



ANALISIS BIOMEKANIK KAKI PALSU TIRUAN JENIS *ENERGY STORING AND RECOVERY* (ESR) DENGAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS*

Yulia Venti Yoanita¹, Dhananjaya YH Kumarajati^{2a}, Hasti Hasanati Marfuah³

¹Program Studi Pendidikan Vokasional Teknologi Otomotif, FKIP, UPY

²Program Studi Teknik Biomedis, FST, UPY

³Program Studi Teknik Industri, FST, UPY

Korespondensi:

^aProgram Studi Program Studi Teknik Biomedis, FST, UPY

dhananjaya@upy.ac.id

ABSTRAK

Kaki palsu perlu dirancang agar nyaman digunakan sepanjang hari, termasuk pemilihan bahan yang lembut dan tahan lama untuk bagian yang bersentuhan dengan kulit serta keseimbangan yang baik antara dukungan struktural dan fleksibilitas. Pasien yang mengalami amputasi kaki menghadapi tantangan mobilitas dalam kehidupan sehari-hari, dan salah satu alat bantu gerak yang efisien dan dapat digunakan secara mandiri adalah kaki palsu. Ada berbagai jenis cacat dan kebutuhan kaki palsu, termasuk cacat pada bagian bawah atau telapak kaki. Di Indonesia, kaki palsu yang tersedia sejauh ini lebih cenderung bersifat konvensional dan tidak memberikan sensasi berjalan seolah-olah seperti orang normal. Oleh karena itu, ada kebutuhan untuk mengembangkan jenis kaki palsu yang dikenal sebagai ESR (*Energy Stock and Recovery*) yang dapat memberikan pengalaman berjalan yang lebih mirip dengan orang normal. Kaki palsu ESR mampu menyimpan dan mengembalikan energi melalui mekanisme pegas. Metode penelitian yang akan diambil termasuk studi literatur dan referensi desain untuk melakukan reverse engineering, proses desain 3D dengan penerapan prinsip ergonomi, analisis biomekanik menggunakan metode *finite elemen analysis*. Analisis biomekanik dilakukan dengan memberikan tekanan sebesar 500 N, 700 N, 900 N dan 1100 N. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain kaki palsu yang dikembangkan mampu menopang beban tubuh manusia dengan baik.

Kata kunci: *reverse engineering, ESR, rapid prototyping,*

ABSTRACT

Prosthetic limbs need to be designed for all-day comfort, including the selection of soft and durable materials for parts that come into contact with the skin, as well as a balanced combination of structural support and flexibility. Patients who have undergone lower limb amputations face mobility challenges in their daily lives, and one efficient and self-reliant mobility aid is the prosthetic limb. Various types of disabilities and needs exist when it comes

to prosthetic limbs, including those affecting the lower limb or foot. In Indonesia, the prosthetic limbs available in the market have predominantly been of a conventional nature, lacking the ability to provide a walking experience that closely resembles that of an able-bodied person. Hence, there is a necessity to develop a type of prosthetic limb known as the ESR (Energy Storing and Recovery) limb, which can offer a walking experience more akin to that of an able-bodied individual. ESR prosthetic limbs are capable of storing and returning energy through a spring mechanism. The research methodology to be employed includes a literature review and reference design for reverse engineering, a 3D design process with the application of ergonomic principles, and biomechanical analysis using the finite element analysis method. Biomechanical analysis will involve subjecting the prosthetic limb to pressures of 500N, 700N, 900N, and 1100N. The research findings demonstrate that the developed prosthetic limb design is capable of adequately supporting the human body's weight.

