
PERANCANGAN DAN PENGUJIAN STATIK PROTOTIPE LOWER LIMB PROSTHETIC

Oleh

Fajar Yulianto Prabowo^{1*}, Suyitno², Venditias Yudha³

¹Program Studi Teknologi Mesin D-III, Program Pendidikan Vokasi, Universitas AKPRIND Indonesia, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Tidar, Indonesia

³Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Indonesia

Email: ^{1*}fajaryulianto@akprind.ac.id

Article History:

Received: 20-03-2025

Revised: 05-04-2025

Accepted: 23-04-2025

Keywords:

Prostesis Kaki Bawah, ISO 10328, Komposit Serat Karbon

Abstract: Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan desain dan prototipe lower limb prosthesis yang lebih sederhana, ringan, terjangkau, dan aman digunakan oleh penderita amputasi kaki di Indonesia. Salah satu permasalahan pada produk lokal yang ada adalah kegagalan pada komponen adapter pylon. Dalam penelitian ini dilakukan perancangan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2013, pembuatan prototipe skala 1:1 menggunakan proses permesinan konvensional, serta pengujian statik sesuai standar ISO 10328 pada kategori beban P3 (pengguna dengan berat hingga 60 kg). Material yang digunakan dalam prototipe meliputi Aluminium ANSI/AA 443.0 untuk socket adapter dan ankle adapter, komposit karbon fiber untuk socket dan pylon, serta silikon RTV 52 untuk komponen kaki (foot). Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe mampu menahan beban hingga 160 kg dengan defleksi maksimum sebesar 0,11 mm. Nilai ini jauh di bawah batas maksimum defleksi yang ditentukan ISO 10328, yaitu 5 mm. Dengan demikian, kaki palsu ini dinyatakan aman dan sesuai standar, serta memiliki potensi sebagai solusi kaki palsu lokal yang lebih ekonomis dan fungsional bagi pengguna di Indonesia.

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di sektor kesehatan telah memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan kualitas hidup, termasuk bagi mereka yang penyandang disabilitas. Salah satu inovasi yang sangat penting adalah pengembangan kaki palsu bagi individu yang mengalami amputasi. Kehadiran kaki palsu ini amat membantu para penyandang disabilitas dalam menjalani aktivitas sehari-hari, seperti berjalan, bekerja, dan berolahraga. Kehilangan anggota gerak bawah, terutama akibat amputasi, tidak hanya memengaruhi kondisi fisik, tetapi juga berdampak secara psikologis dan sosial. Oleh karena itu, ketersediaan alat bantu seperti kaki palsu menjadi kebutuhan yang sangat mendesak dan penting. Prostesis, menurut

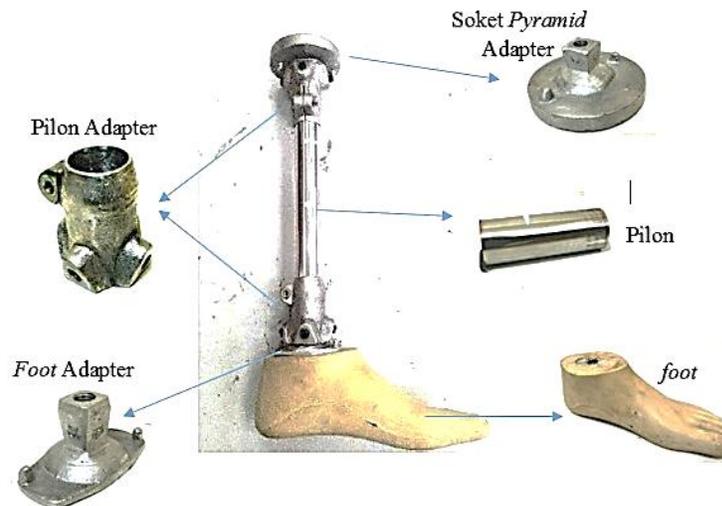
definisi dari *World Health Organization* (WHO, 2017), adalah alat buatan yang berfungsi untuk menggantikan sebagian atau seluruh anggota tubuh yang hilang (Ebrahim dkk., 2018). Alat ini dipasang di luar tubuh dengan tujuan meniru fungsi gerak tubuh manusia secara alami. Bagi individu yang mengalami amputasi, prostesis tidak hanya berperan sebagai alat bantu fisik, tetapi juga sebagai dukungan psikologis yang membantu mereka beradaptasi dengan kondisi baru setelah amputasi. Dukungan psikososial yang disertai dengan penggunaan alat bantu yang tepat dapat mendorong pasien untuk kembali aktif dan produktif dalam kehidupan sehari-hari.

