

PEMODELAN IMPLAN PENGANTI TULANG LUTUT (TKR) 3D DENGAN METODE REKAYASA TERBALIK BERBANTUAN PEMINDAI TOMOGRAFI KOMPUTER DAN *BOUNDARY SURFACE*

Sahabman Tua P. Naibaho¹, Suryadiwansa Harun², Yanuar Burhanuddin³

¹Dosen Politeknik Tunas Garuda

Kota Budaya Uluhan Nughik, Panaragan Jaya, Tulang Bawang Barat

²Dosen Jurusan Magister Teknik Mesin Universitas Lampung

³Dosen Jurusan Magister Teknik Mesin Universitas Lampung

*Corresponding author: sahabmekatro@gmail.com

Abstract

Osteochondritis dissecans, a condition often seen in athletes, causes focal subchondral bone changes leading to osteochondral fragmentation. Total Knee Replacement (TKR) is a solution for addressing knee joint damage, but challenges arise in selecting commercial bone implants that may not match the patient's anatomical structure, especially in Indonesian patients. This mismatch can result in post-surgery pain reactions. To address this, the researcher proposes a study using reverse engineering with CT scanning to reconstruct the patient's knee bone into a 3D TKR model. This non-invasive method aims to design a TKR implant that aligns with the patient's knee bone structure, specifically tailored for Indonesian patients. The process involves CT scanning, expert analysis, image enhancement, and utilizing the Boundary Surface method to create the TKR implant model. Validation is done by comparing the 3D digital images of the patient's knee bone with the implant model, resulting in a customized 3D TKR knee bone implant that matches the patient's anatomy.

Keywords: *Knee bone, Total knee replacement implant, Reverse engineering, Computer tomography scanner, Boundary Surface.*

Abstrak

Osteochondritis dissecans, sebuah kondisi yang sering terjadi pada atlet, menyebabkan perubahan tulang subkondral fokal yang mengakibatkan fragmentasi osteokondral. Total Knee Replacement (TKR) adalah solusi untuk mengatasi kerusakan sendi lutut, tetapi tantangan muncul dalam memilih implan tulang komersial yang mungkin tidak sesuai dengan struktur anatomi pasien, terutama pada pasien Indonesia. Ketidaksesuaian ini dapat menyebabkan reaksi nyeri pascaoperasi. Untuk mengatasi hal ini, peneliti mengusulkan sebuah studi menggunakan rekayasa balik dengan CT scanning untuk merekonstruksi tulang lutut pasien menjadi model TKR 3D. Metode non-invasif ini bertujuan untuk merancang implan TKR yang sejajar dengan struktur tulang lutut pasien, khususnya yang disesuaikan untuk pasien Indonesia. Proses ini melibatkan CT scanning, analisis ahli, perbaikan citra, dan menggunakan metode Boundary Surface untuk membuat model implan TKR. Validasi dilakukan dengan membandingkan gambar digital 3D tulang lutut pasien dengan model implan, menghasilkan implan tulang lutut TKR 3D yang disesuaikan sesuai dengan anatomi pasien.

Kata kunci: Tulang lutut, Total knee replacement implant, Reverse engineering, Computer tomography scanner, Boundary Surface.

1. Pendahuluan

Osteochondritis dissecans merupakan perubahan fokal tulang subkondral. Perubahan ini mengakibatkan fragmentasi osteokondral baik parsial atau komplit. Penyakit ini umumnya diderita olahragawan baik anak, remaja, atau dewasa. *Osteochondritis dissecans* juga merupakan penyebab nyeri dan disfungsi lutut yang sering ditemui pada masa pertumbuhan remaja. Apabila tidak dideteksi sedini

mungkin dan diterapi akan menyebabkan *osteoarthritis* sekunder. Penyakit ini paling banyak terjadi di lutut (75%), siku (5%), dan pergelangan kaki (4%). Insiden total penyakit ini pada distal femur adalah 6,09 per 100.000 orang pertahun [1]. *Total Knee Replacement* (TKR) atau penggantian sendi lutut adalah prosedur bedah ortopedi yang melibatkan penggantian sendi lutut yang rusak atau aus dengan sendi buatan atau prostetik. Prosedur ini bertujuan untuk mengurangi rasa sakit dan memperbaiki

fungsi lutut yang terganggu karena kondisi seperti *osteoarthritis*, *rheumatoid arthritis*, cedera, atau gangguan degeneratif lainnya. *Total Knee Replacement* (TKR) adalah salah satu yang paling menguntungkan kemajuan bedah ortopedi abad kedua puluh [2].