Keywords: reverse engineering, ESR, rapid prototyping,

1. PENDAHULUAN

Pasien yang telah menjalani amputasi menghadapi berbagai tantangan dalam kehidupan sehari-hari, terutama terkait dengan masalah mobilitas [1]. Untuk mengatasi masalah mobilitas, pasien dapat menggunakan berbagai alat bantu seperti kursi roda, alat bantu berjalan, kruk, dan prosthesis [2]. Setiap alat bantu memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Misalnya, kursi roda dan alat bantu berjalan menawarkan keamanan yang lebih tinggi dalam hal mobilitas, sedangkan kruk dan prosthesis lebih praktis dan memungkinkan gerakan yang lebih fleksibel, termasuk aktivitas seperti naik tangga [3]. Kemampuan beragam inilah yang telah mendorong penelitian yang luas dalam pengembangan prosthesis [4].

Prosthesis dirancang untuk mereplikasi karakteristik dari anggota tubuh yang utuh, terutama dalam meniru proses berjalan dan berlari [5]. Gerakan kaki dan prosthesis memiliki peran penting ketika pasien bergerak, yang berkontribusi pada keseimbangan dan memberikan dukungan saat berdiri [6]. Gerakan pada prosthesis memungkinkan mobilitas kaki atas dan bawah, sehingga memungkinkan berjalan dan berbagai aktivitas lainnya.

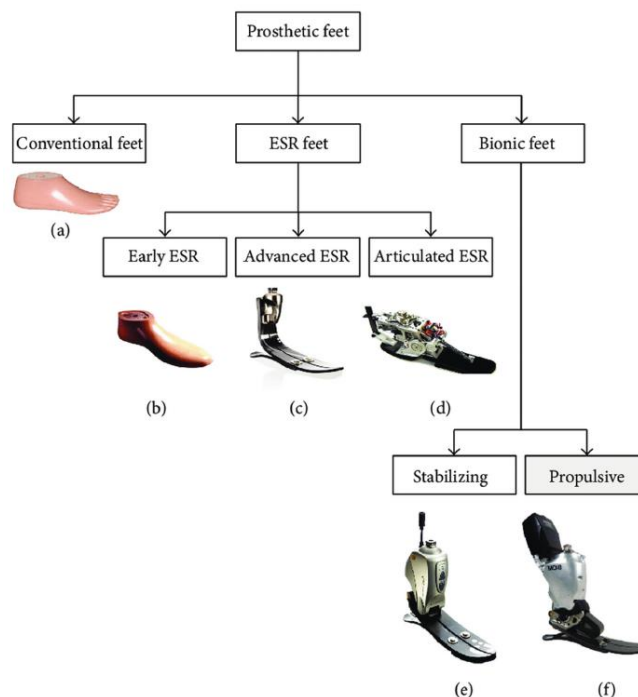
Desain prosthesis yang efektif harus mencoba meniru karakteristik dari anggota tubuh yang sehat [7]. Saat ini, ada berbagai jenis dan bentuk prosthesis yang tersedia di pasaran, mulai dari desain yang sepenuhnya mekanik [8] hingga yang lebih canggih yang dikendalikan oleh mikroprosesor [9]. Biasanya, prosthesis mekanik menekankan mobilitas tinggi namun mungkin memiliki stabilitas yang lebih rendah [10]. Inilah di mana peran prosthesis terletak dalam membantu pasien menemukan keseimbangan yang sesuai melalui koordinasi dengan gerakan otot mereka. Jenis prosthesis yang umum dapat diringkas menjadi kaki konvensional dengan *solid ankle cushion heel* (SACH) [10], *Energy Storing and Recovery* (ESR) [11], dan Kaki Bionik [9].

Kaki palsu SACH [12] adalah jenis yang paling dasar dan tersedia secara luas di pasar Indonesia. Mereka dikenal karena kekokohnya, harganya yang terjangkau, ketersediaannya yang baik, dan perawatannya yang mudah. Namun, mereka memiliki rentang gerakan yang sangat terbatas, kurang memiliki gerakan mekanik pada sendi pergelangan kaki, dan tidak memberikan dukungan pegas yang cukup, sehingga memberikan pengalaman yang kurang alami dibandingkan dengan kaki normal [1].

