

Desain Inovatif Kaki Palsu *Low Cost* : Pendekatan *Finite Element Analysis*

Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati

Program Studi Teknik Biomedis, Universitas PGRI Yogyakarta

e-mail: dhananjaya@upy.ac.id

Intisari

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan desain kaki palsu inovatif yang terjangkau melalui pendekatan *Finite Element Analysis* (FEA). Kehilangan anggota gerak bawah merupakan masalah serius bagi banyak individu, dan kaki palsu menjadi solusi umum, namun biaya tinggi dan kurangnya ketersediaan desain yang efektif merupakan hambatan besar. Metode penelitian melibatkan studi literatur tentang kaki palsu, pemodelan kaki palsu, dan FEA. Pada penelitian ini memodelkan geometri kaki palsu menggunakan fusion 360, menerapkan FEA untuk memahami perilaku mekaniknya, dan mengoptimalkan desain berdasarkan hasil analisis. Pengujian FEA menunjukkan bahwa desain kaki palsu yang diusulkan mampu menahan beban 1000N dengan *safety factor* minimum sebesar 3,64. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa desain kaki palsu yang dihasilkan dapat menjadi solusi yang efektif dan terjangkau bagi individu yang membutuhkan, dengan potensi untuk meningkatkan kualitas hidup dan mobilitas.

Kata kunci—FEA, kaki palsu

Abstract

This research aims to develop an affordable, innovative prosthetic leg design using a Finite Element Analysis (FEA) approach. Lower limb loss is a serious problem for many individuals, and prosthetic limbs are becoming a common solution, but the high cost and lack of availability of effective designs are major obstacles. The research method involved a literature study on prosthetic limbs, prosthetic limb modeling, and FEA. In this research, we model the geometry of a prosthetic leg using 360 fusion, apply FEA to understand its mechanical behavior, and optimize the design based on the analysis results. FEA testing shows that the proposed prosthetic leg design is capable of withstanding a load of 1000N with a minimum safety factor of 3.64. The results of this research indicate that the resulting prosthetic leg design can be an effective and affordable solution for individuals in need, with the potential to improve quality of life and mobility.

Keywords— FEA, foot prosthetic

PENDAHULUAN

Kehilangan anggota gerak bawah merupakan tantangan yang serius bagi banyak individu di seluruh dunia [1]. Akibat dari kecelakaan, penyakit, atau bencana alam, banyak orang yang mengalami kehilangan kemampuan untuk berjalan dengan normal [2]. Untuk mengatasi hal ini, kaki palsu menjadi salah satu solusi yang paling umum digunakan [3]. Kaki palsu adalah perangkat medis yang dirancang untuk menggantikan fungsi kaki yang hilang, memberikan dukungan saat berjalan, dan memungkinkan pengguna untuk menjalani kehidupan yang lebih mandiri dan aktif [4].

Meskipun kaki palsu telah menjadi bagian penting dari rehabilitasi dan pemulihan bagi banyak individu, masih ada sejumlah tantangan yang perlu diatasi dalam pengembangan dan penggunaannya. Salah satu masalah utama yang dihadapi adalah biaya tinggi dari kaki palsu yang berkualitas baik [5]. Untuk banyak orang, biaya yang tinggi ini menjadi hambatan yang signifikan dalam mengakses perangkat yang mereka butuhkan. Selain itu, desain kaki palsu yang tersedia saat ini mungkin tidak sepenuhnya ergonomis [6], dapat mengakibatkan ketidaknyamanan bagi pengguna, atau bahkan masalah kesehatan jangka panjang. Bahan yang kurang tahan lama juga dapat mengakibatkan kaki palsu memerlukan penggantian yang sering, menambah biaya jangka panjang untuk pengguna.

Kendati demikian, ada harapan besar untuk mengatasi tantangan-tantangan ini melalui inovasi teknologi. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah dengan menggunakan analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEM*) dalam pengembangan desain kaki palsu [7]. FEA adalah metode numerik yang kuat yang digunakan untuk memecahkan persamaan diferensial parsial yang muncul dalam masalah rekayasa dan matematika fisika [8]. Metode ini telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang, termasuk dalam desain struktur dan perangkat medis, karena kemampuannya untuk menganalisis perilaku material dan struktur dalam kondisi beban yang berbeda [9].

