

FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) PROSTESIS SKAPULA ORANG INDONESIA

*Muhammad Akhlis Ananta¹, Gana Adyaksa², Rifky Ismail¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Departemen Kedokteran, Fakultas Kedokteran, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: akhlisananta1@gmail.com

Abstrak

Reseksi bedah akibat sarkoma tulang skapula sering mengakibatkan hilangnya struktur anatomi yang berdampak pada penurunan fungsi biomekanis bahu secara drastis, mengingat skapula merupakan tumpuan bagi 17 otot penggerak bahu. Prostesis kustom berbasis teknologi *Additive Manufacturing* (AM) menjadi solusi untuk memulihkan integritas struktural dan estetika tubuh pasien. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan mekanis prostesis skapula kustom pasien orang Indonesia melalui *Finite Element Analysis* (FEA). Geometri prostesis direkonstruksi dari citra CT berformat DICOM menggunakan Materialise Mimics Medical 21.0 melalui metode segmentasi dan *mirroring* dari skapula sehat, kemudian dikonversi menjadi *solid body* menggunakan ANSYS SpaceClaim 2023 R1. Simulasi FEA dilakukan pada ANSYS Mechanical 2023 R1 dengan metode *mesh* tetrahedron linear berukuran 0,8–1,5 mm dan kondisi pembebanan elevasi 90° setara pengangkatan beban 2 kg secara lateral. Material prostesis yang digunakan adalah Stainless Steel 316L (*yield strength* 210 MPa). Hasil simulasi menunjukkan kualitas *mesh* sangat baik (*element quality* 0,4–1,0; *skewness* 0,00–0,61; *aspect ratio* 1,2–5,0). Tegangan von-Mises maksimum sebesar 144 MPa, masih di bawah kuat luluh material. Deformasi total maksimum sebesar 0,2 mm terjadi di area akromion. Faktor keamanan minimum bernilai 1,5, mengindikasikan desain prostesis aman secara mekanis di bawah kondisi pembebanan yang diujikan.

Kata kunci: analisis elemen hingga; prostesis skapula; rekonstruksi ct; sarkoma tulang; *stainless steel* 316L

Abstract

Surgical resection due to scapular bone sarcoma frequently results in the loss of anatomical structures, leading to a drastic decline in shoulder biomechanical function, as the scapula serves as the attachment point for 17 muscles governing shoulder mobility. Custom prostheses fabricated via *Additive Manufacturing* (AM) technology present a viable solution to restore structural integrity and body aesthetics in post-resection patients. This study aims to evaluate the mechanical strength of a custom scapula prosthesis for an Indonesian patient through *Finite Element Analysis* (FEA). The prosthesis geometry was reconstructed from DICOM-format CT images using Materialise Mimics Medical 21.0 via segmentation and mirroring of the contralateral healthy scapula, subsequently converted into a solid body using ANSYS SpaceClaim 2023 R1. FEA simulation was performed in ANSYS Mechanical 2023 R1 using a linear tetrahedral mesh of 0.8–1.5 mm element size under a 90° elevation loading condition equivalent to a 2 kg lateral lift. The prosthesis material was Stainless Steel 316L (*yield strength*: 210 MPa). Results demonstrated excellent mesh quality (*element quality*: 0.4–1.0; *skewness*: 0.00–0.61; *aspect ratio*: 1.2–5.0). The maximum von-Mises equivalent stress was 144 MPa, remaining below the material's yield strength. Maximum total deformation reached 0.2 mm, concentrated at the acromion region. The minimum safety factor of 1.5 indicates that the prosthesis design is mechanically safe under the applied loading conditions.