Kaki palsu ESR (*Energy Storing and Recovery*) dikembangkan sebagai respons terhadap keinginan pasien untuk pengalaman berjalan yang lebih alami, pengurangan pengeluaran energi metabolik, dan bahkan kemampuan untuk berolahraga pada beberapa kesempatan [8] [13]. Jenis prosthesis ini memiliki komponen mekanis yang sedikit lebih kompleks dibandingkan dengan prosthesis konvensional karena perlu menyimpan dan melepaskan energi melalui mekanisme mirip pegas [14]. Karena fitur mekanis ini, kaki palsu ESR relatif lebih mahal daripada model konvensional [14].

Kaki palsu Bionik menggabungkan anggota mekanik dengan sistem robotik yang dikomputerisasi, memungkinkan mereka meniru gerakan alami seseorang, menjaga keseimbangan, dan memberikan pasien rentang gerakan yang lebih normal [15]. Kaki Bionik yang lebih canggih bahkan dilengkapi dengan umpan balik sensorik di ujung jari kaki, memberikan sensasi kepada pasien seperti memiliki kaki normal [16].

Penggunaan prosthesis di Indonesia sangat berkaitan dengan kapasitas ekonomi, yang menjelaskan prevalensi prosthesis konvensional dibandingkan dengan jenis lainnya. Misalnya, prosthesis Bionik dapat berharga puluhan hingga ratusan juta rupiah dan seringkali hanya tersedia melalui impor, sehingga menjadi pilihan yang jarang ditemui. Kaki palsu jenis ESR adalah pilihan yang cocok untuk dikembangkan di Indonesia karena dapat digunakan oleh berbagai kelompok, mulai dari individu biasa hingga atlet. Namun, harga kaki palsu ESR masih lebih tinggi daripada kaki palsu konvensional.

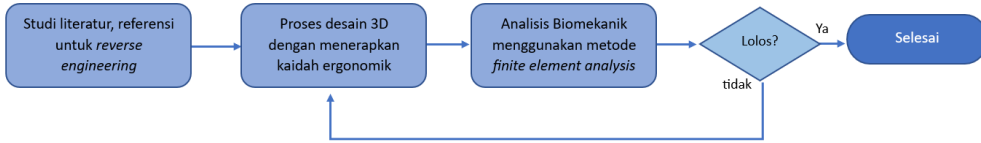


Gambar 1. Jenis jenis kaki palsu [9], [14]

Penelitian ini menggunakan metode *reverse engineering* [17], yaitu menganalisa desain kaki palsu ESR yang telah dikembangkan di luar negeri, dan dari hasil analisis tersebut kemudian dikembangkan kaki palsu ESR dan diuji kekuatannya menggunakan metode *finite element analysis* melalui pembebanan sebesar 500 N, 700 N, 900 N, dan 1100 N.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang akan digunakan dalam proses desain dan analisis kaki palsu ini akan mengikuti pendekatan *reverse engineering*, yaitu mendesain ulang, produk kaki palsu ESR yang telah ada, dan memberikan nilai tambah pada desain tersebut. Langkah selanjutnya dalam proses *reverse engineering* adalah mencari referensi mengenai kaki palsu yang telah ada di luar negeri, namun belum dikembangkan di Indonesia. Dari referensi ini, akan dikembangkan desain 3D menggunakan perangkat lunak perancangan, yaitu *Solidworks 2018*. Proses desain ini akan mematuhi prinsip ergonomi, dan dimensi kaki palsu akan disesuaikan dengan ukuran kaki orang Indonesia dalam rentang usia 17 hingga 22 tahun.



