

## Fabrikasi Model Anatomi 3-D menggunakan 3-D *Printing* untuk Simulasi Proses Operasi *Total Knee Replacement* (TKR) berdasarkan Rekonstruksi Pemindaian CT/MRI sebagai Alat Edukasi dan Pelatihan

Irfan Aditya Dharma\*, Muhammad Fernanda Darmawan

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia  
Jalan Kaliurang km 14.5, Umbulmartani, Ngemplak, Sleman, D.I.Yogyakarta 55584, Indonesia

\*E-mail: irfan.adharma@uii.ac.id

Diajukan: 23-07-2023; Diterima: 10-08-2023; Diterbitkan: 21-08-2023

### Abstrak

Saat ini, teknologi 3-D *printing* atau *additive manufacturing* telah banyak digunakan untuk memproduksi model 3-D anatomi bagian tubuh manusia berdasarkan rekonstruksi pemindaian CT/MRI. Model 3-D anatomi hasil 3-D *print* memiliki banyak aplikasi seperti alat edukasi, implant spesifik, konsep perencanaan operasi (*preoperative planning*), dll. Sejauh ini, belum banyak penelitian yang secara spesifik fokus pada pengembangan alat edukasi untuk simulasi proses operasi *Total Knee Replacement* (TKR). Penelitian ini bertujuan untuk merekonstruksi tulang lutut, memodelkan sendi lutut prostetik TKR, dan memfabrikasi model anatomi 3-D untuk peraga simulasi operasi TKR menggunakan 3D *print* tipe *fused deposition modeling* (FDM). Hasil model anatomi 3-D dengan menggunakan 3D *print* dapat mendemonstrasikan simulasi operasi TKR dengan baik sesuai prosedur operasi medis dengan limitasi proses operasi hanya pada pemotongan tulang dan pemasangan prostetik sendi lutut.

**Kata kunci:** *Total Knee Replacement; Post-Traumatic Arthritis; CT/MRI; 3D-print*

### Abstract

Currently, 3-D *printing* or *additive manufacturing* technology has been widely used to fabricate anatomical 3-D models of human body parts based on CT/MRI Scan reconstructions. Anatomical 3-D models fabricated by 3-D *print* have many applications, such as educational tools, specific implants, *preoperative planning*, etc. To date, there have not been many studies that specifically focus on the development of educational tools to simulate *Total Knee Replacement* (TKR) surgery. This study aims to reconstruct the knee bones, design the 3-D model of TKR prosthetic, and fabricate a 3-D anatomical model for the TKR surgery simulation model using *fused deposition modeling* (FDM) 3-D *print*. The 3-D anatomical model that fabricated using a 3D *print* can demonstrate a simulation of the TKR surgery very well according to the medical surgical procedure with the limitation of the surgical process is only to simulate the cutting process of the bone and installation process of the knee joint prosthetic.

**Keywords:** *Total Knee Replacement; Post-Traumatic Arthritis; CT/MRI; 3D-print*

## 1. Pendahuluan

Anatomi tubuh menjadi salah satu subjek pembelajaran di bidang kedokteran yang cukup sulit untuk dipelajari [1]. Pentingnya anatomi juga meluas ke spesialisasi bedah karena relevansi langsung dari ilmu dasar kedokteran dengan praktik klinis [2,3]. Dengan meningkatnya kebutuhan akan metode bedah yang lebih modern, lebih cepat, dan lebih aman, tentunya pengembangan model anatomi yang lebih relevan dengan praktik bedah saat ini dibutuhkan untuk proses edukasi di sekolah kedokteran [4]. Hal ini bertujuan agar mahasiswa kedokteran dapat mengembangkan keahlian mereka dalam spesialisasi bedah sejak dini dan mampu beradaptasi dengan teknologi bedah terkini. Saat ini, penerapan teknologi 3-D *printing* (*Additive Manufacturing*) dan *Computer Aided Design* (CAD) berbasis citra medis CT-Scan atau MRI dengan resolusi tinggi untuk tujuan fabrikasi model anatomi 3-D sebagai alat edukasi atau pelatihan telah berkembang pesat. Selain untuk tujuan pendidikan, teknologi 3-D *printing* dan CAD juga digunakan untuk tujuan klinis seperti pembuatan implan prostetik spesifik, konsep perencanaan operasi (*preoperative planning*), dan perangkat pemandu operasi [5–7]. Teknologi 3-D *printing* memiliki keunggulan dari tingkat kepresisian, kemampuan membentuk struktur kompleks, kemampuan untuk menyesuaikan dengan bentuk anatomi pasien, dan penggunaan material berkualitas tinggi [8,9].

Dalam perkembangan alat edukasi anatomi, beberapa studi telah menerapkan teknologi 3-D *printing* dan CAD *modeling* untuk fabrikasi berbagai macam model anatomi 3-D organ dan jaringan manusia. Model 3-D tulang

lumbosakrum telah berhasil di fabrikasi dengan 3-D print berbasis data CT-Scan menggunakan material gipsium yang mana kandungan kalsiumnya tinggi sehingga memungkinkan mencapai karakteristik yang mirip dengan tulang asli [10]. Model 3-D tersebut mampu menjadi alat pelatihan untuk penempatan jarum pada prosedur diagnostik dan terapeutik. Studi lain juga telah mengembangkan model 3-D anatomi dari pernafasan manusia dengan material bening seperti karet yang mampu meniru sifat mekanik jaringan pernafasan manusia [11]. Beberapa praktisi telah mencoba model 3-D pernafasan tersebut. Berdasarkan survei dinyatakan bahwa kemampuan model 3-D tersebut mirip dengan model hewan. Selain itu, banyak sekali produk 3-D print model anatomi organ maupun jaringan yang lain seperti tulang kepala [12], ginjal [13], rongga dada [14], jantung [15], dan masih banyak lagi.