Keywords: bone sarcoma; ct reconstruction; finite element analysis; scapula prosthesis; *stainless steel* 316L

1. Pendahuluan

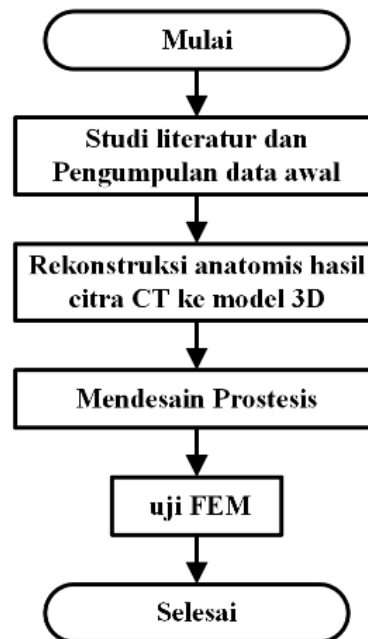
Kanker merupakan pertumbuhan massa abnormal di tubuh yang dipicu oleh mutasi genetik dan tidak memiliki fungsi fisiologis untuk tubuh. Penanganan terhadap kanker ini umumnya melibatkan prosedur yang mencakup kemoterapi, radioterapi, serta tindakan reseksi bedah. Meskipun reseksi terbukti mampu meningkatkan angka harapan hidup (*survival rate*) pasien secara signifikan, prosedur ini sering kali menyebabkan hilangnya sebagian struktur anatomi yang berdampak pada penurunan fungsionalitas organ secara drastis [1][2]. Pada kasus tulang skapula, tantangan medis menjadi lebih kompleks karena tulang ini berfungsi sebagai tumpuan bagi 17 otot yang mengatur mobilitas bahu [3]. Kehilangan skapula akibat prosedur reseksi tanpa adanya rekonstruksi yang tepat akan melumpuhkan mobilitas lengan atas dan secara langsung menurunkan kualitas standar hidup pasien [4].

Implementasi prostesis tulang menjadi opsi utama untuk memulihkan integritas struktural dan fungsi biomekanis sistem kerangka pasca reseksi tumor. Prostesis yang didesain secara kustom harus memiliki geometri yang identik dengan anatomi normal pasien untuk meningkatkan kepuasan fungsional serta mempertahankan estetika tubuh [5]. Selain aspek presisi, faktor kekuatan prostesis krusial agar tidak menyebabkan kegagalan mekanis yang akhirnya perlu tindakan revisi. Penggunaan teknologi *Additive Manufacturing* (AM) atau cetak 3D memungkinkan fabrikasi prostesis dengan kompleksitas geometris tinggi yang sulit dicapai melalui metode manufaktur konvensional [6][7].

Untuk memastikan agar protesis mampu menahan beban mekanis pada pasien, maka dilakukan pengujian menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA). Penelitian ini memfokuskan FEA pada desain protesis skapula kustom pasien orang Indonesia yang didiagnosis menderita sarkoma tulang di skapula. Geometri yang dipakai adalah hasil rekonstruksi citra CT dari orang Indonesia yang didiagnosis sarkoma tulang di skapula.

2. Bahan dan Metode Penelitian

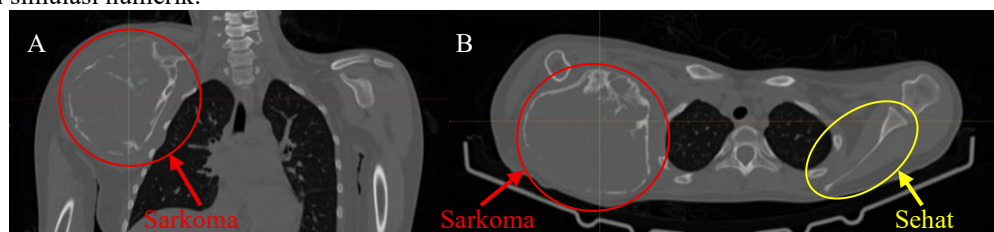
Bahan yang dipakai di penelitian ini adalah hasil citra CT orang Indonesia yang terkena sarkoma tulang di skapula. Data akan diolah menggunakan computer untuk merekonstruksi tulang agar dapat digunakan untuk diuji menggunakan FEA. Metode yang digunakan untuk mendesain protesis dalam penelitian ini divisualisasi dengan diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