Gambar 2. Metode Penelitian

Setelah desain hasil *reverse engineering* selesai, akan dilakukan analisis biomekanik menggunakan metode *finite element analysis*. Analisis ini juga akan menggunakan aplikasi yang sama dengan proses desain sebelumnya. Tujuan analisis ini adalah untuk mengevaluasi struktur desain secara digital dan mensimulasikan bagaimana struktur desain akan bereaksi terhadap beban tertentu. Beban yang akan diterapkan pada desain tersebut adalah sebesar 500 N, 700 N, 900 N, dan 1100 N. Analisis ini akan membantu memahami sejauh mana desain kaki palsu dapat menangani beban yang diberikan. Detail prosedur simulasi FEA tercantum pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Tabel 1. Sifat mekanis PLA yang digunakan dalam analisis

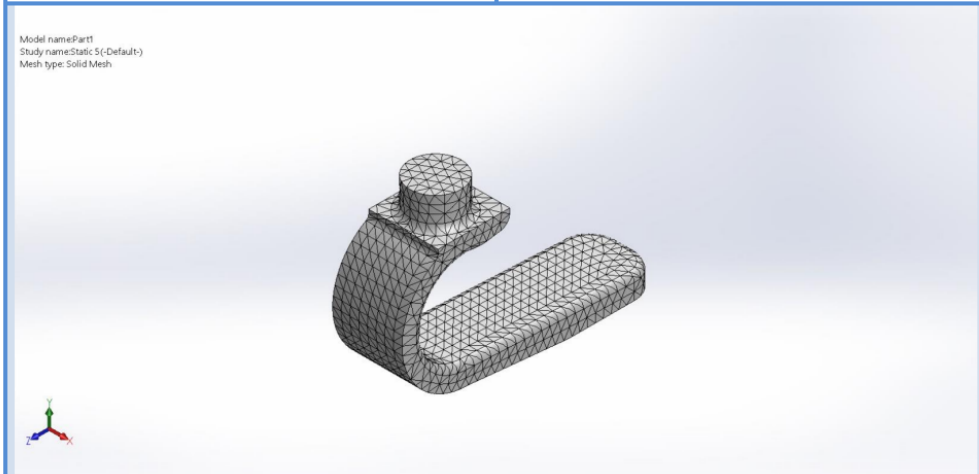
Parameter	Besaran
Elastic Modulus (GPa)	2,3
Densitas (kg/m ³)	1060
Tensile Strength (MPa)	50

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Fillet5	Solid Body	Mass:0.652792 kg Volume:0.000615843 m ³ Density:1060 kg/m ³ Weight:6.39736 N	C:\Users\OWNER\OneDrive\UPY\Penelitian\DRPM\Part1.SLDprt Sep 2 13:05:06 2023

Gambar 3. Informasi model

Mesh information - Details

Total Nodes	12699
Total Elements	7778
Maximum Aspect Ratio	7.0915
% of elements with Aspect Ratio < 3	99.4
% of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:01
Computer name:	