Jenis prostesis yang paling umum digunakan untuk amputasi ekstremitas bawah adalah prostesis kaki. Di antara dua tipe prostesis, yaitu eksoskeletal dan endoskeletal, tipe endoskeletal lebih diminati karena menawarkan kenyamanan serta estetika yang lebih baik (Pithawa dkk., 2006). Contoh terkenal dari prostesis endoskeletal adalah produk dari Ottobock, sebuah perusahaan asal Jerman. Namun, harga produk tersebut sangat tinggi, berkisar antara 70 hingga 80 juta rupiah per unit, membuatnya tidak terjangkau bagi sebagian besar masyarakat Indonesia. Selain itu, karakteristik fisik produk impor ini sering kali tidak sesuai dengan anatomi tubuh penggunanya di Indonesia (Bernadheta, 2010). Di Indonesia, pengembangan prostesis terus berkembang, meskipun masih terbatas pada skala penelitian. Upaya ini memberikan dampak positif bagi para perajin kaki palsu lokal. Tujuannya adalah untuk mengurangi biaya produksi tanpa mengorbankan kekuatan struktural (Irawan dkk., 2011). Selain itu, penelitian mengenai pemanfaatan pegas dan sensor pada prostesis bertujuan untuk meningkatkan kenyamanan dan efisiensi gerakan pengguna (Laszczak dkk., 2016).

Pusat rehabilitasi di Yogyakarta telah menjadi pelopor dalam produksi kaki palsu lokal. Produk yang dihasilkan mampu bersaing secara fungsional, meskipun masih menghadapi kendala dari segi harga, yaitu berkisar antara 7 hingga 12 juta rupiah per unit. Beberapa komponen, seperti pylon adapter, juga sering mengalami kegagalan saat digunakan, yang menjadi tantangan tersendiri dalam pengembangan prostesis lokal yang berkualitas dan terjangkau. Sangat penting untuk melakukan penelitian dan inovasi pada desain serta material kaki palsu yang dapat diproduksi secara lokal, dengan kekuatan yang memadai dan harga yang terjangkau bagi masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prototipe kaki palsu endoskeletal yang memanfaatkan teknologi dan material lokal, serta diuji secara mekanis sesuai dengan standar internasional seperti ISO 10328. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam dunia rehabilitasi medik di Indonesia dan meningkatkan kualitas hidup penyandang disabilitas akibat amputasi.

METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi studi literatur, redesain lower limb prosthetic, fabrikasi prototipe, pengujian statik prototipe. Standar pengujian mengacu pada ISO 1032 dengan klasifikasi produk P3 atau mampu menahan beban sebesar 60 kilogram. Perancangan *lower limb prosthetic* berdasarkan produk prostesis yang sudah ada di pasaran dari salah satu pusat rehabilitasi di Yogyakarta seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pengembangan prototipe yang dilakukan adalah mendesain ulang prostesis yang ada, menyederhanakan part, mengganti material untuk selanjutnya diuji dengan ketentuan yang berlaku.



Gambar 2.1. Produk Kaki Palsu Lokal

Ukuran yang dipakai pada pengembangan protesis yaitu total tinggi kaki palsu yang telah di *assembly* 45cm dengan menggunakan material Aluminium ANSI 443.0 dan serat karbon, pada kaki digunakan bahan silikon rubber dengan penguat kayu di dalamnya. Adapun bagian dari protesis yang di desain ulang adalah penambahan socket, pada komponen adapter socket dan adapter pylon lebih di sederhanakan dengan harapan makin sedikit part yang dibuat maka akan semakin ekonomis ketika di produksi masal. Perancangan model protesis menggunakan software *Autodesk Inventor Professional 2013*.