Selama prosedur TKR, dokter bedah akan menghilangkan tulang dan jaringan yang rusak dari bagian lutut dan menggantinya dengan implan buatan. Implant biasanya terbuat dari logam, plastik, atau keramik dan terdiri dari komponen yang menyatu dengan tulang asli dan memungkinkan sendi buatan bergerak dengan lancar. TKR bertujuan mengembalikan fungsi keselarasan sendi lutut secara normal [3], [4]. Implan tulang komersial yang tersedia di pasaran kadang bentuk strukturnya berbeda dengan bentuk anatomi pasien karena diproduksi secara massal [4], [5], [13], [14]. Operasi *Total Knee Replacement* (TKR) adalah prosedur yang umum dilakukan dengan peningkatan kualitas hidup pasien yang baik. *National Joint Registry* (NJR) mencatat lebih dari 300.000 operasi TKR di Inggris antara 2017 dan 2019, dan tidak diragukan lagi jumlah ini akan terus meningkat [15].

Aplikasi utama dari rekayasa terbalik adalah untuk membuat kembali bayangan cermin dari bagian aslinya, mendekodekan mekanisme suatu fungsi, atau menelusuri kembali peristiwa dari apa yang terjadi [6]. Titik data didigitalkan dari produk, yang mungkin telah dirancang sebelum ada CAD/CAM, diproduksi oleh pabrikan lain atau dibuat dengan tangan (tanpa desain CAD sama sekali) [7]. Penelitian tentang rekonstruksi tulang lutut menjadi TKR melalui *Reverse Engineering* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Mallesh dan Sanjay finit [8] melakukan rekonstruksi TKR menggunakan pemindaian CT-image dengan bantuan software MIMICS untuk menghasilkan model TKR. Devaraj dkk. [9].

Berbeda dengan metode sebelumnya yang menggunakan pemindaian non kontak, Lin Y.P. dkk [10] menggunakan metode probing kontak dengan memanfaatkan

mesin pengukur koordinat (CMM) untuk memindai tulang lutut pasien sehingga menghasilkan model tulang lutut 3D. Studi penulis sebelumnya [11], [12], juga merekonstruksi tulang lutut manusia menjadi model TKR, khususnya implan femoralis, menggunakan metode *Reverse Engineering* (RE) dan pemindai X-Ray. Oleh karena itu studi kali ini membahas tentang rekonstruksi tulang lutut pasien menjadi model implan TKR menggunakan metode RE dengan bantuan *computer tomography* (CTScan) dan metode *Boundary Surface*. Dalam penelitian ini, tulang femoralis adalah yang pertama kali direkonstruksi, dan menjadi acuan untuk pembuatan tulang lutut implan lainnya, yaitu komponen tibia.

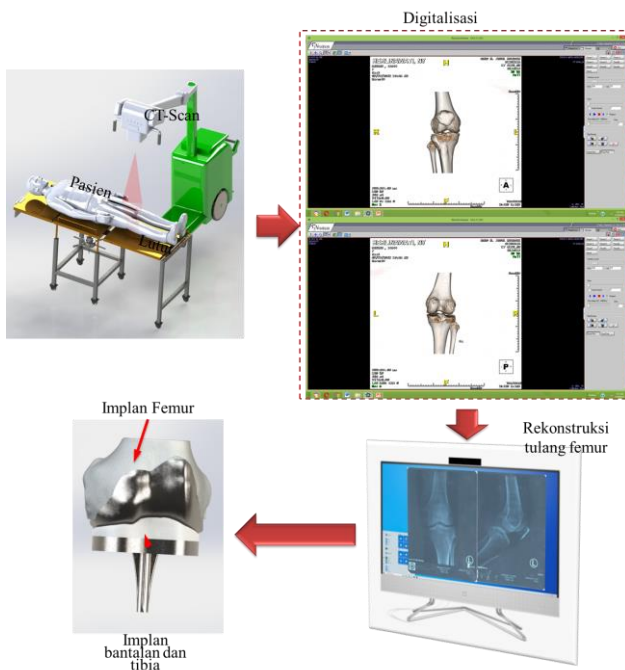
2. Metode Penelitian

Implan tulang lutut (TKR) termasuk tulang femur mempunyai bentuk yang rumit dan perlu dirancang bangun sesuai dengan anatomi tulang lutut pasien. Teknologi RE dapat digunakan untuk merancang bangun ulang (rekonstruksi) objek tulang lutut dengan menggunakan peralatan pemindai dan mengkonversi objek kedalam bentuk 3D tulang lutut (format digital). Konsep RE untuk merekonstruksi tulang lutut femur pasien menjadi model 3D implan tulang lutut femur dapat dilihat pada Gambar 1.

