



## ANALISIS KINERJA KAKI PALSU MENGGUNAKAN METODE FEA (*Finite Element Analysis*)

Ade Fitri Khulayfah<sup>1</sup>, Dhananjaya YH Kumarajati<sup>1a</sup>, Wahyu Sugianto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta

Korespondensi:

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta  
afifahkhulayfah@gmail.com

### ABSTRAK

Kaki palsu jenis *Energy Storing and Return* (ESR) merupakan jenis kaki palsu yang relatif baru dan masih terus dikembangkan karena kaki palsu jenis *Energy Storing and Return* (ESR) adalah solusi inovatif untuk meningkatkan mobilitas dan kenyamanan pengguna. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis desain kaki palsu jenis *Energy Storing and Return* (ESR) pada posisi *midstance* menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA). Desain yang akan diuji menggunakan material *Thermoplastic Resin* dengan keunggulan memiliki bobot yang ringan, harga yang lebih terjangkau dan fleksibilitas yang optimal. Pembebanan 540 N di aplikasikan pada kaki palsu yang akan diuji untuk mensimulasikan kondisi berjalan normal. Analisis tegangan deformasi, dan faktor keamanan untuk evaluasi kinerja desain. Hasil simulasi menunjukkan bahwa faktor keamanan di seluruh bagian kaki palsu memiliki nilai yang aman. Namun, pada desain perlu dioptimalkan kembali untuk meningkatkan performa dan keamanannya.

**Kata kunci:** kaki palsu, ESR, FEA, *midstance*, faktor keamanan.

### ABSTRACT

*The Energy Storing and Return (ESR) type of prosthetic leg is a relatively new type of prosthetic leg and is still being developed because the Energy Storing and Return (ESR) type of prosthetic leg is an innovative solution to increase user mobility and comfort. This study aims to analyze the design of an Energy Storing and Return (ESR) type prosthetic leg in the midstance position using Finite Element Analysis (FEA). The design that will be tested uses Thermoplastic Resin material with the advantages of light weight, more affordable price and optimal flexibility. A load of 540 N is applied to the prosthetic leg that will be tested to simulate normal walking conditions. Deformation stress analysis, and safety factors for design performance evaluation. The simulation results show that the safety factor in all parts of the prosthetic leg has a safe value. However, the design needs to be optimized again to improve performance and security.*

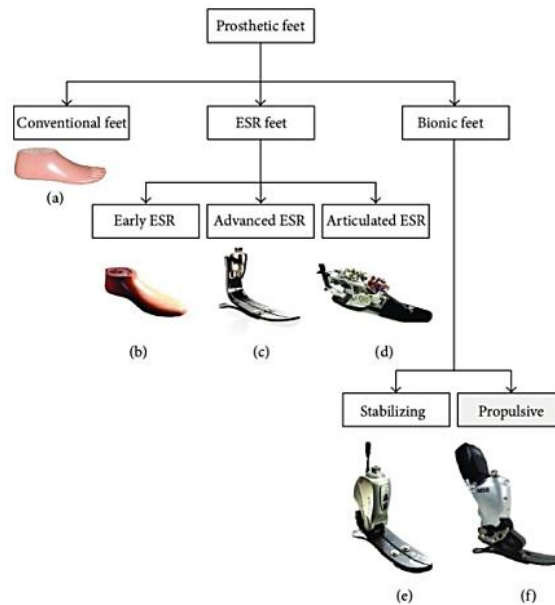
**Keywords:** prosthetic leg, ESR, FEA, *midstance*, safety factor

## 1. PENDAHULUAN

Kehilangan sebagian dari anggota tubuh bagian bawah terutama pada kaki mempunyai dampak yang signifikan (1). Hal ini menjadi perhatian khusus terhadap rehabilitasi kesehatan yang mengungkapkan bahwa pasien yang

kehilangan anggota tubuh bagian bawah memiliki hasil kesehatan yang buruk (2). Maka solusi untuk permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan kaki palsu yang tepat. Kaki palsu merupakan alat buatan yang dirancang untuk mengganti bagian tubuh yang hilang (3).