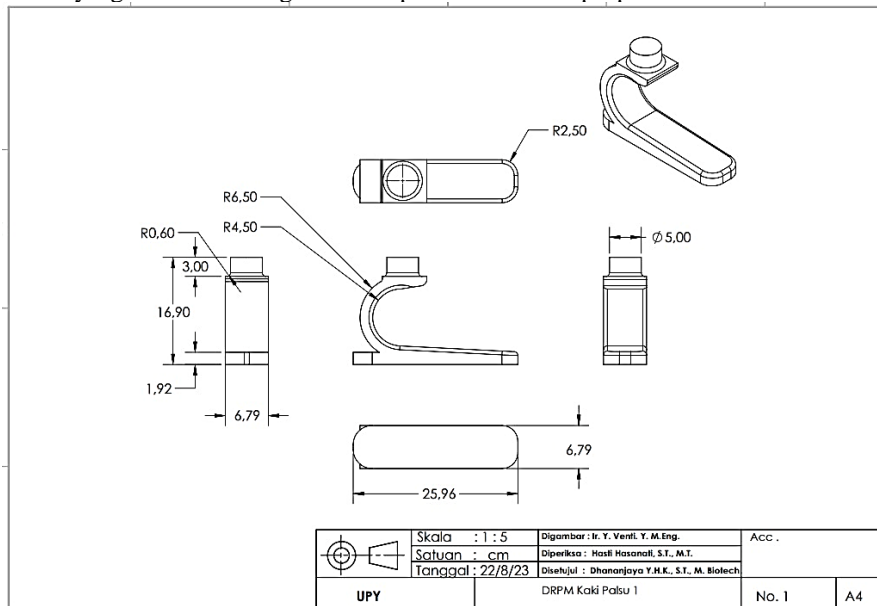


Gambar 4. Detail informasi mesh model

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Desain

Desain yang telah dikembangkan dalam penelitian ini terdapat pada Gambar 5.

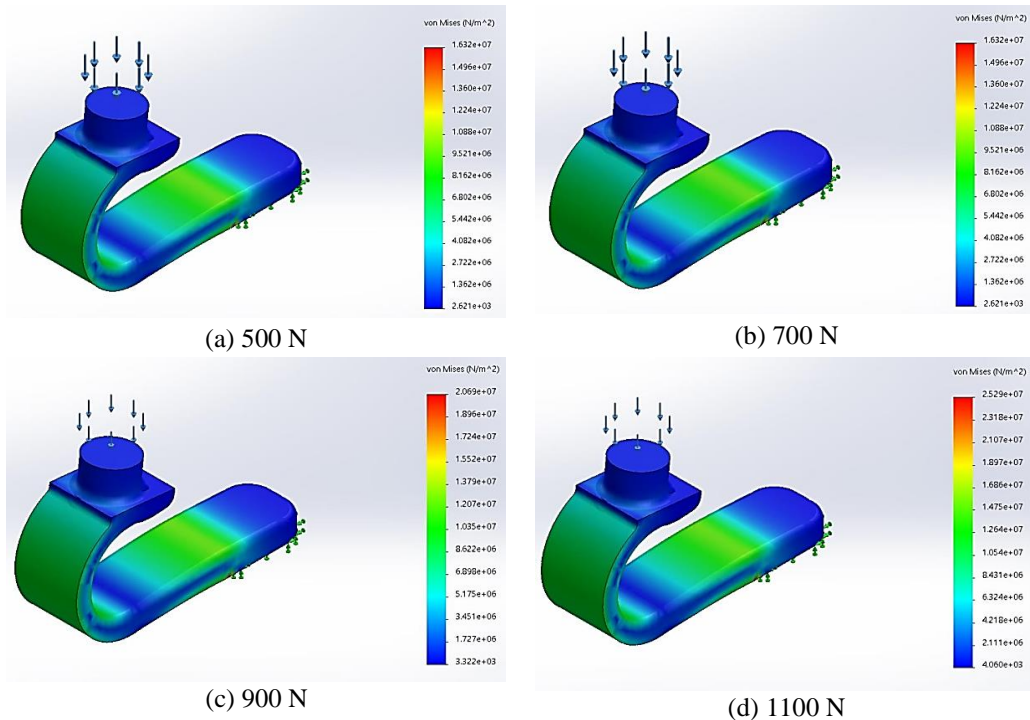


Gambar 5. Desain kaki palsu yang digunakan dalam analisis

3.1 Pengujian Biomekanik

Hasil pengujian *finite element analysis* yang telah dilakukan terbagi menjadi beberapa jenis pengujian, yaitu *static stress* (Gambar 4). Gambar 4 menunjukkan bahwa distribusi *von-mises stress* terpusat pada bagian lengkungan dari desain, dengan gaya yang diberikan masing masing desain sebesar 500 N, 700 N, 900 N, dan 1100 N.