Dalam konteks kaki palsu, FEA dapat digunakan untuk menganalisis berbagai fenomena fisik yang terjadi pada kaki palsu, termasuk tegangan, deformasi, kekuatan, kekakuan, dan faktor keamanan [10]. Dengan memahami lebih baik bagaimana kaki palsu berperilaku dalam berbagai situasi, desain dapat dioptimalkan untuk meningkatkan kinerja, kenyamanan, dan daya tahan. Dengan demikian, penggunaan FEA [11] dalam pengembangan kaki palsu dapat membuka jalan menuju perangkat yang lebih efektif dan terjangkau bagi individu yang membutuhkannya [12].

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan desain inovatif kaki palsu dengan pendekatan FEA yang dapat mengatasi beberapa masalah yang dihadapi oleh kaki palsu konvensional [13]. Desain yang diusulkan diharapkan dapat memberikan kinerja dan kenyamanan yang lebih baik bagi pengguna, serta memiliki biaya produksi dan perawatan yang lebih rendah [14].

Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan kontribusi pada perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang ortopedi dan biomekanik. Dengan memperluas pemahaman kita tentang desain kaki palsu dan menerapkan teknologi terbaru dalam pengembangannya, kita dapat memberikan solusi yang

lebih baik bagi individu yang mengalami kehilangan anggota gerak bawah, meningkatkan kualitas hidup mereka, dan memungkinkan mereka untuk hidup secara lebih mandiri dan produktif.

METODE PENELITIAN

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah melakukan studi literatur yang mendalam tentang kaki palsu, teknologi terkini dalam desain kaki palsu, serta konsep dasar dan aplikasi *Finite Element Analysis* (FEA). Studi literatur ini akan memberikan pemahaman yang mendalam tentang kondisi terkini dalam pengembangan kaki palsu dan metode analisis numerik yang relevan. Dari studi literatur ini akan didapatkan desain – desain rujukan yang akan digunakan sebagai dasar dalam proses desain dan pemodelan.

Proses desain dan pemodelan dilakukan dengan menggunakan aplikasi fusion 360. Faktor yang menjadi bahan pertimbangan dalam proses desain adalah, kaki palsu akan diproduksi melalui metode *3D printing*, menggunakan material sesedikit mungkin untuk menghasilkan produk dengan biaya rendah. Ukuran kaki palsu berdasarkan ukuran antropometri orang Indonesia dengan rentang usia 20 – 25 tahun.

Tabel 1. Antropometri Orang Indonesia dengan rentang usia 20-25 tahun

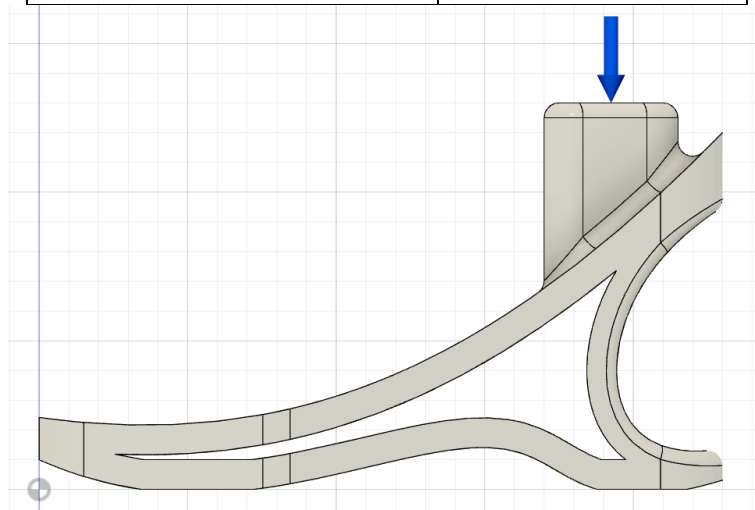
No.	Data Yang Diukur	Ukuran Persentil 90 (dalam cm)	<i>Allowance</i> (dalam cm)
1.	Panjang telapak kaki (ptk)	25,96	0,04
2.	Panjang telapak lengan kaki (ptlk)	21,93	0,07
3.	Panjang kaki sampai jari kelingking (pkjk)	21,65	0,35
4.	Lebar kaki (lk)	10,03	0,02
5.	Lebar tangkai kaki (ltk)	6,79	0,21
6.	Tinggi mata kaki (tmk)	9,52	0,08
7.	Tinggi bagian tengahtelapak kaki (tttk)	8,65	0,35
8.	Jarak horisontal tangkaimata kaki (jtmk)	5,42	0,58

