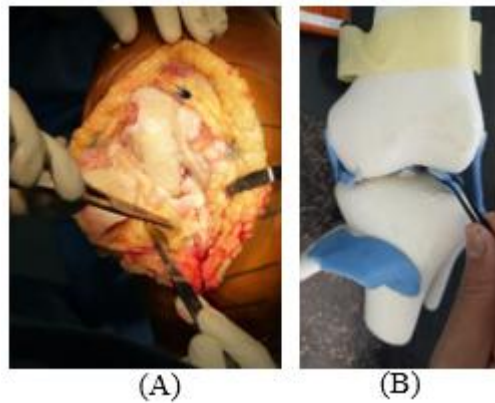
Gambar 4-51 Kegagalan pada perekat *sealant*.

4.4.3 Penggunaan Model 3D Sebagai Alat Peraga

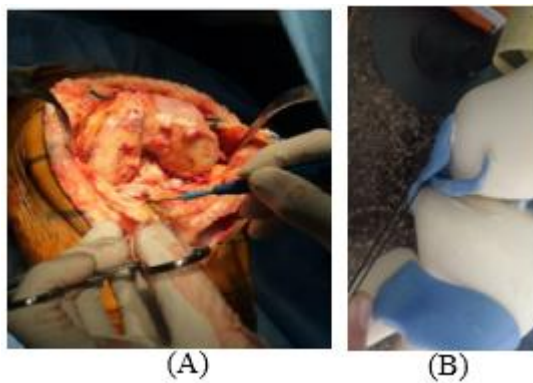
Pada kriteria desain yang telah ditentukan, model 3D dapat mewakili setiap alur dari tindakan *total knee replacement*. Berikut adalah gambar alur dari penggunaan model 3D sebagai alat peraga *total knee replacement*.



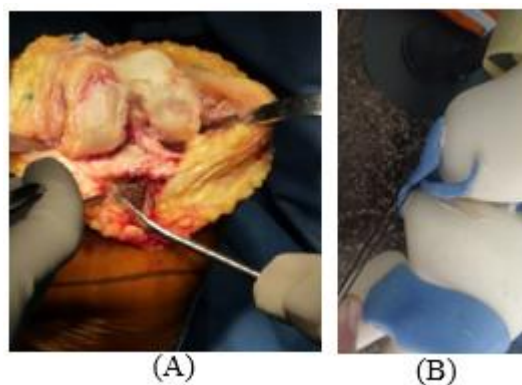
Gambar 4-52 (A) Melihat sendi bagian dalam dan pita lateral meniskus dipotong, (B) Melihat sendi bagian dalam menggunakan model 3D, (C) Pemotongan pita lateral meniskus menggunakan model 3D.



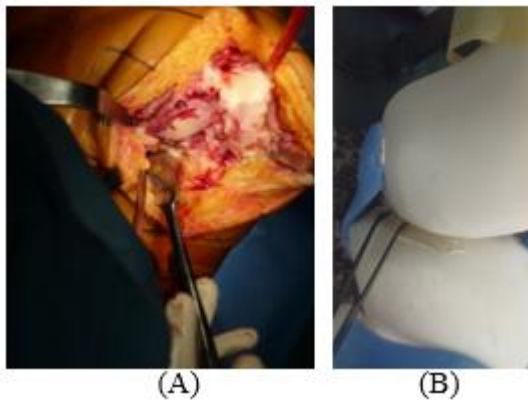
Gambar 4-53 (A) Melepas medial meniskus dan lateral meniskus yang tersisa, (B) Melepas medial meniskus dan lateral meniskus yang tersisa menggunakan model 3D.



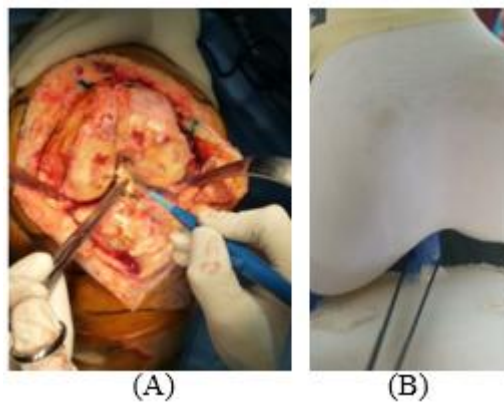
Gambar 4-54 (A) Pelepasan jaringan lunak medial meniskus dengan mengangkat MCL, (B) Pelepasan jaringan lunak medial meniskus dengan mengangkat MCL menggunakan model 3D.



