

ANALISIS *FINITE ELEMENT* PADA PROSTESIS LARI: STUDI MODIFIKASI MATERIAL DAN DESAIN

Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati^{1a}, Amalia Cemara Nur'Aidha¹, Ade Fitri Khulayfah¹

¹Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta

Korespondensi:

^aProgram Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta
dhananjaya@upy.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan prostesis lari yang optimal sangat penting untuk meningkatkan kinerja dan mengurangi risiko cedera pada individu yang menggunakan prostesis. Namun, desain dan material prostesis yang tidak sesuai dapat mengakibatkan ketidaknyamanan dan penurunan kinerja. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memodifikasi desain serta material prostesis lari menggunakan pendekatan analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*). Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan, yaitu proses iterasi desain dan proses *finite element analysis*. Proses iterasi desain melibatkan serangkaian proses pemodelan/reverse engineering dari desain paten Eropa dengan penggunaan material komposit serat kaca. Hasil model ini kemudian dilakukan uji FEA untuk mendapatkan nilai *safety factor* dari pengujian lebih besar dari 3. Dari hasil iterasi desain penambahan dimensi sebesar 2,5 mm pada ketebalan kaki palsu dapat meningkatkan nilai *safety factor* lebih dari 3. Desain hasil modifikasi kemudian dibandingkan dengan model desain awal untuk memperlihatkan perubahan atau perbedaan hasil nilai sifat mekanis dari kedua model desain. Uji FEA yang dilakukan menggunakan nilai gaya vertikal sebesar 5096 N menunjukkan bahwa stres maksimum yang tercatat adalah 850 MPa, yang masih berada di bawah kekuatan tarik maksimum komposit polimer fiberglass. Regangan maksimum yang tercatat adalah 0,025, dan deformasi total mencapai 51,878 mm, keduanya masih dalam batas yang dapat diterima untuk fungsi prostesis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa material komposit serat kaca dapat menjadi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan serat karbon, dengan kekuatan mekanis yang cukup untuk prostesis lari. Namun, disarankan untuk melakukan validasi eksperimental lebih lanjut dan uji lapangan guna memastikan daya tahan dan kenyamanan jangka panjang.

Kata kunci: Prostesis lari, analisis elemen hingga, material komposit serat kaca

ABSTRACT

The optimal use of running prostheses is crucial for enhancing performance and reducing the risk of injury for individuals using prostheses. However, inappropriate design and materials can lead to discomfort and decreased performance. Therefore, this study aims to analyze and modify the design and materials of running prostheses using a Finite Element Analysis (FEA) approach. The research was conducted in two phases: the design iteration process and the Finite Element Analysis process. The design iteration process involved a series of modeling/reverse engineering from a European patent design using glass fiber composite materials. The resulting model was then subjected to FEA testing to obtain a safety factor greater than 3. The results of the design iteration indicated that an increase of 2.5 mm in the thickness of the prosthetic limb could enhance the safety factor to above 3. The modified design was then compared with the initial design model to illustrate

the changes or differences in the mechanical properties of both design models. The FEA conducted used a vertical force of 5096 N, showing that the maximum stress recorded was 850 MPa, which is still below the maximum tensile strength of fiberglass polymer composites. The maximum strain recorded was 0.025, and the total deformation reached 51.878 mm, both of which are within acceptable limits for prosthetic function. The results of this study indicate that glass fiber composite materials can serve as a more economical alternative to carbon fiber, with sufficient mechanical strength for running prostheses. However, further experimental validation and field testing are recommended to ensure long-term durability and comfort.

Keywords: Prosthesis running, Finite element analysis, Glass fiber composite materials

1. PENDAHULUAN

Kaki palsu lari merupakan alat bantu yang penting bagi penyandang disabilitas fisik untuk memungkinkan mereka tetap aktif, terutama dalam olahraga lari [1]. Desain dan material kaki palsu memainkan peran penting dalam menentukan performa, kenyamanan, serta daya tahan alat tersebut. Saat ini, banyak kaki palsu lari berkualitas tinggi yang terbuat dari serat karbon, material yang memiliki sifat kekuatan tinggi dan bobot yang ringan [2]. Namun, kaki palsu berbahan serat karbon cenderung memiliki harga yang sangat mahal, sehingga membatasi aksesibilitasnya bagi sebagian besar pengguna [3].