Namun, untuk produk model 3-D anatomi sendi lutut yang digunakan sebagai sarana edukasi masih jarang ditemui. Secara umum, model 3-D anatomi sendi lutut dengan metode 3-D print banyak digunakan sebagai simulator untuk menentukan nilai tribologi dari prostetik sendi lutut [16], mempelajari pergerakan dari sendi lutut [17,18], dan untuk mempelajari komplikasi pasca-operasi [19]. Se jauh pengetahuan penulis, sulit sekali ditemui studi yang mengembangkan model 3-D anatomi yang digunakan sebagai edukasi proses operasi pemasangan prostesis pada *Total Knee Replacement* (TKR). Untuk itu, penelitian ini bertujuan untuk menginisiasi model 3-D anatomi yang dapat digunakan sebagai pembelajaran untuk para pelajar kedokteran maupun praktisi dalam memahami proses operasi TKR.

## 2. Material dan Metode

### 2.1. Material

Pada penelitian ini, material yang digunakan untuk proses fabrikasi model 3-D dan prostesis tulang lutut adalah polylactide acid (PLA). Sifat mekanik material PLA dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Sifat mekanik material PLA [20]

No.	Sifat Mekanik	Nilai
1	Densitas	1.23 g/cm <sup>3</sup>
2	Kekuatan tarik	63 MPa
3	Kekuatan lentur	74 MPa
4	Temperatur leleh	190 - 230 °C

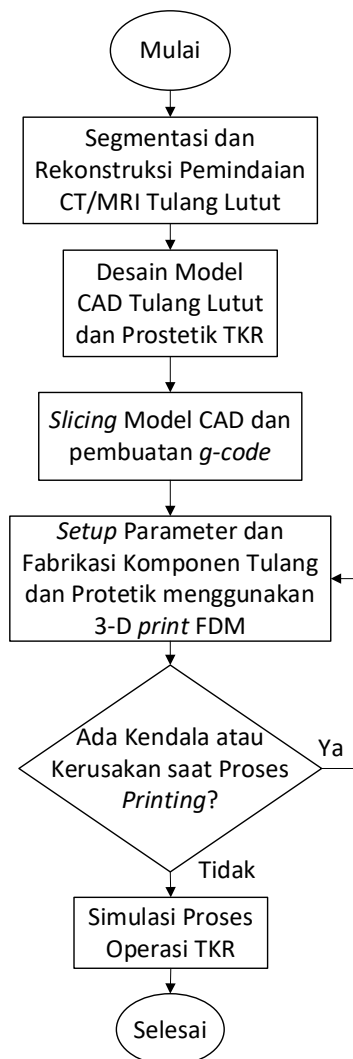
### 2.2. Metode

Secara garis besar, metode penelitian ini terdiri dari 3 langkah yaitu, proses segmentasi dan rekonstruksi, CAD *modeling*, dan proses fabrikasi atau manufaktur. CAD *modeling* merupakan proses desain proteseik lutut untuk *Total Knee Replacement* (TKR). Gambar 1 menunjukkan alur atau metode penelitian ini.

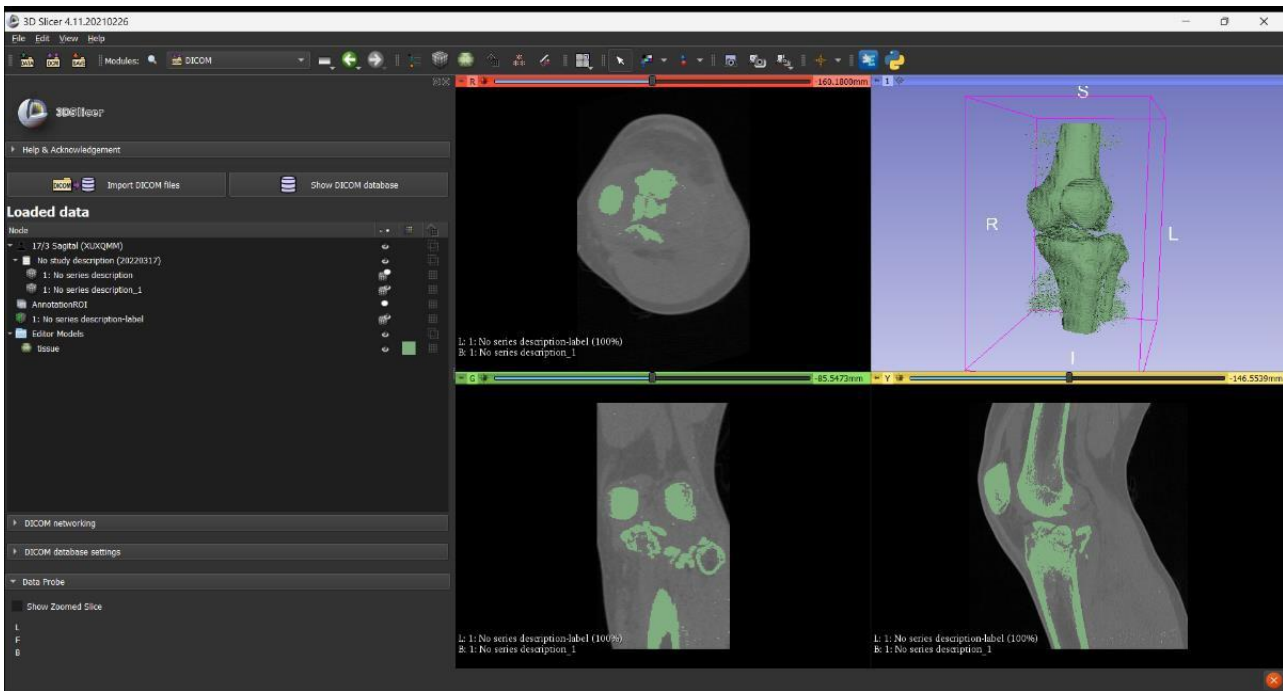
#### 2.2.1. Segmentasi dan Rekonstruksi Tulang Lutut