Desain model kaki palsu tersebut kemudian dilakukan analisis *finite element analysis* (FEA), dengan material yang digunakan adalah PLA (*Polylactic Acid*). Sifat mekanis dari PLA tersebut terdapat pada Tabel 2. Analisis FEA menggunakan beban sebesar 1000N yang diarahkan secara uniaxial. Analisis ini memodelkan posisi *midstance* dalam *gait cycle* manusia berjalan (Gambar 1). Data deformasi, faktor keamanan, dan tegangan *von-mises* kemudian didapatkan dari hasil analisis ini. Data yang didapatkan tersebut kemudian dibandingkan dengan kemampuan tubuh dalam menerima beban.

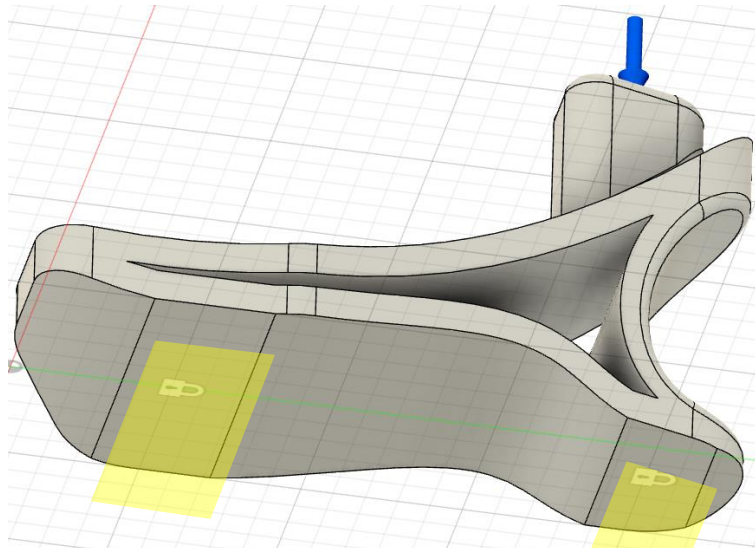
**Desain Inovatif Kaki Palsu Low Cost : Pendekatan Finite Element Analysis
(Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati)**

Tabel 2. Sifat Mekanis PLA

<i>Density</i>	1.060E-06 kg / mm ³
<i>Young's Modulus</i>	2240.00 MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0.38
<i>Yield Strength</i>	20.00 MPa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	29.60 MPa
<i>Thermal Conductivity</i>	1.600E-04 W / (mm C)
<i>Thermal Expansion Coefficient</i>	8.570E-05 / C
<i>Specific Heat</i>	1500.00 J / (kg C)



Gambar 1. Posisi Pembebanan sebesar 1000N



Gambar 2. Posisi *Constrain* pada model desain

Analysis FEA dilakukan dengan melakukan *meshing* terlebih dahulu terhadap model desain. Untuk data *meshing* model 3D kaki palsu terdapat pada

Tabel 3. Data *meshing* ini yang akan menjadi dasar dalam proses analisis numerik pada *Analysis FEA*.

Tabel 3. Data *Meshing* dari Model 3D

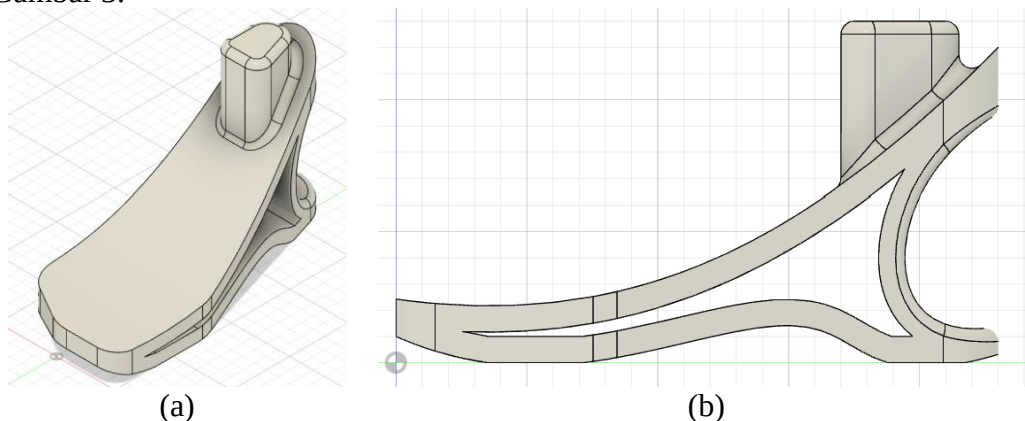
Average Element Size (% of model size)	
<i>Solids</i>	10
<i>Scale Mesh Size Per Part</i>	No
<i>Average Element Size (absolute value)</i>	-
<i>Element Order</i>	<i>Parabolic</i>
<i>Create Curved Mesh Elements</i>	<i>Yes</i>
<i>Max. Turn Angle on Curves (Deg.)</i>	60
<i>Max. Adjacent Mesh Size Ratio</i>	1.5
<i>Max. Aspect Ratio</i>	10
<i>Minimum Element Size (% of average size)</i>	20