a. Konversi Hasil CT ke Model Tiga Dimensi

Penelitian ini menggunakan sumber data medis berupa citra CT dari orang Indonesia yang mendapat diagnosis sarkoma tulang di skapula. Gambar 2 di bawah menunjukkan hasil citra CT yang dipakai. Tahapan perancangan dimulai dengan mengolah data citra CT berformat DICOM menjadi model tiga dimensi menggunakan metode segmentasi melalui peranti lunak Materialise Mimics Medical 21.0. Geometri dasar protesis diperoleh melalui penerapan proses mirroring dari skapula sinistra yang kondisinya masih sehat. Model hasil segmentasi tersebut kemudian dihaluskan dan dikonversi menjadi solid body menggunakan peranti lunak ANSYS SpaceClaim 2023 R1 untuk memfasilitasi kebutuhan modifikasi geometri dan simulasi numerik.

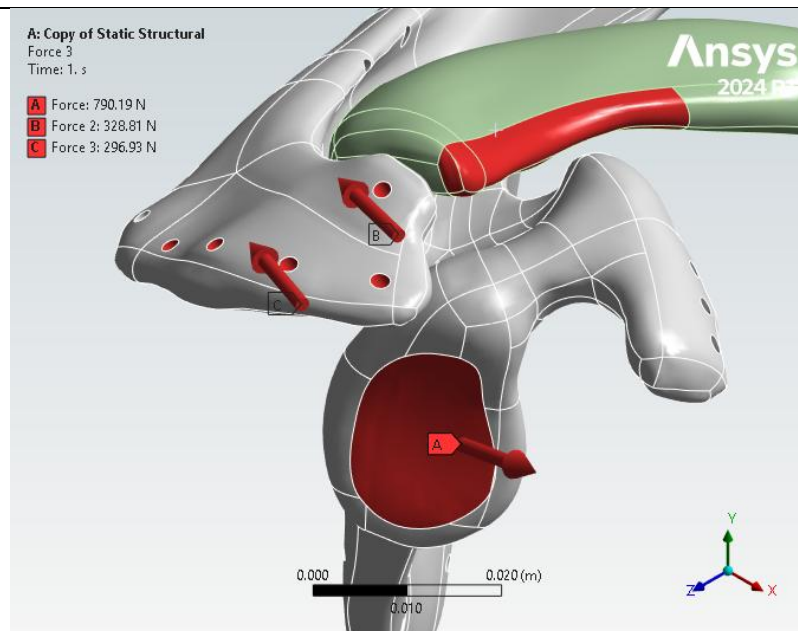


Gambar 2. Hasil citra CT pasien (A) Coronal (B) Axial

Protesis didesain berdasarkan hasil rekonstruksi anatomi skapula sehat. Model hasil rekonstruksi anatomi skapula sehat memastikan agar bentuk anatomis protesis menyerupai skapula aslinya. Model skapula lalu diberi lubang di beberapa titik untuk memfasilitasi penyambungan ligamen dan otot ke protesis.

b. Uji FEA

Uji FEA dilakukan dengan peranti lunak ANSYS Mechanical 2023 R1. Model pembebanan yang dipakai dalam penelitian ini diambil dari penelitian oleh Zheng Dkk. di pembebanan pada sudut elevasi 90° [8]. Model pembebanan pada penelitian tersebut didasari dengan pengangkatan beban 2 kg secara lateral. Model pembebanan dapat dilihat pada gambar 4. Metode *mesh* yang digunakan untuk uji Fem ini adalah tetrahedron linear dengan ukuran 0.8-1.5 mm.