Proses segmentasi dan rekonstruksi tulang lutut berdasarkan pemindaian medis CT/MRI dilakukan menggunakan perangkat lunak *open-source* 3-D Slicer. Dengan adanya limitasi dimana hasil pemindaian CT maupun MRI dari seorang pasien maupun manusia normal harus melalui serangkaian proses etika medis maka pemindaian CT/MRI dalam penelitian ini didapatkan melalui situs terbuka Embodi3D. Situs ini menyediakan berbagai hasil pemindaian CT/MRI yang dapat diunduh secara terbuka. Pemindaian CT/MRI dalam situs ini secara legal dapat dipertanggungjawabkan dalam hal

penerapan di teknologi 3-D *print* [21]. Meskipun didapatkan dari situs terbuka, proses segmentasi dan rekonstruksi dilakukan menyesuaikan bentuk dan ukuran dari pemindaian CT/MRI, dimana dalam kasus nyata bentuk dan ukuran tiap manusia berbeda. Dalam penelitian ini, desain CAD tulang lutut menyesuaikan bentuk dan ukuran dari pemindaian CT/MRI yang didapatkan. Namun, karena desain CAD tulang lutut hanya berbasis satu sampel CT/MRI maka pengaruh bentuk dan ukuran dari masing-masing manusia tidak dibahas. Penelitian berfokus pada desain prostetik dan pembuatan model 3-D untuk peraga simulasi proses operasi TKR. Pemindaian CT/MRI bagian lutut dalam ekstensi DICOM diunduh melalui situs Embodi3D [22]. Selanjutnya, ekstensi DICOM dimasukkan ke dalam perangkat lunak 3-D *Slicer*. Tampilan pemindaian CT/MRI lutut di 3-D *Slicer* ditunjukkan pada Gambar 2. Untuk mendapatkan bagian anatomi dari lutut, maka dilakukan proses segmentasi. Proses segmentasi adalah proses membagi struktur anatomi lutut dengan cara mendefinisikan *threshold* berdasarkan kontras, warna, kecerahan, dll. Masing-masing struktur anatomi lutut seperti tulang femur, tibia, dan ligament memiliki nilai kontras, warna, dan kecerahan yang berbeda-beda. Proses segmentasi dilakukan untuk masing-masing irisan CT/MRI. Kemudian dari masing-masing irisan gambar CT/MRI dilakukan *volume rendering* sehingga membentuk model 3-D dari lutut.



**Gambar 1.** Alur Penelitian



Gambar 2. Tampilan pemindaian CT/MRI lutut di 3-D Slicer.

Hasil rekonstruksi dan segmentasi model 3-D tulang lutut dari 3-Slicer masih terdapat banyak *noise* karena adanya tumpang tindih *threshold* dari masing-masing struktur anatomi. Maka langkah selanjutnya adalah melakukan penghalusan model 3-D tulang lutut menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design (CAD) Autodesk Meshmixer*. Hal ini dilakukan agar mendapatkan model 3D tulang lutut yang sesuai dengan bentuk asli tulang lutut berdasarkan pemindaian CT/MRI yang didapatkan.

Hasil dari proses penghalusan model 3-D lutut pada perangkat lunak Autodesk *Meshmixer* memiliki format CAD \*.stl. Agar kontur model 3-D lutut menjadi lebih halus dan juga mempermudah proses desain prostetik lutut untuk Total Knee Replacement (TKR) maka bentuk \*.stl diubah menjadi *solid body* menggunakan perangkat lunak *SOLIDWORKS 2020* dengan *tool Scanto3D*.

### 2.2.2. Desain 3-D Prostetik Tulang Lutut untuk Total Knee Replacement (TKR)

Langkah berikutnya adalah membuat desain prostetik sendi lutut untuk TKR berdasarkan model 3-D tulang lutut yang sudah didapatkan sesuai dengan pemindaian CT/MRI. Langkah awal yaitu melakukan pemotongan bagian bawah tulang femur dan bagian atas tulang tibia sesuai dengan prosedur medis pada operasi TKR [23]. Teknik operasi TKR sangat kompleks dan melibatkan banyak langkah seperti pengkondisian posisi kaki pasien, pemotongan kulit dan otot, pemotongan tempurung lutut atau patella, pemotongan ligamen, dll [24]. Dalam penelitian ini, prosedur operasi yang dipergakan oleh model 3-D hanya difokuskan pada operasi bagian tulang lutut dan pemasangan prostetik lutut. Desain prostetik tulang lutut menyesuaikan dengan hasil potongan pada tulang femur dan tibia. Model prostetik lutut yang didesain adalah jenis *Posterior-Stabilized (PS)*. Penyakit *Post-Traumatic Arthritis* menyebabkan disabilitas fungsi yang banyak terjadi pada pemuda yang terbilang aktif. Model ini memiliki keunggulan yaitu sebagai pengganti peran PCL (*Posterior Cruciate Ligament*) atau bisa dibilang ligamen terkuat pada kaki. Model ini juga memiliki keunggulan seperti prosedur operasi yang tidak memakan banyak tahapan, memiliki komponen lebih stabil, dan menambah rentang gerak

sendi lutut [25]. Untuk bagian *tibial insert* menggunakan tebal 9 mm karena ukuran tersebut sudah jadi referensi atau ukuran umum untuk prostetik lutut prostetik [26].