2.1 Pengambilan Sampel Tulang Lutut Pasien

Seperti diilustrasikan dalam Gambar 1, rekonstruksi tulang lutut femur dimulai dengan memindai tulang lutut pasien menggunakan perangkat CTScan. Dalam penelitian ini, obyek tulang lutut yang dipindai adalah fokus bagian tulang lutut kanan (Femur dan Tibia) seorang pasien perempuan berusia 51 tahun. Hasil pemindaian tulang lutut yang berformat file Dicom (dcm) selanjutnya diubah menjadi file dengan ekstensi stl. atau obj. agar dapat dianalisis citranya. File tulang lutut yang sudah diubah selanjutnya direkonstruksi untuk membuat model Implan Tulang Lutut (TKR) yang sesuai dengan anatomi tulang

lutut pasien dengan perangkat lunak atau *software* aplikasi *Computer Aided Design* (CAD).



Gambar 1. Konsep Pengambilan Sampel Tulang Lutut Pasien Menjadi Model Implan Tulang Lutut 3D.

2.2 Pendapat Ahli (*Expert Judgement*) Ortopaedi

Sebelum mendesain implan tulang lutut TKR, diskusi panel atau wawancara mendalam (*deep interview*) dengan ahli ortopaedi perlu dilakukan untuk mendapatkan informasi desain. Pendapat ahli ini meliputi informasi tentang produk standar TKR.

2.3 Pembuatan Model Implan Tulang Lutut 3D

Pembuatan model implan tulang lutut 3D dilakukan dengan beberapa tahapan pengolahan citra sampel tulang lutut pasien. Tahapan awal ialah merekonstruksi tulang femur yang nantinya akan dijadikan acuan pembuatan implan bantalan dan tibia dari tulang lutut.

2.4 Validasi Model Implan Tulang Lutut 3D

Validasi deviasi dilakukan untuk mengetahui akurasi bentuk dan ukuran

model implan tulang lutut yang dirancang dengan menggunakan metode analisis deviasi antara kesesuaian bentuk implan 3D dengan bentuk model tulang femur pasien. Validasi selanjutnya adalah melakukan validasi parameter kritis tulang lutut pasien dengan implan tulang lutut 3D yang akan dibuat.

3. Hasil dan Pembahasan

Pendapat ahli, dalam hal ini dokter Spesialis Orthopedi dari Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Lampung, dr. Helmi Ismunandar, Sp.OT., disampaikan dalam kegiatan Forum Group Discussion (FGD) yang dilakukan pada awal penelitian. Hasil dari FGD antara lain:

- Ketebalan implan tulang femur umumnya dikostumisasi berdasarkan ketebalan tulang femur yang dipotong saat operasi TKR. Ketebalan implan tulang lutut yang akan dibuat adalah sekitar 10 sampai dengan 40 mm berdasarkan pengalaman ahli orthopedi.
- Ada tiga komponen utama dari implan tulang lutut yaitu femur yang menempel ditulang lutut femur. Juga ada komponen tibia yang dipasang pada ujung tulang lutut tibia. Di antara komponen tulang femur dan tibia dipasang komponen bantalan dimana komponen ini harus bergerak selaras dengan implan tulang femur.

Dalam penelitian ini, prinsip utama dalam rekonstruksi tulang lutut pasien menjadi implan tulang lutut adalah menjadikan komponen tulang lutut femur yang pertama kali direkonstruksi. Alasannya adalah geometri tulang lutut femur menjadi acuan pembentukan geometri implan tulang femur, bantalan tibia, dan tibia. Implan tulang lutut femur akan menjadi acuan geometri (topologi dan ukuran) untuk komponen implan tulang lutut yang lain (Bantalan, Tibia), lihat Gambar 2.