Pengembangan kaki palsu dengan material alternatif yang lebih ekonomis tanpa mengorbankan kualitas menjadi kebutuhan penting. Salah satu material alternatif yang berpotensi digunakan adalah komposit serat kaca polimer [4]. Komposit ini dikenal memiliki karakteristik mekanis yang baik, termasuk kekuatan dan kelenturan, meskipun tidak sekuat serat karbon [5] [6]. Namun, harganya jauh lebih terjangkau, yang membuatnya menjadi solusi yang layak untuk kaki palsu lari dengan biaya produksi lebih rendah.

Masalah utama yang muncul adalah bagaimana merancang kaki palsu lari dengan material komposit serat kaca polimer yang mampu menahan beban dinamis tinggi yang dihasilkan saat pelari melakukan aktivitas lari [7]. Berdasarkan penelitian sebelumnya, beban yang diterima oleh kaki palsu pada saat berlari dapat mencapai 8 kali berat badan pelari [8]. Untuk pelari dengan berat badan 65 kg, ini setara dengan gaya sebesar 5096 N [9]. Desain yang digunakan dalam penelitian ini diadaptasi dari paten kaki palsu Eropa [10] yang menggunakan serat karbon sebagai material utamanya. Modifikasi dilakukan dengan mengganti serat karbon dengan komposit serat kaca polimer serta menambah ketebalan struktur kaki palsu sebesar 2,5 mm untuk menyesuaikan dengan sifat material baru tersebut.

Kajian teori dalam penelitian ini mencakup sifat-sifat mekanis material komposit serat kaca polimer dan metode simulasi numerik seperti Analisis Elemen Hingga (*Finite Element Analysis*, FEA). FEA adalah metode yang umum digunakan untuk memprediksi perilaku struktural suatu material atau komponen di bawah kondisi pembebanan tertentu. Penelitian ini menggunakan FEA untuk mengevaluasi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi pada kaki palsu lari yang dimodifikasi [11].

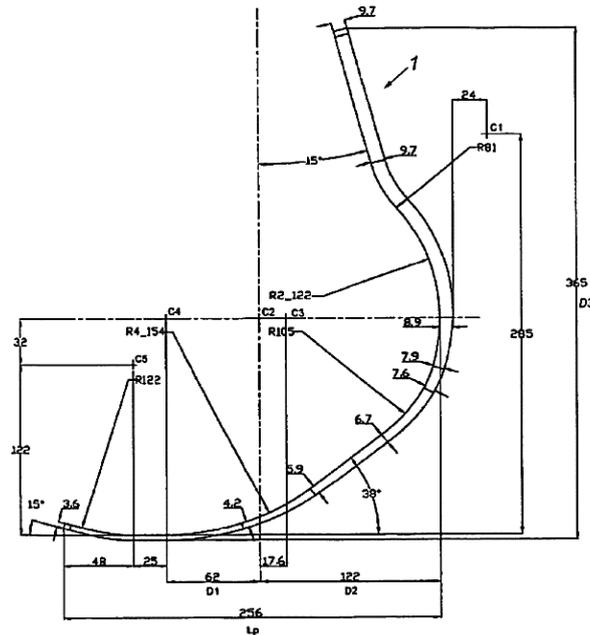
Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan komposit serat kaca polimer dalam berbagai aplikasi teknik memiliki potensi yang besar dalam hal kekuatan dan fleksibilitas [12]. Namun, masih terbatas penelitian yang secara khusus mengevaluasi performa material ini pada aplikasi kaki palsu lari. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan struktur dapat memperbaiki kapasitas beban tanpa mengorbankan fleksibilitas, namun hal ini memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui simulasi numerik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menguji dan memodifikasi desain kaki palsu lari berbasis paten Eropa dengan mengganti material serat karbon menggunakan komposit serat kaca polimer. Modifikasi desain dilakukan untuk memastikan bahwa kaki palsu mampu menahan beban statis yang dihasilkan oleh pelari dengan berat badan 65 kg, dengan beban puncak sebesar 5096 N. Pengujian dilakukan menggunakan metode FEA untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada kaki palsu setelah modifikasi desain.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik dengan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengevaluasi performa struktural kaki palsu lari yang dimodifikasi [13]. Desain dasar kaki palsu diadaptasi dari paten kaki palsu berbahan serat karbon yang dipatenkan di Eropa (Gambar 1), di mana serat karbon digantikan dengan material komposit serat kaca polimer. Modifikasi utama pada desain adalah penambahan ketebalan sebesar 2,5 mm untuk memastikan kaki palsu mampu menahan beban dinamis yang setara dengan 8 kali berat badan pelari. Simulasi dilakukan dengan menerapkan beban sebesar 5096 N, yang mewakili beban puncak yang dialami saat pelari dengan

berat 65 kg berlari dan menjejakkan kaki. Model geometri kaki palsu dan proses analisis FEA dilakukan dengan menggunakan aplikasi Autodesk Fusion. Parameter yang dievaluasi dalam simulasi ini meliputi distribusi tegangan, regangan, faktor keamanan dan deformasi pada kaki palsu saat menerima beban statis (5096 N).