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengembangan Desain

Desain yang dikembangkan menggunakan beberapa prinsip dasar yaitu: (1) kaki palsu diproduksi melalui metode *3D printing*, (2) Menggunakan material sesedikit mungkin untuk menghasilkan produk dengan biaya rendah, (3) dilakukan iterasi desain sehingga menghasilkan model yang mampu menahan beban sebesar 1000N dengan paling sedikit menghasilkan *safety factor* lebih besar dari 2.

Hasil iterasi desain yang dilakukan menghasilkan desain kaki palsu pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain hasil iterasi desain (a) tampak depan (b) tampak samping

Finite Element Analysis (FEA)

Kekuatan mekanis yang didapatkan dari hasil pengujian *Finite element analysis* (FEA) dari desain kaki palsu yang telah dikembangkan terdapat pada Tabel 4. Dengan *safety factor* minimum sebesar 3,64x menunjukkan bahwa desain kaki palsu mampu menahan beban 1000N sebesar 3,64x dari beban maksimum yang diterima oleh model desain. Dengan berat rata rata pria usia 20-25 adalah sebesar

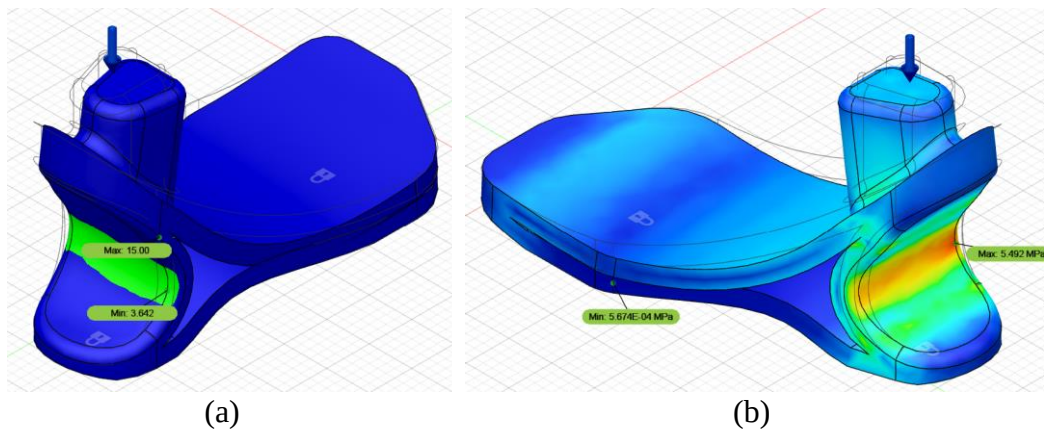
**Desain Inovatif Kaki Palsu Low Cost : Pendekatan Finite Element Analysis
(Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati)**

73kg (715,4 N) menunjukkan bahwa kaki palsu mampu menahan berat rata – rata pria dewasa.

Konsentrasi tegangan maksimum (*von-misses stress*) ditunjukkan pada Gambar 4b, yang ditunjukkan dengan warna jingga, yaitu sebesar 5,492 MPa. Pada titik ini konsentrasi beban atau tegangan merupakan yang terbesar, sehingga kemungkinan kegagalan desain terdapat pada titik ini. Beban maksimum ini tidak melebihi *yield strength* dari material PLA yaitu sebesar 20 MPa, sehingga bisa disimpulkan bahwa struktur desain mampu menahan beban 1000N yang diberikan.