Tahapan selanjutnya ialah menentukan parameter ketebalan implan femur. Hal ini bertujuan untuk menentukan

pemotongan bidang permukaan model yang akan dibentuk menjadi model implan femur.



Gambar 1. Model Femur Sebagai Acuan Pembuatan Bantalan dan Tibia.

Tabel 1. Parameter Ukuran Femur

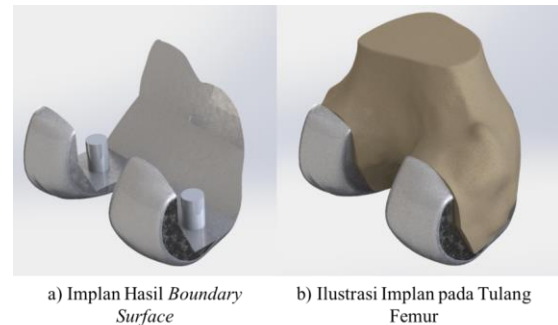
Parameter Femur	Ukuran	Keterangan
CAP	57,59 mm	panjang dari anteroposterior
CML	77,2 mm	panjang mediolateral
PHL	40,48 mm	tinggi kondilus posterior lateral
PHM	40,48 mm	tinggi kondilus posterior medial
PWL	26,00 mm	lebar kondilus posterior lateral
PWM	26,33 mm	lebar kondilus posterior medial

Bentuk akhir dari langkah proses pada gambar 3 adalah bentuk 3D implant femur yang telah dibuat berdasarkan metode *boundary surface* tulang lutut bagian femoral.

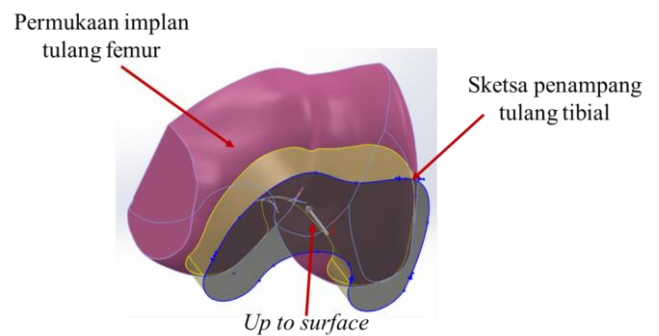
Sinkronisasi antara gerakan lutut femur dan tibia sangat dipengaruhi oleh sisipan sebagai *interface*. Topologi permukaan sisipan yang tidak sama konturnya dengan permukaan tulang lutut femur dapat berakibat terjadinya gesekan yang besar sehingga mempengaruhi Gerakan kinematis antara implan tulang femur dan tibia. Oleh karena itu, bentuk topologi permukaan bantalan atau sisipan haruslah mirip konturnya.

Sketsa implan bantalan itu kemudian dimodelkan dalam bentuk 3D dengan

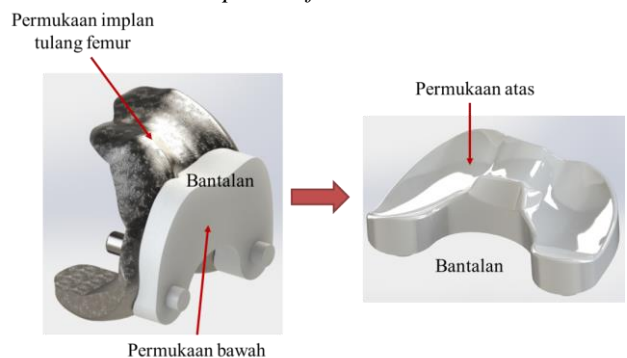
menggunakan metode *extrude boss* disertai dengan parameter *up to surface* (permukaan atau kontur implan tulang femur), seperti terlihat dalam Gambar 4 dan 5.



Gambar 3. Hasil Akhir Bentuk 3D Implan Femur Menggunakan Metode *Boundary Surface*.