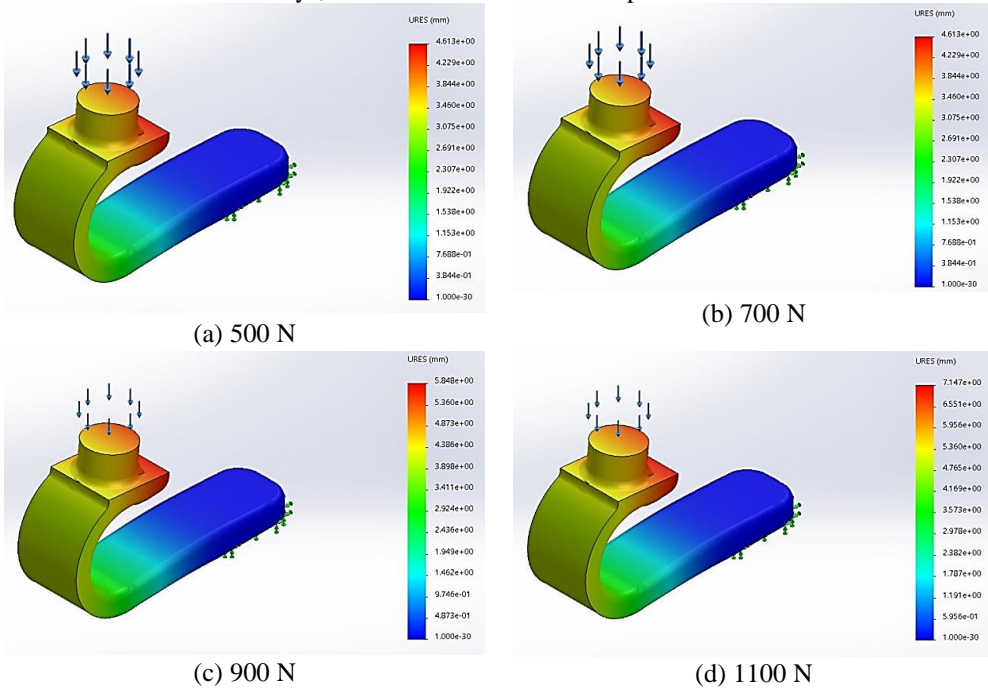
Gambar 6 (a) menunjukkan nilai maksimum *von-mises stress* adalah sebesar 16,32 MPa dan nilai minimumnya adalah sebesar $2,621 \times 10^{-3}$ MPa. Hasil pembebanan sebesar 700 N, menghasilkan nilai *von-mises stress* yang tidak terlalu jauh beda dengan hasil pembebanan 500 N, yaitu nilai maksimumnya adalah 16,32 MPa dan nilai minimumnya adalah sebesar $2,621 \times 10^{-3}$ MPa. Pada Gambar 6 (d) yaitu untuk pembebanan 1100 N konsentrasi tegangan *von-mises stress* maksimum adalah sebesar 25,29 MPa dan minimum sebesar $4,06 \times 10^{-3}$ MPa. Apabila dibandingkan dengan sifat mekanis yang PLA (Tabel 1.) yaitu memiliki *tensile strength* sebesar 50 MPa, menunjukkan bahwa desain mampu menahan beban 1100 N dengan faktor keamanan hampir dua kali. Beban 1100 N yaitu seberat 112,17 kg.