### 2.2.3. Fabrikasi Model 3-D Prostetik Lutut untuk *Total Knee Replacement* (TKR)

Fabrikasi model 3-D prostetik lutut untuk TKR difokuskan pada hasil yang maksimal secara visual dan fisik, dalam artian model 3-D dapat digunakan untuk meragakan proses operasi TKR dan pemasangan sendi lutut prostetik. Model 3-D prostetik lutut TKR yang telah didesain melalui *CAD modeling* kemudian difabrikasi menggunakan 3D-print tipe *fused deposition modeling* (FDM). Material filamen yang digunakan adalah *polylactic acid* (PLA). Sebelum melakukan pencetakan, setiap komponen anatomi yang akan di cetak diubah formatnya menjadi kembali menjadi \*.stl menggunakan *SOLIDWORKS 2020*. Selanjutnya, model 3-D prostetik lutut TKR dalam format \*.stl di masukkan ke perangkat lunak *Ultimaker Cura*. Pada *Ultimaker Cura*, dilakukan pembuatan *slice file* atau pembuatan *G-Code* untuk dimasukkan ke mesin 3D print. Adapun parameter 3D print yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Parameter 3-D print

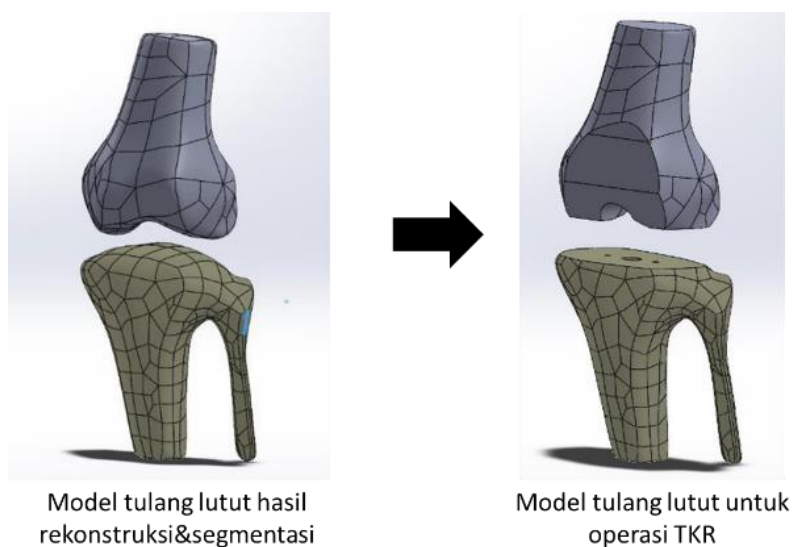
<i>Quality</i>	0,2 mm
<i>Infill Density - Pattern</i>	20% - lines
<i>Speed</i>	50 m/s
<i>Support</i>	<i>Everywhere – zig zag</i>
<i>Build Plate</i>	<i>Brim</i>

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Hasil

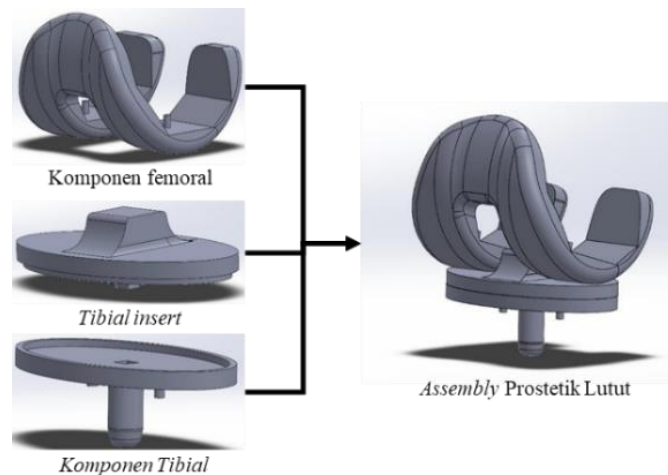
#### 3.1.1. Hasil Desain Prostetik Tulang Lutut

Dalam proses desain prostetik tulang lutut, diperlukan penyesuaian desain hasil rekonstruksi dan segmentasi tulang lutut terlebih dahulu. Bagian tulang femur dan tibia akan dipotong sedemikian rupa sesuai dengan prosedur operasi Total Knee Replacement (TKR) untuk proses pemasangan prostetik lutut seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.



**Gambar 3.** Penyesuaian desain model 3-D tulang lutut

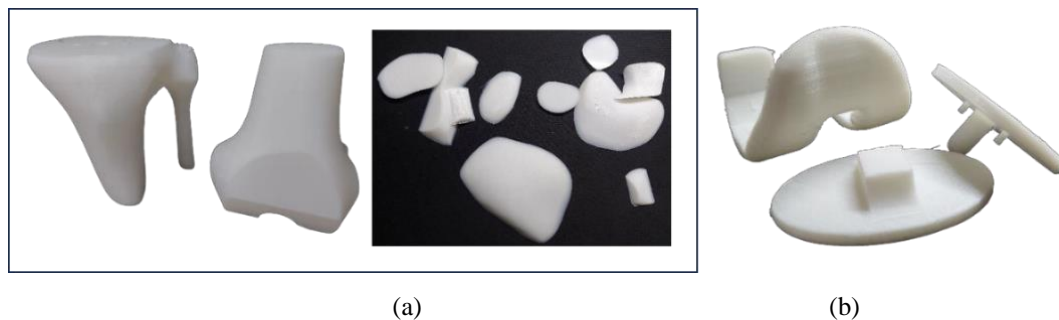
Selanjutnya prostetik lutut jenis *Posterior-stabilized* akan didesain menyesuaikan dengan desain tulang berdasarkan pemindaian CT/MRI yang telah dipotong melalui prosedur operasi TKR. Gambar 4 adalah hasil desain sendi lutut prostetik yang dibuat berdasarkan prosedur pemotongan tulang lutut untuk penderita *Post-Traumatic Arthritis* (PTA). Prostetik secara garis besar terdiri dari 3 komponen yaitu komponen prostetik untuk bagian femoral, tibial *insert*, dan komponen prostetik untuk bagian tibial. Komponen femoral bertujuan untuk menggantikan fungsi dari articular cartilage dimana tulang femur dapat bergerak bebas. Komponen tibial berfungsi untuk menggantikan fungsi dari meniscus sedangkan tibial *insert* berfungsi sebagai koneksi antara komponen femoral dan tibial.