Kaki palsu merupakan alternatif dari beberapa alat bantu yang dapat digunakan karena menurut perkembangannya sudah memiliki komponen canggih untuk meningkatkan performanya sehingga dapat digunakan dengan baik (4). Penggunaan kaki palsu dapat disesuaikan berdasarkan beberapa faktor yakni dari tingkat amputasi, aktivitas dan gaya hidup, kenyamanan, kondisi medis dan biaya. Kaki palsu terdiri dari 3 jenis yaitu kaki konvensional dengan *Solid Ankle Cushion Heel* (SACH) (5) yang memiliki soket dibagian pangkalnya, *Energy Storing and Recovery* (ESR) dengan mekanisme pegasnya (6), dan kaki bionik (7) yang sudah dirancang canggih dengan bantuan sensor untuk memberikan efek alami (Gambar 1).



**Gambar 1. Jenis Kaki Palsu (8)**

Untuk mendapatkan kaki palsu yang tepat maka perlu dirancang dengan baik menggunakan material yang sesuai dengan kebutuhan pengguna agar menghasilkan kaki palsu yang sesuai dan nyaman dipakai dengan harga yang terjangkau seperti pada material *thermoplastic resin* yang ringan memungkinkan pengguna bebas bergerak, tahan terhadap benturan sehingga aman untuk penggunaan sehari-hari, dan memiliki fleksibilitas bentuk yang baik. Penggunaan kaki palsu di Indonesia lebih cenderung menggunakan kaki palsu yang bersifat konvensional sehingga sensasi yang diberikan tidak seperti layaknya orang normal. Alternatif yang dapat diberikan adalah dengan mengembangkan jenis kaki palsu *Energy Storing and Recovery* (ESR) (9) yang dapat memberikan sensasi berjalan menyerupai orang normal karena kemampuannya menyimpan dan mengembalikan energi melalui mekanisme pegas.

Penelitian ini akan menganalisis desain dengan penggunaan material *thermoplastic resin* pada penggunaan kaki palsu yang belum banyak diteliti dan jarang digunakan di Indonesia dengan diharapkan dapat memberikan kaki palsu yang lebih baik dengan harga yang terjangkau dan memberikan sensasi berjalan menyerupai orang normal.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk menganalisis perilaku struktur model pada desain kaki palsu yang dibuat menggunakan *Autodesk Fusion 360* menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan pembebanan 540 N, menggunakan material *thermoplastic resin* dan dicetak menggunakan 3D print. Hasil analisis tersebut kemudian digunakan agar dapat memahami lebih baik bagaimana kaki palsu akan berperilaku di dunia nyata dan memastikan keamanan serta kenyamanan bagi pengguna.

**2.1 THERMOPLASTIC RESIN**

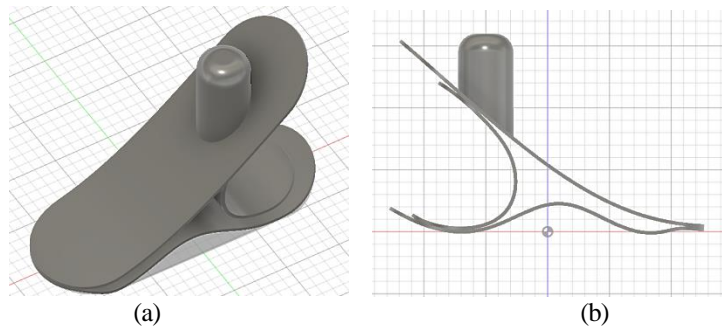
*Thermoplastic resin* (10) merupakan polimer sintesis yang memiliki karakteristik dapat melunak dan dibentuk pada suhu tinggi dan dapat dikeraskan kembali saat didinginkan atau reversibel terhadap panas. *Thermoplastic resin* dapat menjadi salah satu pilihan untuk material pembuatan kaki palsu (11) dengan harga yang terjangkau dengan kombinasi sifat mekaniknya yang baik, seperti kekuatan, kekakuan, elastisitas, kepadatan rendah, tahan aus, dan biokompatibilitas untuk pembebanan yang diberikan. Pada penelitian ini akan menggunakan *thermoplastic resin* sebagai material dari desain kaki palsu yang dibuat melalui *software Autodesk Fusion* yang kemudian dianalisis menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) yang nantinya akan menghasilkan data meliputi faktor keamanan, deformasi dan tegangan. Berikut Tabel 1 merupakan data sifat mekanis material *thermoplastic resin* yang nantinya akan dibandingkan dengan kemampuan tubuh pada desain.