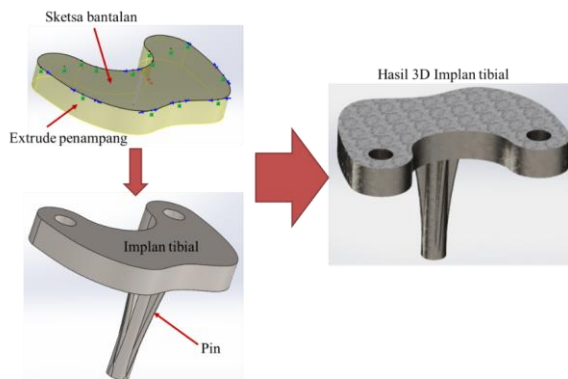
Gambar 4. Metode *Extrude Boss* dengan Parameter *Up to Surface*.



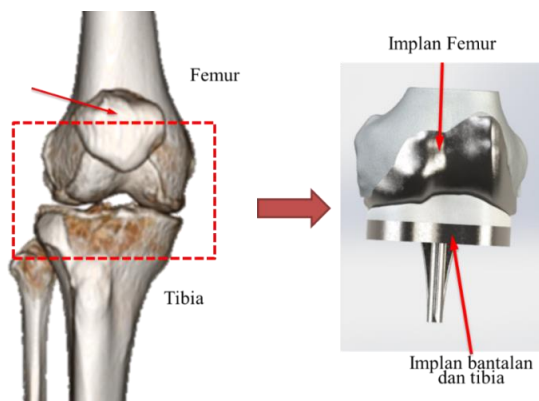
Gambar 5. Implan Bantalan.

Setelah model 3D penampang implan bantalan selesai dibuat maka selanjutnya pin sebagai pengikat implan tibia dengan tulang tibia dibuat pada penampang implan bantalan bagian bawah. Hasil dari pemodelan implan bantalan juga dapat dilihat pada Gambar 6.

Hasil pemodelan komponen implan femur, bantalan dan tibia selanjutnya dirakit menjadi implan tulang lutut total (TKR) seperti terlihat pada Gambar 7. Model implan TKR ini topologinya (bentuk dan ukuran) sesuai dengan topologi tulang lutut pasien karena dirancang dengan metode *Reverse Engineering*.



Gambar 2. Implan Tibia.



Gambar 7. Model 3D Implan *Total Knee Replacement* (TKR).

Analisis deviasi dilakukan untuk mengetahui adanya gap antara kontur permukaan tulang yang telah direkonstruksi dengan bentuk tulang femur pasien. Semakin kecil nilai deviasi antara kontur hasil *boundary surface* dengan bentuk tulang femur akan menunjukkan kesesuaian bentuk model implant 3D yang dibuat dengan bentuk tulang femur.

Analisis data deviasi dilakukan pada 31 titik kontur permukaan model implant dengan model tulang femur secara acak.

Data hasil analisis pengujian model tersebut disajikan dalam Gambar 8.

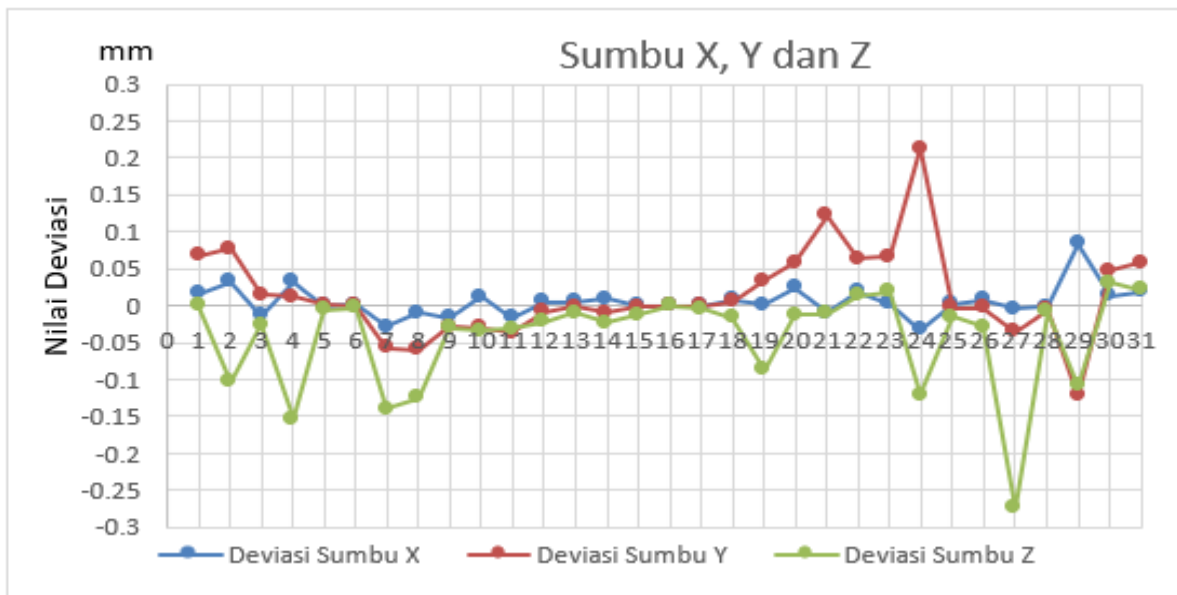
Grafik deviasi sumbu x, y dan z antara model implan 3D dan model lutut pasien Gambar 8 menunjukkan bahwa deviasi tertinggi pada sumbu X adalah pada titik uji ke 29 yaitu sebesar 0.087 mm, sedangkan pada sumbu Y terjadi pada titik uji ke 24 sebesar 0.2128 mm, sedangkan pada sumbu Z deviasi tertinggi ialah pada titik uji ke 27 yaitu sebesar -0.2748 mm. Rata-rata nilai deviasi dari titik-titik acak yang diukur memiliki nilai deviasi yang sangat kecil yaitu 0,072 mm sehingga dapat disimpulkan dengan deviasi tersebut bahwa model berkesesuaian dengan lutut femur pasien.