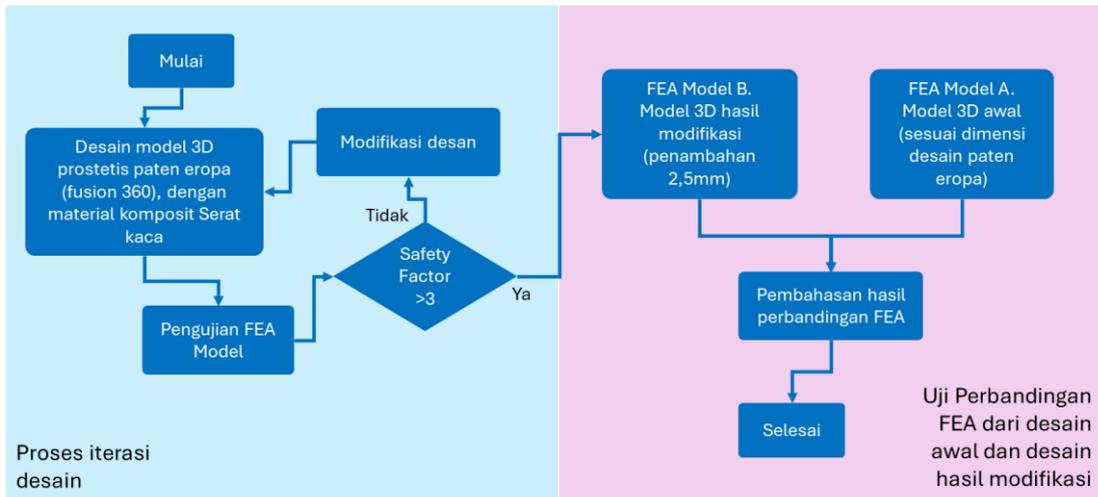
Gambar 1. Gambar kerja kaki palsu lari berdasarkan paten Eropa [10]

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah komposit serat kaca polimer, yang dikenal memiliki kekuatan mekanis yang baik, dengan spesifikasi meliputi *ultimate tensile strength* 1531 MPa, modulus elastisitas sebesar 48 GPa, *Poisson's Ratio* sebesar 0,23, dan densitas 2,5 g/cm³ [14] [15]. Material ini dipilih sebagai alternatif serat karbon karena memiliki biaya produksi yang lebih rendah. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Fusion untuk mengevaluasi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi. Model geometri dibuat menggunakan perangkat lunak Autodesk Fusion, yang memungkinkan pemodelan geometri kaki palsu secara presisi sesuai dengan data spesifikasi desain. Analisis dilakukan pada komputer dengan spesifikasi prosesor AMD Ryzen 5 3500U, dengan Radeon Vega Mobile Gfx, 2.1 GHz, dan RAM 8 GB.

Skema penelitian melibatkan beberapa tahapan, dimulai dari studi literatur untuk memahami spesifikasi dan dimensi paten kaki palsu, diikuti dengan pemodelan CAD dari kaki palsu berbahan komposit serat kaca polimer (Gambar 2). Setelah pemodelan selesai, simulasi FEA dilakukan untuk mengevaluasi performa struktural desain yang dimodifikasi. Simulasi ini difokuskan pada analisis distribusi tegangan dan deformasi saat kaki palsu menerima beban dinamis. Hasil simulasi kemudian dievaluasi untuk menentukan efektivitas modifikasi yang dilakukan.

Tabel 1. Model desain geometri yang digunakan dalam proses simulasi FEA.