**Tabel 1. Sifat Mekanis *Thermoplastic Resin***

<i>Density</i>	1,280E-06 kg / mm <sup>3</sup>
<i>Young's Modulus</i>	3300 Mpa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,36
<i>Yield Strength</i>	57,20 Mpa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	114 Mpa
<i>Thermal Conductivity</i>	1,3E-04 W / (mm C)
<i>Thermal Expansion Coefficient</i>	5,6E-05 / C
<i>Specific Heat</i>	1280 J / (kg C)

**2.2 DESAIN PROSTHETIC FOOT ESR**

Kaki palsu *Energy Storage and Return* (ESR) dirancang untuk memberikan penyerapan dan mengembalikan energi saat pengguna melangkah. Kaki palsu jenis *Energy Storage and Return* (ESR) (12) juga memiliki mekanisme pengaturan yang memungkinkan pengguna untuk mengubah tingkat kekakuan atau penyerapan energi sesuai dengan kebutuhannya yang terdapat pada pegasnya. Desain yang akan digunakan pada penelitian ini (Gambar 2) diberi pembebanan sebesar 540 N, desain dibuat menggunakan *Fusion 360* dan dianalisis menggunakan fitur *solve* pada *Autodesk Fusion 360*.



**Gambar 2. Desain Kaki Palsu (a) tampak depan (b) tampak samping**

**2.3 METODE Finite Element Analysis (FEA)**

Metode *Finite Element Analysis* (FEA) (13) adalah sebuah pendekatan numerik yang digunakan untuk menganalisis struktur atau komponen dengan membaginya menjadi elemen-elemen dikrit yang lebih kecil. Dalam konteks penelitian kaki palsu jenis *Energy Storage and Return*(ESR), metode *Finite Element Analysis* (FEA) dapat digunakan untuk memodelkan dan menganalisis respon struktural kaki buatan terhadap pembebanan yang diterapkan, memperkirakan tegangan, deformasi, dan faktor keamanan, serta memperoleh

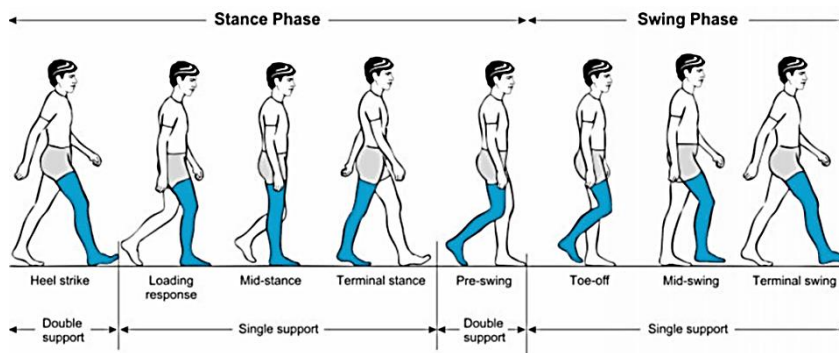
wawasan tentang kinerja kaki tersebut. Pada penelitian ini, desain akan dianalisis menggunakan material Thermoplastic resin dengan pembebanan sebesar 540 N pada posisi *midstance*. Berikut Tabel 2 adalah data *meshing* yang akan menjadi dasar pada proses *Finite Element Analysis* (FEA).

**Tabel 2. Data Meshing Model 3D**

<i>Average Element Size (% of model size)</i>	
<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>	No
<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

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Posisi *midstance* adalah fase tengah dari siklus berjalan manusia, atau bisa dikatakan fase transisi dari fase *heel strike* (fase awal saat berjalan, ketika tumit menyentuh tanah) ke fase *toe-off* (saat jari-jari kaki terangkat dari tanah selama siklus berjalan) dimana keseimbangan tubuh sangat diperhatikan dalam fase ini karena posisi *midstance* merupakan fase terpenting dalam gerakan manusia sehari-hari (Gambar 3).