**Gambar 4.** Hasil desain prostetik lutut jenis *Posterior-Stabilized* (PS)

### 3.1.2. Hasil Fabrikasi Komponen Model 3-D Proses Operasi Total Knee Replacement (TKR)

Hasil fabrikasi komponen model 3-D proses operasi Total Knee Replacement (TKR) menggunakan 3D print FDM dengan parameter *printing* sesuai Tabel 2 dapat dilihat pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Hasil fabrikasi (a) komponen model 3-D tulang lutut untuk operasi TKR; (b) prostetik tulang lutut

### 3.1.3. Simulasi Proses Operasi Total Knee Replacement (TKR) menggunakan Model 3-D *Print*

Simulasi proses operasi TKR menggunakan model 3-D print terdiri dari 8 langkah. Langkah-langkah tersebut mengacu kepada standar operasi yang umum digunakan untuk memasang prostetik lutut. Simulasi operasi ini hanya berfokus pada sisi mekanik perlakuan tulang (pemotongan dan pengeboran).

- 1) Proses pengeboran pada tulang femur.

Proses ini memotong bagian tengah pada tulang femur pada letak dari PCL dengan cara mengebor. Gambar 6

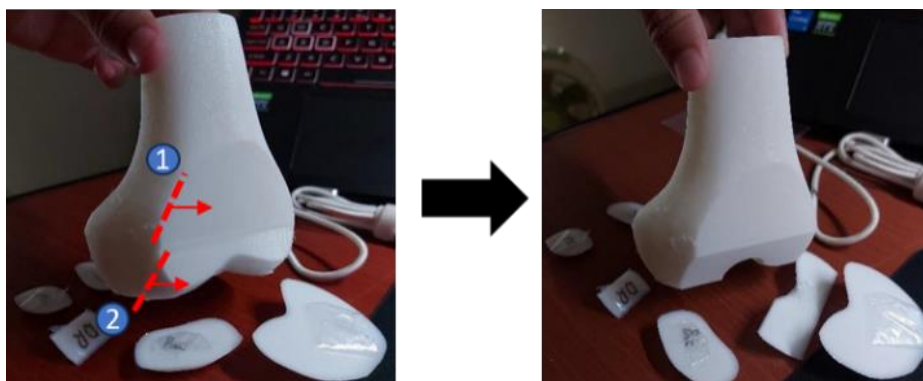
menunjukkan proses pengeboran pada tulang femur. Garis merah putus-putus pada gambar sebelah kiri menunjukkan letak tulang femur yang harus dilakukan pengeboran sedangkan garis putus-putus kuning pada gambar kanan menunjukkan area tulang yang sudah dilakukan pengeboran.



**Gambar 6.** Proses pengeboran pada tulang femur; (kiri) sebelum dan (kanan) sesudah pengeboran.

### 2) Pemotongan tulang femur.

Pemotongan bagian femur dilakukan agar komponen femoral pada prostetik lutut dapat terpasang. Dengan adanya desain tulang hasil rekonstruksi CT/MRI maka akan mempermudah tenaga medis untuk melakukan *templating* prostetik lutut. Ukuran pemotongan bagian femur dapat disesuaikan dengan kondisi tulang pasien sehingga diharapkan pemasangan komponen femur prostetik lutut dapat terpasang secara akurat. Area pemotongan tulang femur ditunjukkan oleh Gambar 7. Garis merah putus-putus dengan nomor 1 dan nomor 2 pada gambar sebelah kiri adalah area tulang femur yang akan dipotong. Garis panah merah menunjukkan arah pemotongan. Gambar sebelah kanan adalah tulang femur yang sudah terpotong.

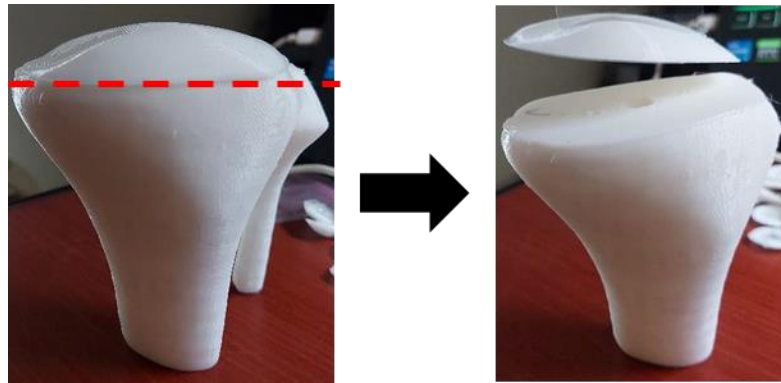


**Gambar 7.** Pemotongan tulang femur untuk pemasangan komponen femur prostetik lutut; (kiri) sebelum dan (kanan) sesudah pemotongan.