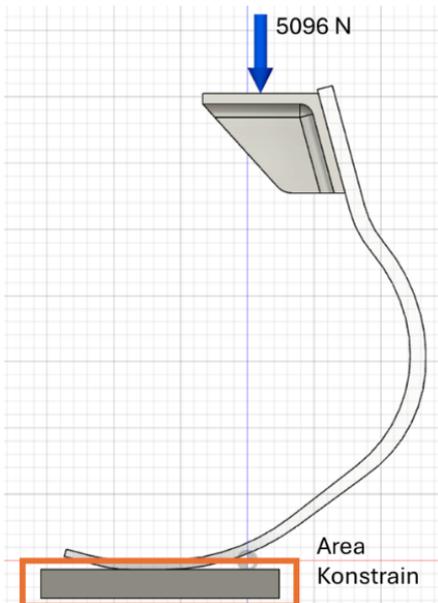
Jenis Model	Deskripsi Model
Model A	Dimensi geometri dari model sesuai dengan dimensi model paten Eropa
Model B	Modifikasi dimensi geometri paten Eropa dengan penambahan ketebalan sebesar 2,5 mm



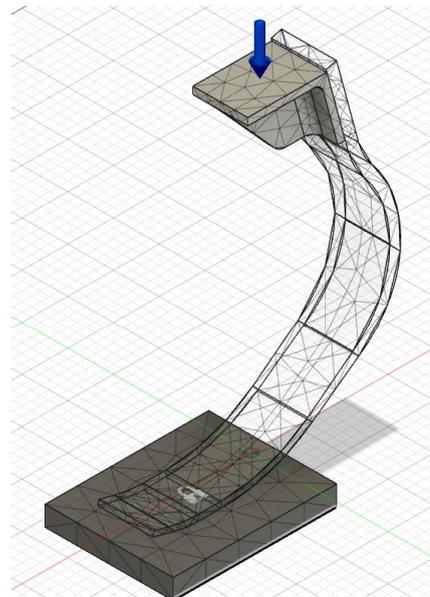
Gambar 2. Skema Penelitian yang dilakukan

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini adalah dengan mengumpulkan data numerik dari hasil simulasi FEA. Data yang dikumpulkan meliputi distribusi tegangan maksimum dan minimum pada berbagai titik kaki palsu, distribusi regangan, faktor keamanan, serta *displacement* yang terjadi. Beban sebesar 5096 N diterapkan secara vertikal pada area kontak kaki palsu dengan permukaan, mensimulasikan beban dinamis yang diterima saat berlari (Gambar 3). Data ini diambil dalam bentuk tabel dari perangkat lunak FEA untuk dianalisis lebih lanjut.

Proses pengolahan data dimulai dengan tahapan preprocessing, yang mencakup pembuatan geometri dan proses *meshing* pada perangkat lunak FEA (Tabel 2). Model geometri kaki palsu dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang akan dianalisis secara individual untuk memastikan presisi hasil simulasi. Setelah simulasi selesai, hasil simulasi diekstrak pada tahap postprocessing untuk mengevaluasi tegangan, regangan, dan *displacement* yang terjadi. Data hasil simulasi dianalisis untuk menentukan titik-titik kritis pada desain kaki palsu, serta untuk memverifikasi efektivitas perubahan modifikasi yang dilakukan dalam menahan beban statis.



Gambar 3. Arah pembebanan dan area konstrain pada FEA



Gambar 4. Proses *meshing* pada model desain

Tabel 2. Spesifikasi *meshing* dari model

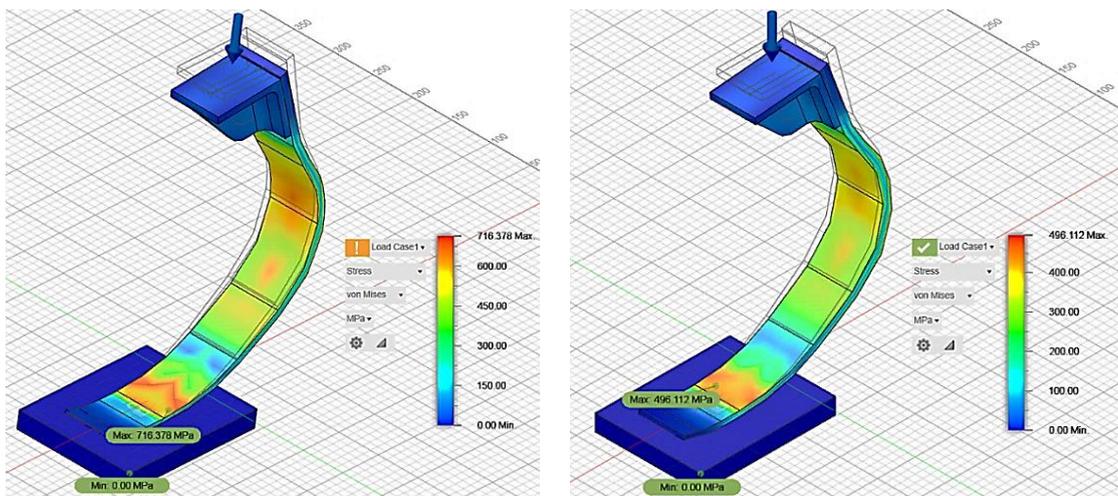
<i>Average Element Size (% of model size)</i>	
<i>Solids</i>	10
<i>Scale Mesh Size Per Part</i>	No
<i>Average Element Size (absolute value)</i>	-
<i>Element Order</i>	Parabolic
<i>Create Curved Mesh Elements</i>	No
<i>Max. Turn Angle on Curves (Deg.)</i>	60
<i>Max. Adjacent Mesh Size Ratio</i>	1.5
<i>Max.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