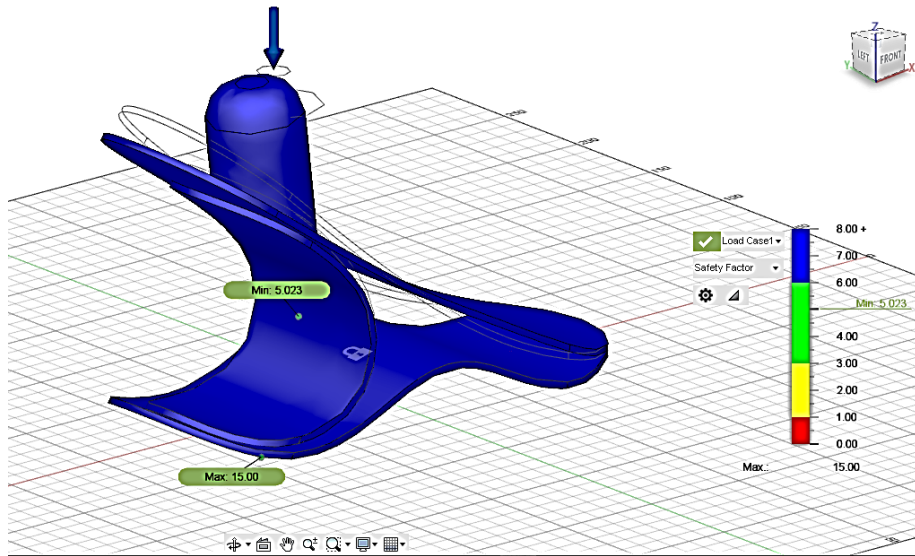


**Gambar 3. Ilustrasi dari fase orang berjalan pada umumnya (14)**

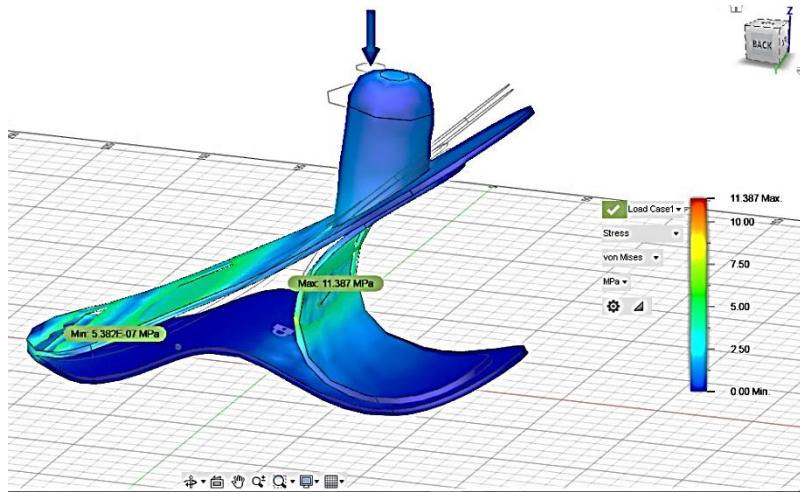
Berikut Tabel 3 adalah desain dan data mekanis hasil dari pengujian *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan Autodesk Fusion 360 pada posisi *midstance* dengan pembebanan 540 N .

**Table 3. Data Hasil Pengujian Desain**

	<i>Safety Factor</i>	<i>Stress (MPa)</i>	<i>Displacement (mm)</i>	<i>Strain</i>
Max	15,0	11,387	4,616	0,004
Min	5,02	$5,382 \times 10^{-7}$	0	$2,555 \times 10^{-10}$



Gambar 4. Pengujian Safety Factor



Gambar 5. Pengujian desain von mises stress

Hasil analisis *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan bahwa kaki palsu *Energy Storing and Recovery* (ESR) dengan material *thermoplastic resin*(15) mampu menahan pembebanan sebesar 540 N pada posisi *midstance* dengan ditunjukkan pada Gambar 4, pengujian *safety factor* menunjukkan bahwa desain diperkirakan tidak akan bengkok atau patah. Pada pengujian *von mises stress*, Gambar 5 diperlihatkan bahwa dengan material dan pembebanan yang diberikan pada desain yang diuji ditunjukkan dengan warna hijau dengan angka  $5,382 \times 10^{-7}$  yang belum melebihi batas maksimum Hal ini menunjukkan bahwa kaki palsu memiliki kelebihan kekuatan yang cukup menahan pembebanan tersebut dengan aman.