### 3) Pemotongan Bagian Tibia.

Proses ini memotong bagian atas tibia seperti ditunjukkan oleh Gambar 8. Pemotongan ini bertujuan agar komponen tibial prostetik dapat terpasang pada tulang tibia untuk menggantikan meniscus. Garis merah putus-putus pada gambar sebelah kiri menunjukkan area pemotongan.

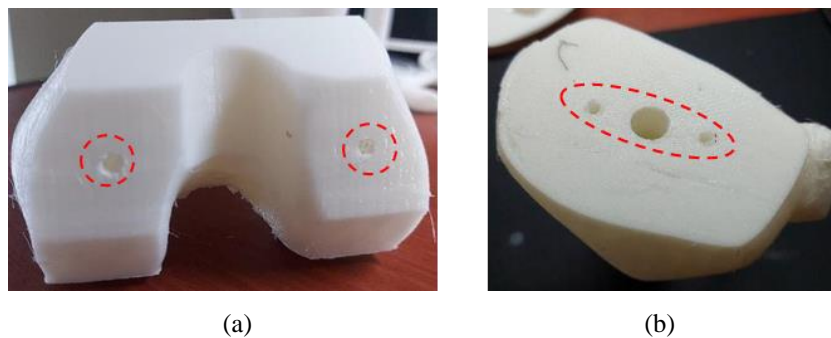




**Gambar 8.** Pemotongan tulang tibia; (kiri) sebelum dan (kanan) sesudah pemotongan.

#### 4) Pembuatan Lubang pada Tulang Femur dan Tibia

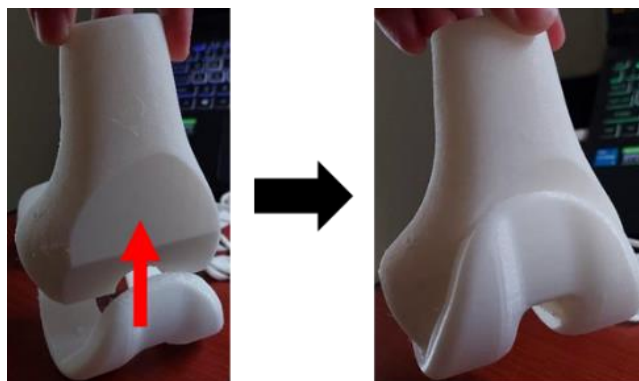
Garis merah putus-putus pada Gambar 9 (a) dan (b) masing-masing menunjukkan area pengeboran untuk membuat lubang pada tulang femur dan tibia. Lubang-lubang tersebut bertujuan agar pin pada komponen femoral dan tibial dapat terpasang kuat pada tulang femur dan tibia.



**Gambar 9.** Pembuatan lubang pada (a) tulang femur; (b) tulang tibia.

#### 5) Pemasangan komponen femoral

Pemasangan komponen femoral disesuaikan dengan kontur tulang femur yang sudah terpotong seperti ditunjukkan oleh Gambar 10. Panah merah pada gambar sebelah kiri menunjukkan arah pemasangan komponen femoral.

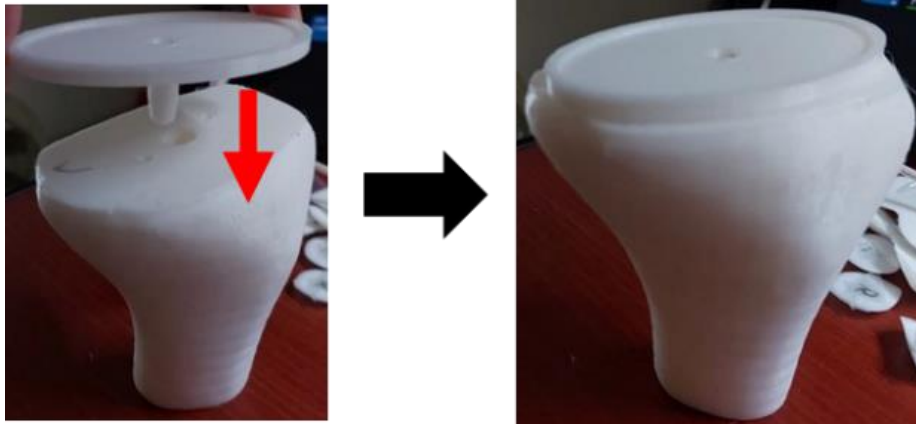


**Gambar 10.** Pemasangan komponen femoral prostetik lutut pada tulang femur (kiri) sebelum dan (kanan) sesudah pemasangan.



6) Pemasangan komponen tibial

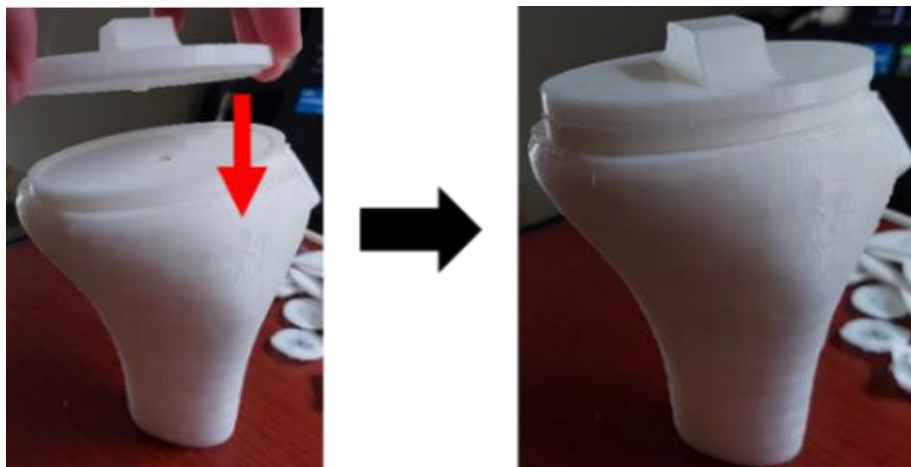
Gambar 11 memperlihatkan langkah pemasangan komponen tibial prostetik pada tulang tibia. Panah merah pada gambar sebelah kiri menunjukkan arah pemasangan komponen tibial. Pin pada komponen tibial prostetik harus terpasang tepat pada lubang yang dibuat di langkah iv.