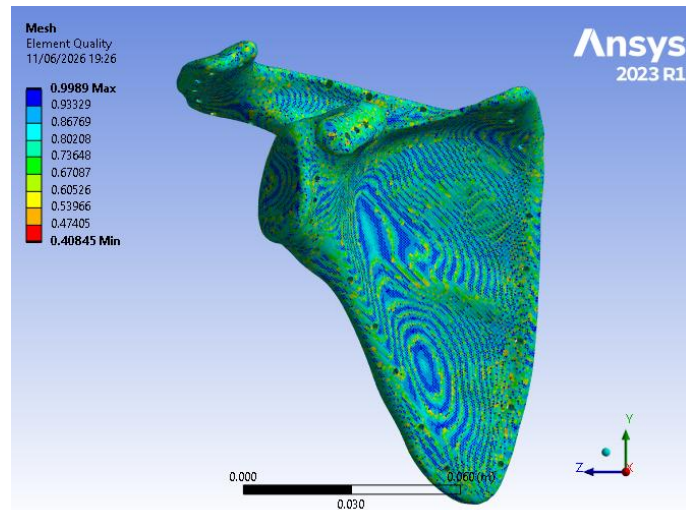


Gambar 3. Model pembebanan FEM pada penelitian

Data material yang digunakan adalah hasil karakterisasi material Stainless Steel 316L dari situs resmi Desktop Metal. Material ini memiliki kuat luluh 210 MPa dan modulus elastisitas 189 GPa [9]. untuk bagian sternum, digunakan karakteristik material tulang yang diambil dari penelitian Ma dkk. yaitu kuat luluh 100 MPa dan modulus elastisitas 20 GPa [10].

3. Hasil dan Pembahasan

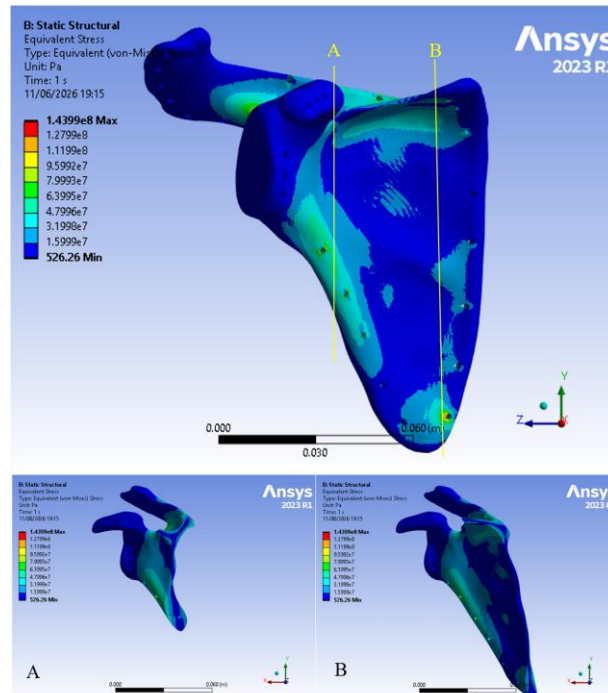
a. Hasil *Mesh* Prostesis



Gambar 4. Hasil mesh prostesis (*Element quality*)

Gambar 4 menunjukkan hasil *mesh* yang digunakan. Nilai *element quality* dari mesh memiliki rentang 0.4-1.0 dimana semakin mendekati 1 semakin baik. Untuk *skewness*-nya memiliki rentang 0.00-0.61 dimana semakin mendekati 0 semakin baik. Untuk nilai *aspect ratio* memiliki rentang 5.0-1.2 dimana semakin mendekati 1 semakin baik.