Validasi data ukuran parameter kritis tulang femur pasien dan parameter model 3D perlu dilakukan untuk mengetahui akurasi bentuk dan ukuran model implan femur yang dirancang melalui perbandingan deviasi antara ukuran model dengan ukuran tulang femur pasien.

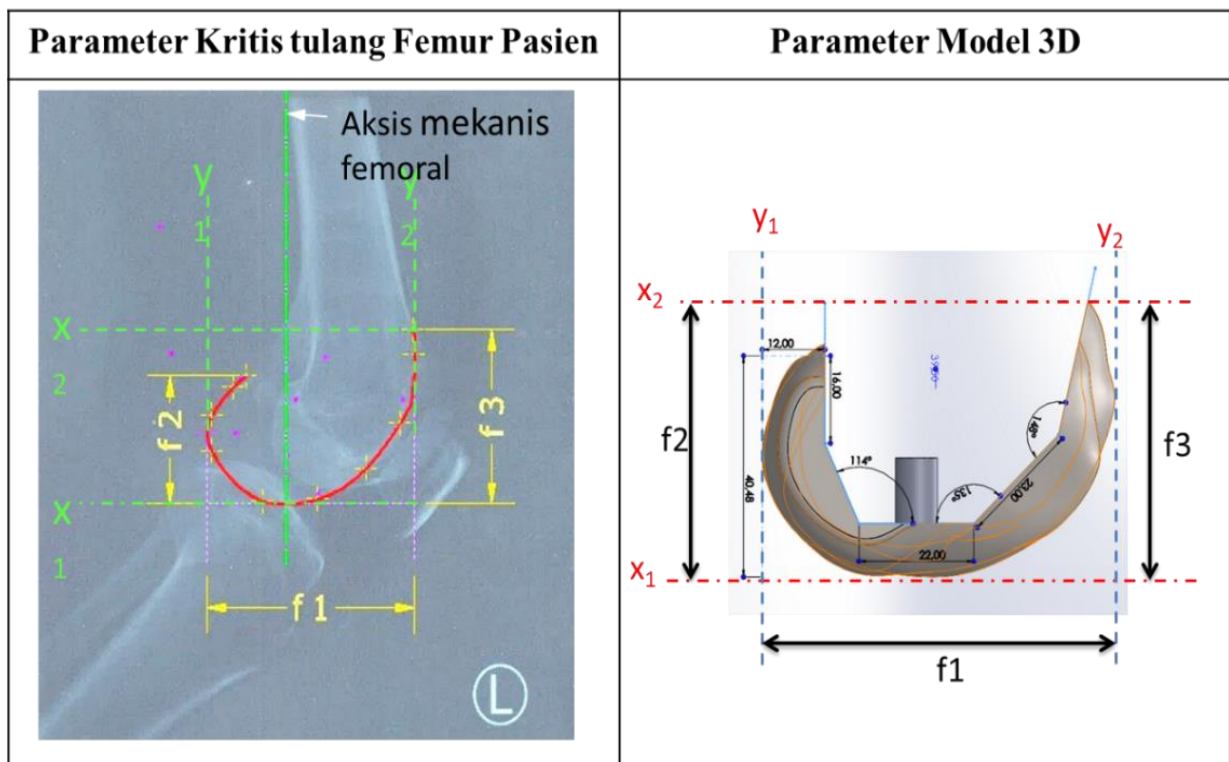
Tabel 2. Data Parameter Kritis Tulang Femur Pasien dan Parameter Model 3D.