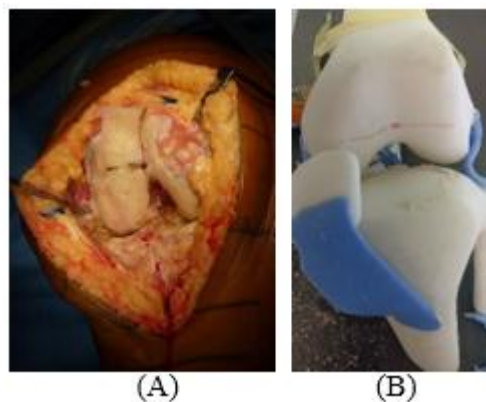
Gambar 4-55 (A) Sendi lutut ditekuk dan tulang anterior kedua meniskus dipotong, (B) Sendi lutut ditekuk dan tulang anterior kedua meniskus dipotong menggunakan model 3D.



Gambar 4-56 (A) Pembersihan sisa meniskus, (B) Pembersihan sisa meniskus menggunakan model 3D.



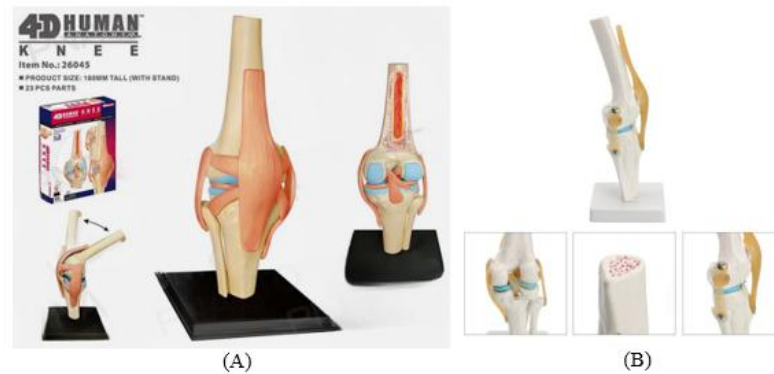
Gambar 4-57 (A) Pengangkatan ACL dan PCL agar lutut dapat stabil, (B) Pengangkatan ACL dan PCL agar lutut dapat stabil menggunakan model 3D.



Gambar 4-58 (A) Pembuatan garis *whiteside* untuk menentukan lubang implan TKR, (B) Pembuatan garis *whiteside* untuk menentukan lubang implan TKR menggunakan model 3D.

4.4.4 Perbandingan model 3D dengan model 3D lain

Perbandingan ini bertujuan untuk mendefinisikan kemajuan dari model 3D yang dibuat dengan model 3D yang diproduksi masal. pada penelitian ini model 3D dibuat dengan menyesuaikan anatomi aslinya, sehingga pengguna dapat melihat anatomi sendi lutut aslinya. Kemajuan ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4-59 (A) Model 3D yang dipasarkan situs jual beli online luar negeri, (B) Model 3D yang dipasarkan situs jual beli online dalam negeri.

Pada model 3D yang sudah diproduksi masal terdapat kesamaan pada model 3D yang telah dibuat, terdapat 5 ligamen dan 2 meniskus, walaupun ada anatomi yang tidak dibuat pada saat pembuatan model 3D. Model 3D yang telah dibuat dapat menjadi opsi lain sebagai media belajar, karena telah mewakili sebagian besar anatomi yang terdapat pada sendi lutut.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Saddig Jastaniah dan Ohud Alganmi yang dilakukan di King Abdul Abdulaziz University, model 3D yang dibuat hanya tulang saja, akan tetapi bahan yang digunakan pada model 3D tulang menggunakan bahan gypsum. Hal itu bertujuan hanya untuk menguji kepadatan model 3D dengan tulang aslinya (Saddig Jastaniah, 2016). Berikut adalah gambar perbandingan model 3D yang dibuat pada penelitian ini dan pada penelitian yang dilakukan oleh Saddig Jastaniah dan Ohud Algami.



Gambar 4-60 (A) Model 3D yang dibuat pada penelitian ini, (B) Model 3D yang dibuat pada penelitian lain

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah penelitian dilakukan ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil, berikut adalah kesimpulan yang dapat diambil:

1. Model 3D yang dibuat telah sesuai dengan bentuk anatomi aslinya, selain itu model 3D yang dibuat telah sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan, sehingga model 3D dapat digunakan sebagai penambahan dari model 3D sebelumnya.
2. Model 3D yang dibuat telah berhasil dilepas pasang, hal ini bertujuan agar pengguna dari model 3D dapat menggunakan model 3D dengan mudah. Dengan melihat alur perakitan dan pelepasan yang telah dibuat.
3. Model 3D berhasil mewakili setiap alur dari tindakan *total knee replacement*, mulai dari pemotongan pita meniskus sampai pengaturan pembuatan lubang untuk implan.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