**Gambar 11.** Pemasangan komponen tibial prostetik lutut pada tulang tibia (kiri) sebelum dan (kanan) sesudah pemasangan.

7) Pemasangan *Tibial Insert*

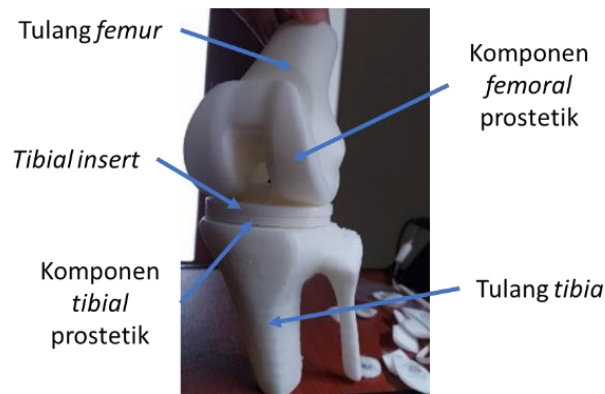
Pemasangan *tibial insert* pada komponen tibial ditunjukkan oleh Gambar 12. Panah merah pada gambar sebelah kiri menunjukkan arah pemasangan *tibial insert*.



**Gambar 12.** Pemasangan *tibial insert* prostetik; (kiri) sebelum dan (kanan) sesudah pemasangan.

8) Hasil Akhir Prosedur Operasi TKR

Hasil akhir prosedur operasi TKR berupa model 3-D tulang lutut dan prostetik yang sudah di-assembly. Gambar 13 memperlihatkan model 3-D print untuk hasil akhir prosedur operasi TKR.



**Gambar 13.** Hasil akhir simulasi proses operasi TKR menggunakan model 3-D *print*.

### 3.2. Diskusi

Simulasi proses operasi TKR dilakukan dengan menggunakan model 3-D *print* di sub-bab 3.1.3. Proses pemasangan prosthesis pada lutut yang didemonstrasikan merupakan penyederhanaan dari serangkaian proses operasi yang sangat kompleks. Proses operasi TKR yang disimulasikan pada penelitian ini hanya mendemonstrasikan proses pemotongan dan pengeboran tulang femur dan tibia serta pemasangan prostesis pada tulang lutut. Panduan sudut pemotongan femur dan tibia berada pada sudut  $+5^\circ$  hingga  $+7^\circ$  terhadap valgus kiri maupun kanan [27]. Variasi sudut tersebut bergantung pada beberapa faktor seperti penyalarsan IM *guide* dan morfotipe pasien. Lebih lanjut, model 3-D pada penelitian ini perlu dilakukan pengujian oleh para civitas akademik di kedokteran untuk menilai kemampuan produk dalam hal yang mendukung proses edukasi seperti seberapa baik produk dapat memberikan pemahaman kepada mahasiswa kedokteran dalam proses operasi TKR. Selain itu, model 3-D TKR perlu ditambahkan rangkaian prosedur operasi yang lain agar mampu menirukan proses operasi yang sebenarnya. Secara visual (kualitatif), bentuk produk model 3-D baik tulang lutut dan prostetik TKR tidak mempunyai perbedaan yang signifikan. Kenyataannya, proses fabrikasi di 3-D *print* akan selalu terjadi penyusutan [28, 29]. Penyusutan ukuran atau perubahan dimensi tidak dibahas secara detil di penelitian ini. Namun, perubahan dimensi akibat penyusutan yang terjadi dalam proses 3-D *print* perlu diperhatikan terutama apabila nantinya simulasi operasi TKR harus melibatkan pergeseran atau dimensi yang terukur.

### 4. Kesimpulan

Berdasarkan pada penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu; (1) Rekonstruksi tulang lutut menggunakan berbagai macam perangkat lunak berhasil dilakukan dengan hasil yang cukup menyerupai bentuk pemindaian CT/MRI atau bentuk tulang asli dan (2) Hasil model 3-D *print* alat peraga tulang dan sendi lutut prostetik dapat mendemonstrasikan simulasi operasi *Total Knee Replacement* (TKR) dengan limitasi proses operasi hanya meliputi perlakuan tulang dan pemasangan prostesis.

### Daftar Pustaka

1. Yammine K. The Current Status of Anatomy Knowledge: Where Are We Now? Where Do We Need to Go and How Do We Get There? *Teaching and Learning in Medicine*. 4 April 2014;26(2):184–8.
2. Smith CF, Mathias HS. What impact does anatomy education have on clinical practice? *Clinical Anatomy*. Januari 2011;24(1):113–9.