Parameter Kritis Tulang Femur	Ukuran	Parameter Model 3D	Ukuran	Selisih
f1	74,65 mm	f1	74,64 mm	0,01 mm
f2	40,48 mm	f2	40,48 mm	0 mm
f3	55,06 mm	f3	55,06 mm	0 mm
f4	75,42 mm	f4	77,2 mm	1,78 mm
α_m	3,3°	α_m	3°	0,3°

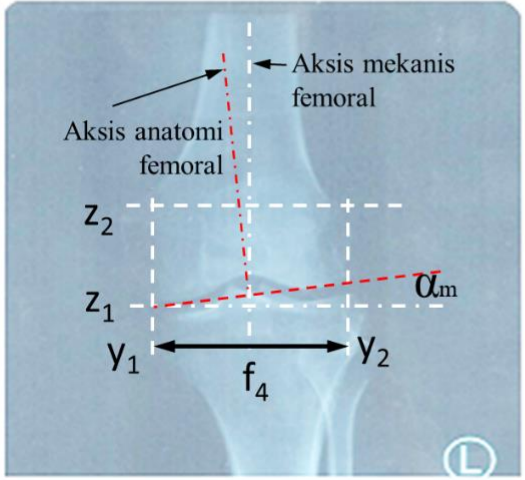
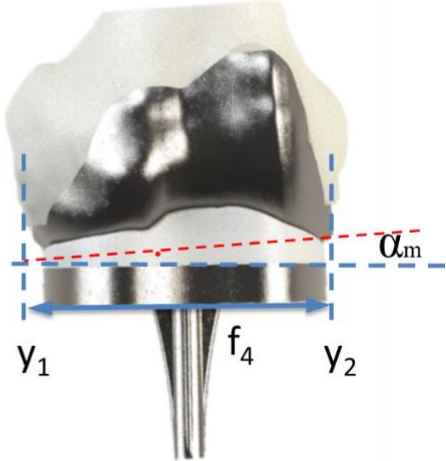
Lebih lengkap hasil validasi parameter ukuran model 3D implan tulang femur dapat dilihat dalam Tabel 3, dimana perbedaan dimensi antara parameter ukuran model implan tulang femur dengan parameter kritis tulang lutut femur pasien yang dipindai relatif kecil. Oleh karena itu, model implan ini dapat dimanfaatkan oleh perancang dan pabrikan untuk merancang bangun (kostumisasi) purwarupa implan tulang lutut TKR secara menyeluruh, termasuk implan tibia dan bantalannya.



Gambar 8. Grafik Deviasi Sumbu X, Y dan Z antara Model Implan 3D dan Model Lutut Pasien.



Gambar 9. Validasi Parameter Kritis Tulang Femur Pasien Tampak Samping dengan Parameter Model 3D.

Parameter Kritis tulang Femur Pasien	Parameter Model 3D
	

Gambar 3. Validasi Parameter Kritis Tulang Femur Pasien Tampak Depan dengan Parameter Model 3D.

4. Kesimpulan

Berdasarkan data analisis ada deviasi rata-rata antara model implant 3D dengan model tulang lutut pasien sebesar 0,005 mm pada sumbu X, 0,0428 mm pada sumbu Y dan 0,0139 mm pada sumbu Z. Rata-rata nilai deviasi dari titik-titik acak yang diukur memiliki nilai deviasi yang sangat kecil yaitu 0,072 mm sehingga dapat disimpulkan dengan deviasi tersebut bahwa model berkesesuaian dengan lutut femur pasien.