Tabel 4. Data Mekanis Hasil Pengujian *Finite Element Analysis* (FEA)

	<i>Safety Factor</i>	<i>Stress (MPa)</i>	<i>Displacement (mm)</i>	<i>Strain</i>
Max	15,0	5,492	0,238	0,003
Min	3,64	$5,674 \times 10^{-4}$	0	$4,122 \times 10^{-7}$



Gambar 4. Hasil Pengujian *Finite Element Analysis*, (a) *safety factor* (b) *von-misses stress*.

KESIMPULAN

Hasil *finite element analysis* (FEA) yang telah dilakukan menunjukkan bahwa model desain mampu menahan beban sebesar 1000N, sehingga ketika desain ini diproduksi menggunakan 3D Printing, model kaki palsu ini akan mampu menahan beban tubuh manusia dewasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Moeini, L. Yue, M. Begon, and M. Lévesque, “Surrogate optimization of a lattice foot orthotic,” *Computers in Biology and ...*, 2023, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482522010848>
- [2] S. karim Mohammed, “Design and Manufacturing of a New Prosthetic Foot,” *Journal Port Science Research*, 2021, [Online]. Available: <https://www.iasj.net/iasj/download/fc0f828a3ee38a16>

- [3] E. G. Halsne, J. M. Czerniecki, J. B. Shofer, and ..., "The effect of prosthetic foot stiffness on foot-ankle biomechanics and relative foot stiffness perception in people with transtibial amputation," *Clinical ...*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268003320302606>
- [4] Y. Li, K. F. Leong, and Y. Gu, "Construction and finite element analysis of a coupled finite element model of foot and barefoot running footwear," *Proc Inst Mech Eng P J Sport Eng Technol*, vol. 233, no. 1, pp. 101–109, 2019, doi: 10.1177/1754337118803540.
- [5] H. Meyer, S. Kaltenborn, and S. Althaus, "Prosthetic foot, system of a prosthetic foot and a shoe, and method for adapting the heel height of a prosthetic foot," *US Patent 10,588,760*, 2020, [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US10588760B2/en>
- [6] A. S. Vadakattu, *Ergonomic Instrumented Insole*. fse.studenttheses.ub.rug.nl, 2023. [Online]. Available: <https://fse.studenttheses.ub.rug.nl/id/eprint/31213>
- [7] E. Analysis, "Stress Analysis Plat Tulang dengan Metode Finite," no. November 2020, pp. 1–25, 2021.
- [8] T. Ingrassia, L. Nalbone, V. Nigrelli, D. Tumino, and V. Ricotta, "Finite element analysis of two total knee joint prostheses," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 7, no. 2, pp. 91–101, 2013, doi: 10.1007/s12008-012-0167-7.
- [9] V. V Dam, H. A. Trinh, D. T. Dung, and ..., "Applications of Finite Element in Implant Dentistry and Oral Rehabilitation," *The Open Dentistry ...*, 2021, [Online]. Available: <https://opendentistryjournal.com/VOLUME/15/PAGE/392/>
- [10] M. Bellmann, T. M. Köhler, and T. Schmalz, "Comparative biomechanical evaluation of two technologically different microprocessor-controlled prosthetic knee joints in safety-relevant daily-life situations," *Biomedizinische Technik*, vol. 64, no. 4, pp. 407–420, 2019, doi: 10.1515/bmt-2018-0026.
- [11] Y. Wang, Z. Li, and M. Zhang, "Biomechanical study of tarsometatarsal joint fusion using finite element analysis," *Med Eng Phys*, vol. 36, no. 11, pp. 1394–1400, 2014, doi: 10.1016/j.medengphy.2014.03.014.
- [12] F. M. Rohjoni, M. Patar, J. Mahmud, H. Lee, and ..., "Finite element analysis of a transtibial prosthetic during gait cycle," *International Journal of ...*, 2020, [Online]. Available: <http://www.ijmerr.com/uploadfile/2020/0417/20200417065721359.pdf>
- [13] M. S. Jamaludin, *Dynamic Analysis of Transfemoral Prosthesis Function using Finite Element Method*. shibaura.repo.nii.ac.jp, 2020. [Online]. Available: https://shibaura.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=159&item_no=1&attribute_id=20&file_no=1
- [14] V. Filardi, "Finite element analysis of the foot: Stress and displacement shielding," *J Orthop*, vol. 15, no. 4, pp. 974–979, 2018, doi: 10.1016/j.jor.2018.08.037.