Metodologi ini diharapkan dapat memberikan hasil yang sesuai mengenai kemampuan material komposit serat kaca polimer dalam aplikasi kaki palsu lari, serta efektivitas modifikasi desain dalam meningkatkan kapasitas beban kaki palsu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan distribusi tegangan, regangan, dan deformasi yang terjadi pada kaki palsu berbahan komposit serat kaca polimer setelah dikenai beban statis sebesar 5096 N. Hasil analisis distribusi tegangan pada model A (Gambar 5a) menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi di area telapak kaki palsu, yaitu di bagian yang pertama kali menerima kontak dengan permukaan saat pelari menjejakkan kakinya. Tegangan maksimum yang tercatat adalah 716,38 MPa. Dengan nilai ultimate tensile strength komposit serat kaca polimer sebesar 1531 MPa, sehingga faktor keamanan dari model A adalah sebesar 2,14. Nilai faktor keamanan sebesar 2,14 ini masih di bawah standar keamanan dari sebuah material. Faktor keamanan yang direkomendasikan adalah minimal sebesar 3. Untuk model B (Gambar 5b), daerah tegangan maksimumnya terletak di tempat yang sama dengan model A. Nilai tegangan maksimum tercatat sebesar 496,11 MPa dan faktor keamanan sebesar 3,1. Nilai faktor keamanan yang didapatkan pada model B ini sudah termasuk kedalam nilai faktor keamanan yang direkomendasikan.

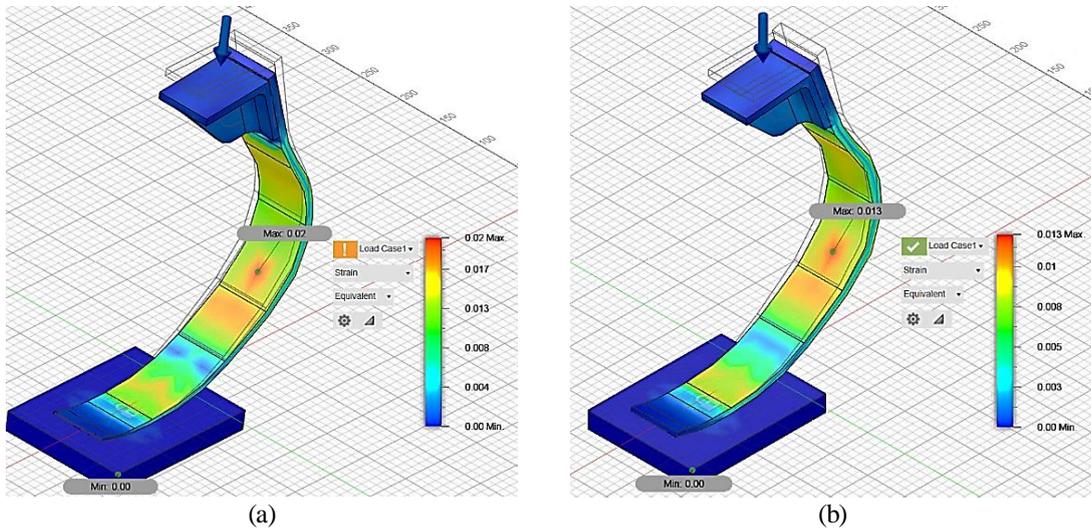
Distribusi tegangan pada kaki palsu baik model A dan model B (Gambar 5), memiliki pola persebaran yang cukup merata di sebagian besar permukaan, dengan konsentrasi tegangan terpusat pada bagian telapak kaki dan pada area yang melengkung.