Validasi dilakukan dengan membandingkan data geometri parameter kritis tulang femur pasien dengan parameter model 3D. Panjang total implan tulang femur (f_1) yaitu 74,64 mm adalah sama dengan panjang total tulang femur pasien (f_1). Begitupun tinggi implan tulang femur, baik yang minimum (f_2) maupun maksimum (f_3) yaitu 40,48 mm. Terdapat deviasi sekitar 1,78 mm pada lebar total implan tulang femur (f_4) yaitu 77,2 mm, sedangkan tulang femur pasien lebarnya (f_4) adalah 75,42 mm. tapi ukuran model implan tulang femur lebarnya masih dalam batas ukuran parameter kritis tulang femur pasien. Pada sudut aksial femoral α_m pada lutut pasien sebesar $3,3^\circ$ dan pada model implan

lutut 3D memiliki sudut α_m sebesar 3° yang dikostumisasi pada bagian bantalan atau sisipan antara femur dan tibia. Perbedaan dimensi antara parameter ukuran model implan tulang femur dengan parameter kritis tulang lutut femur pasien yang dipindai relatif kecil, oleh karena itu model implan ini dapat dimanfaatkan oleh perancang dan pabrikan untuk merancang bangun (kostumisasi) purwarupa implan tulang lutut TKR secara menyeluruh, termasuk implan tibia dan bantalannya.

Ucapan terimakasih

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada Mas Satrio Darma, serta rekan-rekan Teknik Manufaktur UNILA yang telah membantu penulis dalam merampungkan artikel pada Program Studi Teknik Mesin UM Metro.

Referensi

- [1] H. Ismunandar, "Osteochondritis Dissecans," 2020.
- [2] N. D. Goyal, V. Kumar Gautam, A. H. Pahwa, A. Banjare, P. Kumar, and K. Goel, "Does drain matter in primary total knee replacement surgeries?,"

- Journal of Arthroscopy and Joint Surgery, vol. 8, no. 2, pp. 166–171, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jajs.2021.03.003.
- [3] M. F. Jared RH Foran and M. F. Stuart J. Fischer, “Total Knee Replacement,” <https://orthoinfo.aaos.org/en/treatment/total-knee-replacement>.
- [4] Y. Jun, “Morphological analysis of the human knee joint for creating custom-made implant models,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 9–12, pp. 841–853, Feb. 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2785-1.
- [5] P. D. W. Eksteen, “Development of incrementally formed patient-specific titanium knee prosthesis,” <http://hdl.handle.net/10019.1/80397>, 2013.
- [6] W. Wang, *Reverse Engineering: Technology of Reinvention*. 2011.
- [7] I. Gibson and H. Kong, *Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications : Reverse Engineering, Software Conversion, and Rapid Prototyping*. 2005.
- [8] G. Mallesh, “International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Finite Element Modeling and Analysis of Prosthetic Knee Joint,” 2012. [Online]. Available: www.ijetae.com
- [9] R. Adhikari, K. Kumar, and V. Acharya, “Finite Element Analysis of a Human Knee Joint,” 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309320993>
- [10] Y. P. Lin, C. T. Wang, and K. R. Dai, “Reverse engineering in CAD model reconstruction of customized artificial joint,” *Med Eng Phys*, vol. 27, no. 2, pp. 189–193, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.medengphy.2004.09.006.
- [11] F. Setiawan, S. Harun, and Y. Burhanudin, “REKONSTRUKSI TULANG LUTUT MENJADI MODEL 3D IMPLAN FEMUR DENGAN METODE REVERSE ENGINEERING BERBASIS PEMINDAI X-RAY,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 67–75, Jun. 2022, doi: 10.21776/ub.jrm.2022.013.01.8.
- [12] M. S. Hamideen, J. Sharaf, K. A. Al-Saleh, and M. Shaderma, “Description of a transmission X-ray computed tomography scanner,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 80, no. 11, pp. 1162–1165, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.radphyschem.2011.05.007.
- [13] M. Drexler et al., “Assuring the happy total knee replacement patient,” *Bone Joint J*, vol. 95, pp. 120–123, 2013, doi: 10.1302/0301-620X.95B11.
- [14] N. D. Goyal, V. Kumar Gautam, A. H. Pahwa, A. Banjare, P. Kumar, and K. Goel, “Does drain matter in primary total knee replacement surgeries?,” *Journal of Arthroscopy and Joint Surgery*, vol. 8, no. 2, pp. 166–171, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jajs.2021.03.003.
- [15] N. Singh Bhamber, B. Waterson, and A. Toms, “Aseptic complications of total knee replacement and treatment options,” 2020.