1. Dapat menambahkan anatomi yang kurang pada penelitian ini, agar dapat menjelaskan semua alur tindakan *total knee replacement*.
2. Menganalisis hasil penelitian ini agar dapat menjadi media pembelajaran untuk tindakan *total knee replacement*.
3. Merancang kembali pemasangan dan pelepasan pada anatomi sendi lutut, agar waktu yang dibutuhkan untuk lepas pasang dapat menjadi singkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Aaron Schwartz, M. J. (2015). Sports Health: A Multidisciplinary Approach OnlineFirs. *Patellar Tendinopathy*, 20.
- Andre J Carr, O. R. (2012). *Knee replacement*.
- Annapaola Parrilli, A. G. (2023). 3D visualization of the human anterior cruciate ligament combining. *Surgical and Radiologic Anatomy*.
- CHAD ZOOKER, M. R. (2013). Clinical Measurement of the Patellar Tendon: Accuracy and Relationship to Actual Tendon Dimensions. *The American Journal of Orthopedics*, SS-73.
- Curtis, A. C. (2004). Silicone Biomaterials: History and Chemistry & Medical Applications of Silicones. Dalam *Biomaterials Science*, 2 Edition (hal. 80-86). Elsevler.Inc.
- Dharmawan, M. F. (2023). *PEMBUATAN ALAT PERAGA DAN ANALISIS ELEMEN HINGGA TOTAL KNEE REPLACEMENT UNTUK PENDERITA POST-TRAUMATIC ARTHRITIS BERDASARKAN REKONSTRUKSI CT-SCAN TULANG LUTUT*.
- Efstathopoulos, K. M. (2012). The anatomy of the ACL and its importance in ACL.
- Fang Liu, B. Y. (2010). *Morphology of the medial collateral ligament of the knee*.
- Frank, C. (2004). *Ligament structure, physiology and function*.
- Frank, S. L. (2018). Posterior Cruciate Ligament: Anatomy and Biomechanics.
- K.D. Allen, L. T. (2022). Osteoarthritis. *Epidemiology of osteoarthritis*.
- Karl F. Bowman Jr, D. (2009). Anatomy and Biomechanics of the Posterior Cruciate Ligament and Other Ligaments of the Knee.
- KEITH SINUSAS, M. (2012). *Osteoarthritis: Diagnosis and Treatment*.
- Kyriacos A. Athanasiou, J. S.-A. (2009). *Engineering the Knee Meniscus*. Morgan & Claypool Publishers.
- Liddle & Pandit, H. (2013). *Knee Replacement for Osteoarthritis*.
- Muhammad Khafidh, A. F. (2020). *Analisis Sifat Mekanik Karet Silikon sebagai Kandidat Prepusium Sintetik pada Alat Peraga Khitan*.

- Mulyono Notosiswoyo, S. S. (2004). Media Litbang Kesehatan . *PEMANFAATAN MAGNETIC RESONANCE IMAGING (MRI) SEBAGAI SARANA DIAGNOSA PASIEN*.
- Murtani, R. (2018). *NANOKOMPOSIT KARET ALAM/SILIKON SEBAGAI OTOT SINTETIK DENGAN SIFAT MEKANIK SEPerti OTOT MANUSIA*.
- Ningsih, D. H. (2005). Computer Aided Design / Computer Aided Manufactur [CAD/CAM]. *Jurnal Teknologi Informasi DINAMIK*, X.
- Nining Tri Maryani, N. P. (2021). ANALISIS STRATEGI PEMASARAN PADA PELAYANAN OPERASI. *Jurnal ARSI*, 7.
- Novalianita, D. A. (2021). *STUDI PEMBUATAN TOTAL KNEE REPLACEMENT (TKR) MENGGUNAKAN PROSES MACHINING*.
- R Gaillard, d. (2015). Anatomy, Physiology, and Biomechanics of the Native Knee. Dalam S. O. E. Carlos Rodríguez-Merchán, *Total Knee Arthroplasty* (hal. 6-7). Switzerland: Springer.
- R. Putz, R. P. (2006). *Sobotta Atlas of Human Anatomy*. Munich: ELSEVIER URBAN & FISCHER.
- Saddig Jastaniah, O. A. (2016). Design of a Model of Knee Joint for Educational Purposes. *Journal of Education and Practice* .
- Satriyo Adhi Nugroho¹, Y. U. (2021). PEMBUATAN MESIN INJECTION MOLDING UNTUK MEMBUAT INSOLE SEPATU DARI MATERIAL KOMPOSIT SILICON RUBBER. *Jurnal Teknik Mesin*, 9.
- Shah, S. C. (2013). *A Review on Silicone Rubber*.
- TODD M. CHAPPELL, P. N. (2014). Morphometry of the Fibular Collateral Ligament. *Anatomic Study With Comprehensive Review of the Literature*.
- V. B. Duthon, C. B. (2006). Anatomy of the anterior cruciate ligament.
- Vasylyk V., D. P. (2021). *Technological Methods of Workpieces Manufacturing Metal Casting*. Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University.
- Vladimir Petrik, F. V. (2006). *GODFREY HOUNSFIELD AND THE DAWN OF COMPUTED TOMOGRAPHY*, 58.
- Wijk, A. v. (2015). *3D printing with biomaterials: Towards a sustainable and circular economy*. Amsterdam: Hogeschool van Amsterdam.
- Yaras, R. J. (2022). *Lateral Collateral Ligament Knee Injury*. United Kingdom.