#### 4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis menggunakan teknik *Finite Elementy Analysis* (FEA) pada kaki palsu jenis *Energy Storing and Recovery* (ESR) menggunakan material *thermoplastic resin* dengan pembebanan sebesar 540 N pada posisi *midstance*. Dengan memilih material *thermoplastic resin* yang memiliki karakteristik yang sesuai dengan karakteristik material kaki palsu pada umumnya, dapat memastikan bahwa kaki palsu mampu menahan pembebanan dengan aman tanpa mengalami kerusakan yang signifikan. Berdasarkan hasil analisis *Finite Element Analysis* (FEA) yang diperoleh, faktor keamanan 5,02 pada kaki palsu *Energy Storing and Recovery* (ESR) dengan

material *thermoplastic resin* yang diberi pembebanan 540 N pada posisi *midstance* memiliki kekuatan yang cukup untuk pembebanan yang diberikan secara aman. Hal ini menunjukkan bahwa kaki palsu dirancang dengan tingkat keamanan yang memadai.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Yoanita YV, Marfuah HH, Studi P, Vokasional P, Otomotif T, Studi P, et al. ANALISIS BIOMEKANIK KAKI PALSU TIRUAN JENIS ENERGY STORING AND RECOVERY ( ESR ) DENGAN FINITE ELEMENT. 2023;6(2):74–82.
2. Prost V, Peterson H V., Winter AG. Multi-Keel Passive Prosthetic Foot Design Optimization Using the Lower Leg Trajectory Error Framework. *J Mech Robot.* 2023;15(4).
3. Yama D, Kumarajati H. Desain Inovatif Kaki Palsu Low Cost : Pendekatan Finite Element Analysis. 2023;12(2):55–61.
4. Kadhim FM, Hasan SF, Sadiq SE. Optimal Material Selection for Manufacturing Prosthetic Foot. *Pertanika J Sci Technol.* 2022;30(4):2363–76.
5. Sabzevari MHM, Anbarian M, Safari MR, Tabatabai SF, Razi MJ. Biomechanical Analysis of the Effect of Solid Ankle Cushion Heel And Dynamic Feet During Running of Individuals With Unilateral Transtibial Amputations. *Arch Rehabil.* 2022;23(1):126–39.
6. Tryggvason H, Starker F, Lecomte C, Jonsdottir F. Use of dynamic FEA for design modification and energy analysis of a variable stiffness prosthetic foot. *Appl Sci.* 2020;10(2).
7. Childers WL, Takahashi KZ. Increasing prosthetic foot energy return affects whole-body mechanics during walking on level ground and slopes. *Sci Rep.* 2018;8(1):1–12.
8. Chiriac OA, Bucur D. From conventional prosthetic feet to bionic feet. a review. *Lect Notes Networks Syst.* 2020;143(December):130–8.
9. Kumarajati D, Marfuah H, Yoanita V. Geometry Reconstruction and Performance Evaluation of Energy Storage and Return (ESR) Prosthetic Foot with CAD-FEA Method. *Atlantis Press International BV;* 2023. 56–62 p.
10. Ageyeva T, Sibikin I, Kovács JG. Review of thermoplastic resin transfer molding: Process modeling and simulation. *Polymers (Basel).* 2019;11(10).
11. Sharma S, Singh J, Kumar H, Sharma A, Aggarwal V, Gill AS, et al. Utilization of rapid prototyping technology for the fabrication of an orthopedic shoe inserts for foot pain reprieve using thermo-softening viscoelastic polymers: A novel experimental approach. *Meas Control (United Kingdom).* 2020;53(3–4):519–30.
12. Sugiharto A, Ferryanto F, Tazakka HD, Mahyuddin AI, Wibowo A, Mihradi S. Static analysis of an energy storage and return (ESAR) prosthetic foot. *AIP Conf Proc.* 2019;2193.
13. Kumar KN, Sai SKN. Finite element analysis on prosthetic leg under different loads and flexion angles for medical applications. *J Mech Energy Eng.* 2022;(Online First).
14. Clementi M. The influence of residual limb and liner material properties on stress distribution in a transtibial amputee: a finite element analysis. 2020;
15. Coombes AGA, Maccoughlan J. Development and testing of thermoplastic structural components for modular prostheses. *Prosthet Orthot Int.* 1988;12(1):19–40.