3. Li KHC, Kui C, Lee EKM, Ho CS, Wong SH, Wu W, dkk. The role of 3D printing in anatomy education and surgical training: A narrative review. *MedEdPublish*. 6 Juni 2017;6:92.
4. Fasel JHD, Aguiar D, Kiss-Bodolay D, Montet X, Kalangos A, Stimec B V., dkk. Adapting anatomy teaching to surgical trends: a combination of classical dissection, medical imaging, and 3D-printing technologies. *Surgical and Radiologic Anatomy*. 9 April 2016;38(3):361–7.
5. Chae MP, Rozen WM, McMenamin PG, Findlay MW, Spychal RT, Hunter-Smith DJ. Emerging Applications of Bedside 3D Printing in Plastic Surgery. *Frontiers in Surgery*. 16 Juni 2015;2.
6. Apriawan T, Bajamal AH, Hermawan Y, Fitra F, Darlan D, Kamal IH, dkk. Three-dimensional (3D)-printed model reconstruction in pre-operative planning for wooden penetrating brain injury. *Bioprinting*. Desember 2021;24:e00168.
7. Safali S, Berk T, Makelov B, Acar MA, Gueorguiev B, Pape HC. The Possibilities of Personalized 3D Printed Implants—A Case Series Study. *Medicina*. 28 Januari 2023;59(2):249.
8. Wang Z, Yang Y. Application of 3D Printing in Implantable Medical Devices. Chen X, editor. *BioMed Research International*. 12 Januari 2021;2021:1–13.
9. Jones DB, Sung R, Weinberg C, Korelitz T, Andrews R. Three-Dimensional Modeling May Improve Surgical Education and Clinical Practice. *Surgical Innovation*. 29 April 2016;23(2):189–95.
10. Javan R, Bansal M, Tangestanipoor A. A Prototype Hybrid Gypsum-Based 3-Dimensional Printed Training Model for Computed Tomography–Guided Spinal Pain Management. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2016;40(4):626–31.
11. AL-Ramahi J, Luo H, Fang R, Chou A, Jiang J, Kille T. Development of an Innovative 3D Printed Rigid Bronchoscopy Training Model. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*. 1 Desember 2016;125(12):965–9.
12. Bartikian M, Ferreira A, Gonçalves-Ferreira A, Neto LL. 3D printing anatomical models of head bones. *Surgical and Radiologic Anatomy*. 13 Oktober 2019;41(10):1205–9.
13. Knoedler M, Feibus AH, Lange A, Maddox MM, Ledet E, Thomas R, dkk. Individualized Physical 3-dimensional Kidney Tumor Models Constructed From 3-dimensional Printers Result in Improved Trainee Anatomic Understanding. *Urology*. Juni 2015;85(6):1257–62.
14. Kurenov SN, Ionita C, Sammons D, Demmy TL. Three-dimensional printing to facilitate anatomic study, device development, simulation, and planning in thoracic surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. April 2015;149(4):973-979.e1.
15. Sodian R, Weber S, Markert M, Loeff M, Lueth T, Weis FC, dkk. Pediatric cardiac transplantation: Three-dimensional printing of anatomic models for surgical planning of heart transplantation in patients with univentricular heart. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. Oktober 2008;136(4):1098–9.
16. Maag C, Metcalfe A, Cracaoanu I, Wise C, Auger DD. The development of simulator testing for total knee replacements. *Biosurface and Biotribology*. 26 Juni 2021;7(2):70–82.
17. Cai B, Rajendran K, Bay BH, Lee J, Yen C. The Effects of a Functional Three-dimensional (3D) Printed Knee Joint Simulator in Improving Anatomical Spatial Knowledge. *Anatomical Sciences Education*. 24 November 2019;12(6):610–8.
18. Wirz P, Jakob RP. Knee joint simulator: an anatomical reconstruction of the joint surfaces and of the ligamentous structures of the knee joint for teaching purposes. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 21 Januari 1999;7(1):59–62.

19. Mercader A, Röttinger T, Bigdeli A, Lüth TC, Röttinger H. A patient-specific 3D model of the knee to compare the femoral rollback before and after total knee arthroplasty (TKA). *Journal of Experimental Orthopaedics*. 4 Desember 2021;8(1):2.
20. eSUN PLA+ Technical Data Sheet [Internet]. Tersedia pada: [www.esun3d.net](http://www.esun3d.net)
21. Herron J. *3D Printing in Medical Libraries: A Crash Course in Supporting Innovation in Health Care*. Rowman & Littlefield Publishers; 2019. (Medical Library Association Books Series).
22. MRI of Knee [Internet]. [dikutip 23 Juli 2022]. Tersedia pada: <https://www.embodi3d.com/files/file/56692-knee/>
23. Scott RD. *Total Knee Arthroplasty: A Technique Manual*. Elsevier; 2019.
24. Bono J V, Scott RD. *Revision Total Knee Arthroplasty*. Springer International Publishing; 2017.
25. Song SJ, Park CH, Bae DK. What to Know for Selecting Cruciate-Retaining or Posterior-Stabilized Total Knee Arthroplasty. *Clinics in Orthopedic Surgery*. 2019;11(2):142.
26. Tzanetis P, Marra MA, Fluit R, Koopman B, Verdonschot N. Biomechanical Consequences of Tibial Insert Thickness after Total Knee Arthroplasty: A Musculoskeletal Simulation Study. *Applied Sciences*. 9 Maret 2021;11(5):2423.
27. Affatato S. *Surgical Techniques in Total Knee Arthroplasty and Alternative Procedures*. Elsevier Science; 2014. (Woodhead Publishing Series in Biomaterials).
28. Shahrubudin N, Koshy P, Alipal J, Kadir MHA, Lee TC. Challenges of 3D printing technology for manufacturing biomedical products: A case study of Malaysian manufacturing firms. *Heliyon*. April 2020;6(4):e03734.
29. Zhao M, Geng Y, Fan S, Yao X, Zhu M, Zhang Y. 3D-printed strong hybrid materials with low shrinkage for dental restoration. *Compos Sci Technol*. September 2021;213:108902.