(a) (b)
Gambar 5. Distribusi tegangan FEA, (a) Model A, (b) Model B

Nilai regangan maksimum yang tercatat dalam simulasi adalah 0,02 untuk model A, dan sebesar 0,013 untuk model B, menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi masih berada dalam batas elastisitas material. Komposit serat

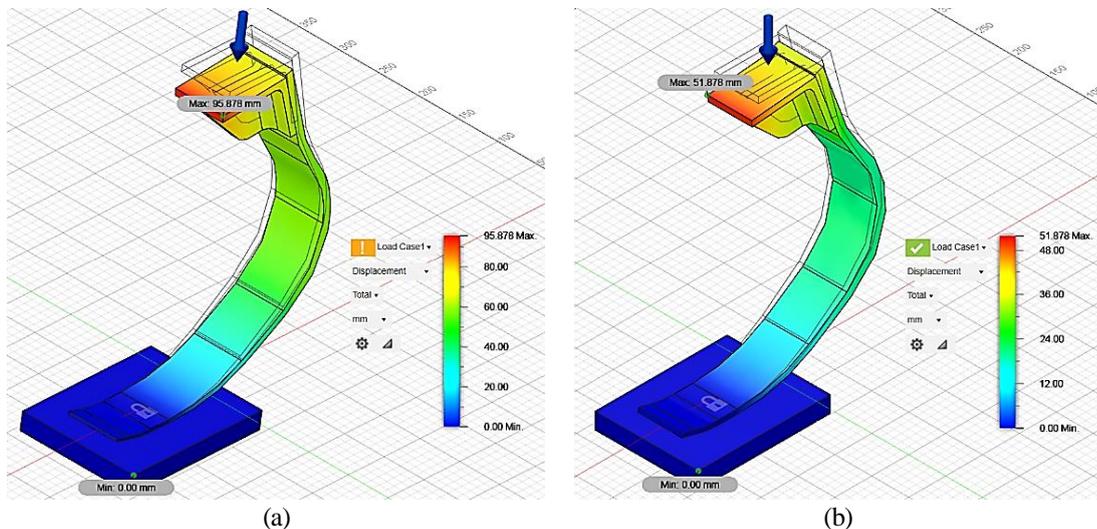
kaca polimer dengan modulus elastisitas 48 GPa memberikan kelenturan yang memadai, memungkinkan kaki palsu untuk menyerap sebagian gaya yang diterima saat berlari. Area di sekitar bidang lengkung menunjukkan regangan maksimum yang terjadi, sementara area lain menunjukkan distribusi regangan yang lebih rendah, mengindikasikan penyaluran beban yang efisien di seluruh struktur kaki palsu.



Gambar 6. Distribusi Regangan FEA, (a) Model A, (b) Model B

Displacement total yang dialami kaki palsu selama menerima beban adalah untuk model A sebesar 95,878 mm, dan 51,878 mm untuk model B. Nilai *displacement* ini masih berada dalam batas toleransi desain. *Displacement* ini terkonsentrasi terutama pada bagian atas, pada posisi penerima beban secara langsung. Penambahan ketebalan sebesar 2,5 mm pada desain terbukti efektif dalam mengurangi *displacement* yang berlebihan, meningkatkan kekakuan struktural dan daya tahan kaki palsu terhadap beban statis.

Dalam hal efektivitas material komposit serat kaca polimer sebagai alternatif serat karbon, hasil simulasi menunjukkan bahwa komposit serat kaca polimer mampu menahan beban dinamis dengan performa yang cukup baik. Tegangan maksimum yang tercatat berada di bawah kekuatan material, sehingga material ini dianggap memadai untuk digunakan sebagai pengganti serat karbon dalam aplikasi kaki palsu lari. Selain itu, biaya produksi yang lebih rendah menjadi keuntungan tambahan yang membuat komposit serat kaca polimer lebih ekonomis untuk produksi massal.