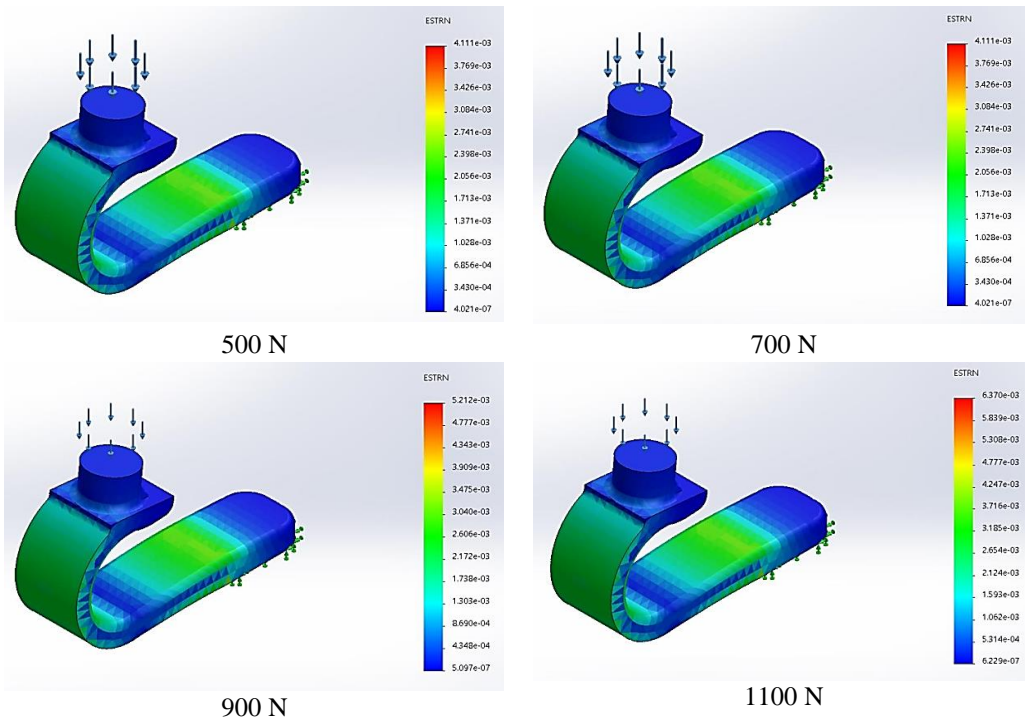
Gambar 6. *Static stress* pada Desain Kaki Palsu

Displacement pada kaki palsu adalah proses kritis dalam perawatan prostetik yang melibatkan penyesuaian dan pengaturan ulang kaki palsu sesuai dengan kebutuhan individu. Penyesuaian awal oleh ahli prostetik atau teknisi prostetik yang terampil, yang melakukan pengukuran yang teliti dan memastikan kaki palsu cocok dengan anatomi pengguna. Perubahan dalam postur tubuh atau berat badan dapat memengaruhi kinerja kaki palsu, sehingga diperlukan proses *displacement* lanjutan. Ini melibatkan penyesuaian ulang atau penggantian komponen-komponen tertentu dari kaki palsu agar tetap nyaman dan efektif. *Displacement* membantu memastikan bahwa pengguna kaki palsu dapat menjalani kehidupan yang aktif dan nyaman dengan tingkat mobilitas yang optimal.

Gambar 7 (d) menunjukkan bahwa *displacement* maksimum dari desain adalah sebesar 7 mm. Nilai ini cukup besar akan tetapi nilai ini masih dalam batas strainnya sehingga desain akan mampu untuk kembali ke bentuk asalnya, atau tidak terdeformasi secara permanen.