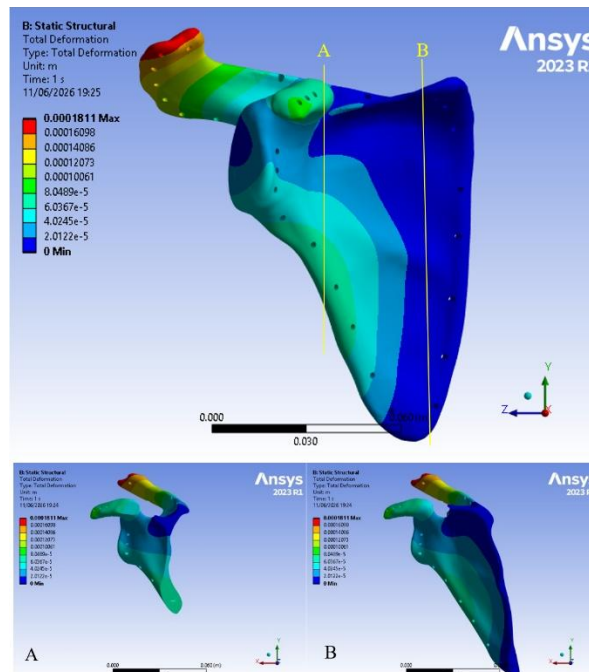
b. Hasil Tegangan Ekuivalen von-Mises



Gambar 5. Tegangan ekuivalen von-Mises dengan potongan A dan B

Gambar 5 menunjukkan hasil tegangan ekuivalen von-Mises dari uji FEA prosthesis. Hasil tersebut menunjukkan nilai tegangan ekuivalen von-Mises dengan rentang 526Pa-144 MPa. Dari visualisasi peta kontur dapat dilihat bahwa tegangan terfokus ke sebagian daerah kecil (dominan warna biru tua).

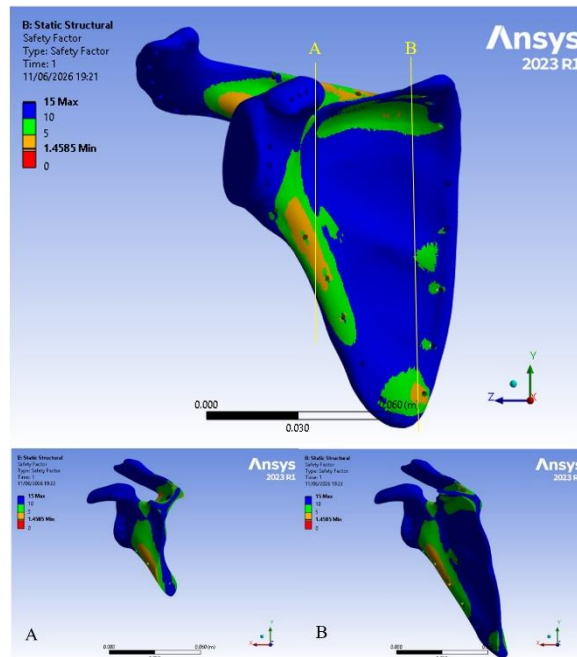
c. Hasil Deformasi Total



Gambar 6. Deformasi total dengan potongan A dan B

Gambar 6 menunjukkan hasil deformasi total dari uji FEA prosthesis. Hasil tersebut menunjukkan nilai deformasi total dengan rentang 0-0.2 mm. Dari visualisasi peta kontur dapat dilihat bahwa deformasi terbesar terletak pada bagian akromion skapula.

d. Hasil Faktor Keamanan Prostesis



Gambar 7. Nilai faktor keamanan dengan potongan A dan B

Gambar 7 menunjukkan hasil faktor keamanan dari uji FEA prostesis. Hasil tersebut menunjukkan nilai faktor keamanan dengan rentang 1.5-15. Dari visualisasi peta kontur dapat dilihat sebagian besar prostesis memiliki faktor keamanan yang tinggi ditandai dengan bagian berwarna hijau dan biru.

Tabel 1. Hasil simulasi FEM penelitian

Hasil Uji FEA	Nilai
Tegangan maksimum (MPa)	144
Tegangan minimum (Pa)	526
Deformasi maksimum (mm)	0.2
Deformasi minimum (mm)	0
Faktor keamanan maksimum	15
Faktor keamanan minimum	1.5

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengevaluasi prostesis skapula kustom untuk pasien orang Indonesia yang didiagnosis menderita sarkoma tulang menggunakan pendekatan FEA. Geometri prostesis direkonstruksi secara anatomis dari data citra CT berformat DICOM melalui metode segmentasi dan *mirroring* skapula sehat, menghasilkan model yang representatif terhadap anatomi asli pasien. Kualitas *mesh* yang dihasilkan tergolong sangat baik dengan nilai *element quality* pada rentang 0,4–1,0, *skewness* 0,00–0,61, dan *aspect ratio* 1,2–5,0, sehingga validitas hasil simulasi dapat dipertanggungjawabkan secara numerik.

Hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa tegangan ekuivalen von-Mises maksimum yang terjadi pada prostesis adalah sebesar 144 MPa, nilai ini masih berada di bawah kuat luluh material Stainless Steel 316L sebesar 210 MPa, sehingga dapat dikonfirmasi bahwa material tidak mengalami kegagalan plastis di bawah kondisi pembebanan yang diujikan. Deformasi total maksimum yang terjadi adalah 0,2 mm dengan konsentrasi deformasi terbesar terletak pada area akromion skapula, yang secara anatomis merupakan ujung bebas prostesis yang menerima momen lentur paling besar.

Faktor keamanan minimum prostesis tercatat sebesar 1,5 dengan sebagian besar area prostesis menunjukkan nilai faktor keamanan yang jauh lebih tinggi, sebagaimana ditunjukkan oleh dominasi warna hijau dan biru pada peta kontur visualisasi. Hal ini mengindikasikan bahwa desain prostesis skapula berbahan Stainless Steel 316L secara keseluruhan aman secara mekanis terhadap risiko kegagalan struktural pada kondisi pengangkatan beban 2 kg secara lateral pada sudut elevasi 90°. Meskipun demikian, area akromion skapula tetap teridentifikasi sebagai daerah kritis yang perlu mendapat perhatian lebih dalam pengembangan desain selanjutnya, baik melalui penguatan geometri lokal maupun optimasi topologi, guna meningkatkan margin keamanan pada titik konsentrasi tegangan dan deformasi tersebut.

5. Daftar Pustaka

- [1] Słodkowski M, Wroński M, Karkocha D, Kraj L, Śmigielska K, Jachnis A. Current Approaches for the Curative-Intent Surgical Treatment of Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *Cancers (Basel)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/cancers15092584>.
- [2] Linghu E. A new stage of surgical treatment: super minimally invasive surgery. *Chin Med J (Engl)* 2022;135:1–3. <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000001534>.
- [3] Goetti P, Denard PJ, Collin P, Ibrahim M, Hoffmeyer P, Lädermann A. Shoulder biomechanics in normal and selected pathological conditions. *EFORT Open Rev* 2020;5:508–18. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.5.200006>.
- [4] Rinderknecht L, Fernandez A, Houpin C, Sirveaux F, Peduzzi L. Reconstruction après scapulectomie subtotale pour tumeur : description d’une technique d’arthrodèse acromio-humérale et revue de cas 2026;112:65–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcot.2025.10.004>.
- [5] Bianchi G, Benedetti MG, Bardelli R, Platano D, Laranga R, Tuzzato G. Three-Dimensional Printed Custom-Made Prostheses after Partial Scapulectomy: A Case Report. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023;13. <https://doi.org/10.3390/app13127056>.
- [6] Zhou L, Miller J, Vezza J, Mayster M, Raffay M, Justice Q, Al Tamimi Z, Hansotte G, Sunkara LD, Bernat J. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors* 2024;24. <https://doi.org/10.3390/s24092668>.
- [7] Teo AQA, Ng DQK, Lee P, O’Neill GK. Point-of-Care 3D Printing: A Feasibility Study of Using 3D Printing for Orthopaedic Trauma. *Injury* 2021;52:3286–92. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.02.041>.
- [8] Zeng W, Lewicki KA, Chen Z, Van Citters DW. The evaluation of reverse shoulder lateralization on deltoid forces and scapular fracture risk: A computational study. *Med Nov Technol Devices* 2021;11. <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2021.100076>.
- [9] Desktop Metal. Materials for all of your applications. Desktop Metal 2026. <https://www.desktopmetal.com/materials> (accessed April 30, 2026).
- [10] Ma C, Du T, Niu X, Fan Y. Biomechanics and mechanobiology of the bone matrix. *Bone Res* 2022;10. <https://doi.org/10.1038/s41413-022-00223-y>.