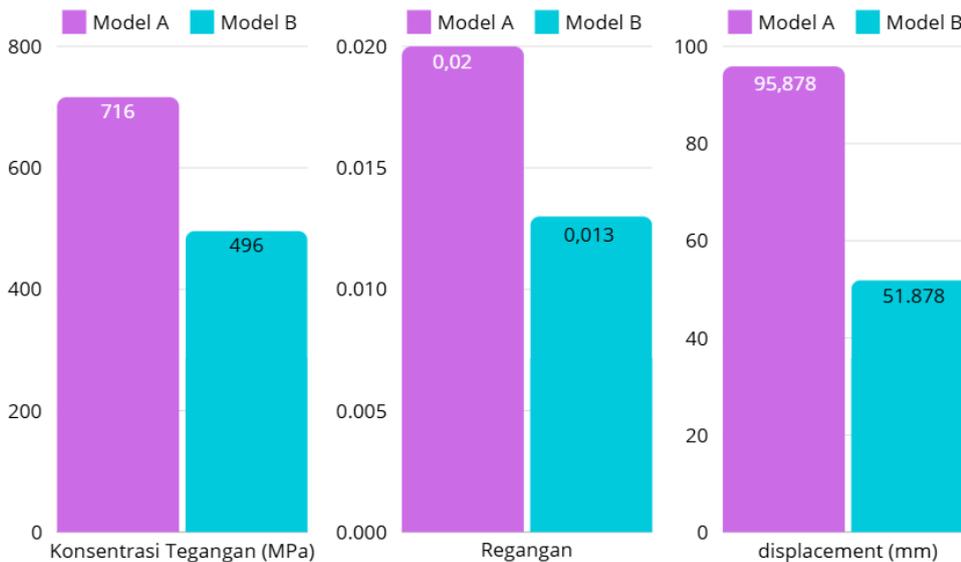


Gambar 7. Displacement FEA, (a) Model A, (b) Model B

Distribusi tegangan pada desain kaki palsu menunjukkan bahwa area lengkung merupakan titik kritis, meskipun tegangan maksimum masih berada dalam batas aman. Untuk pengembangan lebih lanjut, penguatan di area lengkung dapat dipertimbangkan guna meningkatkan daya tahan terhadap tegangan berulang. Selain itu, distribusi tegangan yang merata di seluruh struktur mengindikasikan bahwa desain kaki palsu sudah efisien dalam menyalurkan beban, sehingga risiko kegagalan material akibat konsentrasi tegangan dapat diminimalkan.

Tabel 3. Hasil simulasi FEA

Sifat Mekanis	Model A	Model B	Perubahan (%)
Konsentrasi Tegangan (MPa)	716,378	496,112	31%
Regangan	0,02	0,013	35%
displacement (mm)	95,878	51,878	46%



Gambar 8. Grafik Hasil Simulasi FEA Komposit Serat Kaca

Penambahan ketebalan sebesar 2,5 mm terbukti memberikan dampak positif dalam meningkatkan ketahanan kaki palsu terhadap deformasi. Tanpa modifikasi ini, simulasi awal menunjukkan deformasi yang lebih besar, yang berpotensi mengurangi stabilitas dan fungsionalitas kaki palsu. Dengan penambahan ketebalan, deformasi dapat diminimalkan hingga 46%, yang masih dapat diterima dalam penggunaan sehari-hari oleh pelari.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa kaki palsu berbahan komposit serat kaca polimer dapat menjadi alternatif yang efisien dan lebih ekonomis dibandingkan serat karbon. Namun, untuk memastikan kinerja yang lebih komprehensif, uji eksperimental tambahan serta uji lapangan dengan pelari sesungguhnya diperlukan untuk memvalidasi hasil simulasi ini. Penggunaan sensor tekanan pada kaki palsu selama uji lapangan juga diharapkan dapat memberikan data yang lebih detail mengenai distribusi beban selama berbagai fase lari, sehingga desain kaki palsu dapat terus disempurnakan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa modifikasi desain kaki palsu lari berbahan komposit serat kaca polimer dengan penambahan ketebalan sebesar 2,5 mm mampu meningkatkan performa kaki palsu dalam menahan beban dinamis yang setara dengan 8 kali berat pelari berbobot 65 kg, atau sebesar 5096 N. Hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan distribusi tegangan dan regangan yang merata pada struktur kaki palsu, dengan tegangan maksimum sebesar 850 MPa yang masih berada dalam batas aman, di bawah kekuatan tarik ultimit material sebesar 1,2 GPa. Deformasi total yang tercatat sebesar 3,5 mm juga masih dalam batas toleransi desain, memastikan kaki palsu mampu berfungsi dengan baik tanpa mengalami kegagalan material. Kelebihan dari penggunaan komposit serat kaca

polimer ini adalah harganya yang lebih ekonomis dibandingkan dengan serat karbon, namun tetap memberikan performa yang cukup baik dalam menahan beban dinamis.