Gambar 7. Displacement pada desain kaki palsu



Gambar 8. Strain pada desain kaki palsu

4. KESIMPULAN

Hasil analisis biomekanis menunjukkan bahwa desain kaki palsu ESR yang telah dikembangkan mampu untuk menahan beban hingga 1100 N atau 112,17 kg dengan faktor keamanan dua kali yang merupakan beban di atas rata-rata berat tubuh orang dewasa. Dari hasil analisis juga menunjukkan bahwa desain mampu kembali ke bentuk semula dengan *displacement* maksimum sebesar 7 mm. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah agar dibuatkan uji perbandingan beberapa desain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Jin *et al.*, “Design of a Flexible Bionic Ankle Prosthesis Based on Subject-specific Modeling of the Human Musculoskeletal System,” *J Bionic Eng*, vol. 20, no. 3, pp. 1008–1020, May 2023, doi: 10.1007/s42235-022-00325-7.
- [2] N. Sahoo, H.-W. Lin, and Y.-H. Chang, “Design and implementation of a walking stick aid for visually challenged people,” *Sensors*, vol. 19, no. 1, p. 130, 2019.
- [3] S. B. Thies *et al.*, “Are older people putting themselves at risk when using their walking frames?,” *BMC Geriatr*, vol. 20, no. 1, p. 90, Dec. 2020, doi: 10.1186/s12877-020-1450-2.
- [4] H. Xiu *et al.*, “Design, development, and clinical validation of a two degrees of freedom compliant ankle-foot prosthesis based on a 4-4r parallel mechanism,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 172, p. 104818, 2022.
- [5] X. Xu, X. Xu, Y. Liu, K. Zhong, and H. Zhang, “Design of bionic active–passive hybrid-driven prosthesis based on gait analysis and simulation of compound control method,” *BioMed Eng OnLine*, vol. 20, no. 1, p. 126, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12938-021-00962-9.
- [6] D. Chen *et al.*, “Bring gait lab to everyday life: Gait analysis in terms of activities of daily living,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 1298–1312, 2019.
- [7] B. S. Vinay *et al.*, “Design and structural analysis of a passive ankle-foot prosthesis with manually adjustable stiffness and having two degrees of freedom,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 65, pp. 3496–3505, 2022.
- [8] O. William, A. Godwin, M. Promise, and U. Promise, “Comparative Analysis of a Locally Fabricated SACH Foot and a Foreign SACH Foot,” *Open Access Library Journal*, vol. 9, no. 10, pp. 1–8, 2022.
- [9] O. A. Chiriac and D. Bucur, “From Conventional Prosthetic Feet to Bionic Feet. A Review,” in *Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics - 2020*, vol. 143, G. I. Gheorghe, Ed., in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 143., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 130–138. doi: 10.1007/978-3-030-53973-3_14.
- [10] T. M. Balaramakrishnan, S. Natarajan, and S. Sujatha, “Design of a Biomimetic SACH Foot: An Experimentally Verified Finite Element Approach,” *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, vol. 45, pp. 22–30, 2020.
- [11] J. Tabucol *et al.*, “The Functionality Verification through Pilot Human Subject Testing of MyFlex- δ : An ESR Foot Prosthesis with Spherical Ankle Joint,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 9, p. 4575, 2022.
- [12] J. K. Olewi and A. N. Hadi, “Properties of Materials and Models of Prosthetic Feet: A Review,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1094, no. 1, p. 012151, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1094/1/012151.
- [13] P. Chauhan, A. K. Singh, and N. K. Raghuvanshi, “The state of art review on prosthetic feet and its significance to imitate the biomechanics of human ankle-foot,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 6364–6370, 2022.
- [14] K. K. Resan, E. A. Abbod, and T. K. Al-Hamdi, “Prosthetic feet: A systematic review of types, design, and characteristics,” in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing,

2023. Accessed: Oct. 01, 2023. [Online]. Available:
<https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2806/1/060005/2908947>
- [15] A. F. Azocar, L. M. Mooney, J.-F. Duval, A. M. Simon, L. J. Hargrove, and E. J. Rouse, “Design and clinical implementation of an open-source bionic leg,” *Nature biomedical engineering*, vol. 4, no. 10, pp. 941–953, 2020.
- [16] A. R. Ismawan, T. Prahasto, M. Ariyanto, B. Setiyana, and R. Novriansyah, “A Review of Existing Transtibial Bionic Prosthesis: Mechanical Design, Actuators and Power Transmission,” *Journal of Biomedical Science and Bioengineering*, vol. 1, no. 2, pp. 65–72, 2022.
- [17] M. Jiang and J. Zhang, “An investigation into the effect of cross-ply on energy storage and vibration characteristics of carbon fiber lattice sandwich structure bionic prosthetic foot,” *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 30, no. 1, p. 20220206, Jun. 2023, doi: 10.1515/secm-2022-0206.