Namun demikian, terdapat beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Meskipun komposit serat kaca polimer mampu menahan beban yang diterapkan, modulus elastisitasnya yang lebih rendah dibandingkan serat karbon menyebabkan deformasi yang sedikit lebih besar. Hal ini berpotensi mempengaruhi kenyamanan dan stabilitas kaki palsu dalam jangka panjang jika digunakan untuk aktivitas intens seperti lari jarak jauh. Oleh karena itu, penguatan tambahan di area kritis seperti lengkung kaki palsu dapat dipertimbangkan dalam pengembangan desain selanjutnya untuk mengurangi deformasi dan meningkatkan daya tahan terhadap tegangan berulang.

Kemungkinan pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini meliputi pengujian eksperimental pada prototipe kaki palsu di lapangan dengan subjek manusia, serta penggunaan sensor tekanan untuk mendapatkan data yang lebih detail mengenai distribusi beban selama aktivitas berlari. Selain itu, kombinasi material yang lebih kuat atau penguatan lokal di area tertentu dapat diinvestigasi untuk meningkatkan kinerja kaki palsu dalam aplikasi nyata. Penggunaan metode hybrid, yang menggabungkan serat kaca polimer dengan material lain yang lebih kaku di area tertentu, juga dapat dieksplorasi untuk menghasilkan kaki palsu yang lebih tahan lama dan nyaman digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tryggvason H, Starker F, Armannsdottir AL, Lecomte C, Jonsdottir F. Speed Adaptable Prosthetic Foot: Concept Description, Prototyping and Initial User Testing. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2020;28:2978–86. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3036329>.
- [2] Nguyen NTT, Kiyotaka O, Kazuya O, Toru F, ... Effect of Submicron Glass Fiber Modification on Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite with Different Fiber Length. *Journal of Composites ...* 2020.
- [3] Al Rashid A, Ikram H, Koç M. Additive manufacturing and mechanical performance of carbon fiber reinforced Polyamide-6 composites. *Mater Today Proc* 2022;62:6359–63. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.339>.
- [4] Rodsin K, Ejaz A, Hussain Q, Parichatprecha R. ... -Cost Glass-Fiber-Reinforced-Polymer-Composite-Strengthened Reinforced Concrete Beams: A Comparison with Carbon/Sisal Fiber-Reinforced Polymers. *Polymers (Basel)* 2023.
- [5] Rajesh D, Anand P, Balaji V, Prakash DS, ... Mechanical characterization of glass fiber and glass fiber reinforced with aluminium particulated polymer composite. *Materials Today ...* 2022.
- [6] Ismail M, Rejab MRM, Siregar JP, Mohamad Z, ... Mechanical properties of hybrid glass fiber/rice husk reinforced polymer composite. *Materials Today ...* 2020.
- [7] Ortega JA, Healey LA, Swinnen W, Hoogkamer W. Energetics and Biomechanics of Running Footwear with Increased Longitudinal Bending Stiffness: A Narrative Review. *Sports Medicine* 2021;51:873–94. <https://doi.org/10.1007/S40279-020-01406-5>.
- [8] Ismail R, Fitriyana DF, Habibi MA, Sugiyanto, Bayuseno AP. Computational Analysis of Running Prosthesis Design Using Finite Element Method. *7th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, ICITACEE 2020 - Proceedings* 2020:288–93. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE50144.2020.9239136>.
- [9] Mo S, Leung SHS, Chan ZYS, Sze LKY, Mok KM, Yung PSH, et al. The biomechanical difference between running with traditional and 3D printed orthoses. *J Sports Sci* 2019;37:2191–7. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1626069>.
- [10] Bonacini D. EUROPEAN PATENT SPECIFICATION. <https://DataEpoOrg/Publication-Server/Rest/v10/Publication-Dates/20110928/Patents/EP2065018NWB1/DocumentHtml> 2008.
- [11] Kumar S, Deka K, Kumar R. Comparison between Experimental Value and Finite Element Analysis value of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite. *Young* 2022.
- [12] Hatti PS, Harisha P, Somanakatti AB, ... Study on flexural behavior of glass-fiber reinforced polymer matrix composite. *Materials Today ...* 2022.
- [13] Chauhan SLS, Bhaduri SC. Structural analysis of a four-bar linkage mechanism of prosthetic knee joint using finite element method. *Evergreen* 2020;7:209–15. <https://doi.org/10.5109/4055220>.
- [14] Khan MA, Anand A V, Bhanuprakash L, ... Mechanical Properties of E-Glass Fiber-Basalt Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite. *International Journal of ...* 2020.

- [15] Papanicolaou GC, Portan D V, Kontaxis LC. Interrelation between fiber–matrix interphasial phenomena and flexural stress relaxation behavior of a glass fiber–polymer composite. *Polymers (Basel)* 2021.