Pengujian prototipe ini menggunakan pendekatan ISO 10328 yang telah disesuaikan. Beban yang digunakan disesuaikan untuk pengguna dengan berat 60 kg, yang menurut ISO 10328 termasuk dalam kategori P3, dengan beban maksimal 1610 N (sekitar 160 kg), apabila terjadi defleksi lebih dari 5 mm atau jika komponen protesis mengalami kerusakan atau deformasi maka protesis dinyatakan gagal. Pengujian dilakukan dengan uji tekan secara aksial, dimulai dari beban 5 kg, lalu bertahap meningkat menjadi 10 kg, 20 kg, 40 kg, 80 kg, 100 kg, 120 kg, 140 kg, hingga 160 kg. Free body diagram ditunjukkan pada Gambar 2.2.

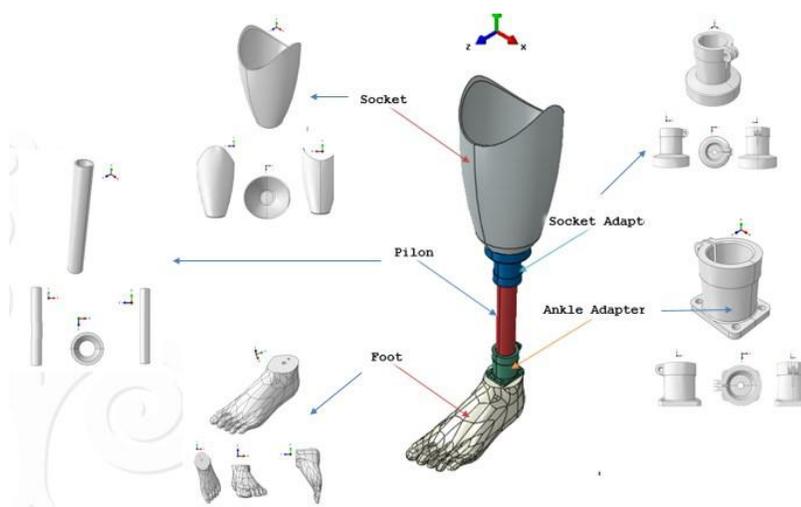


Gambar 2.2. Skema pembebanan pada prototipe

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Desain Prototipe Kaki Palsu

Model rancangan harus memenuhi kriteria fungsi dari kaki palsu tersebut dan bahan yang digunakan untuk membuat prototipe kaki palsu lower limb prostesis tersebut antara lain Aluminium ANSI/AA 443.0, komposit Carbon fiber dan Silikon Rubber. Adapun desain baru yang telah dibuat dapat ditunjukkan pada Gambar 3.1. Dalam tahap redesain atau perancangan harus mempertimbangkan proses manufaktur yang akan dilakukan karena output dari penelitian ini adalah mewujudkan prototipe 1:1 sesuai dengan fungsi aslinya dan hanya menggunakan proses permesinan konvensional. Setelah selesai, file desain tersebut menghasilkan 2 produk berupa gambar kerja 2D dan 3D file dengan format STL yang akan dipakai untuk proses pencetakan pola menggunakan 3D printing.



Gambar 3.1. Desain 3D model prototipe

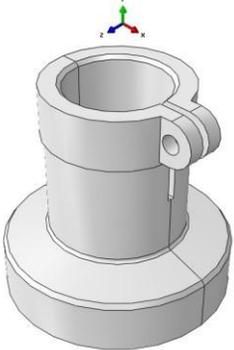
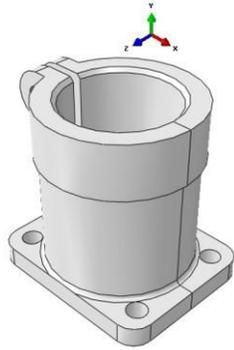
Adapun bagian-bagian yang kita desain ulang antara lain adalah penyederhanaan komponen pilon adapter dengan soket pyramid adapter pada produk sebelumnya menjadi soket adapter, pada bagian ini kita lakukan penggabungan 2 komponen tersebut dengan alasan untuk menurunkan berat, menurunkan ongkos produksi dari proses pengecoran hingga machining tanpa menghilangkan dari fungsi dan kekuatan komponen tersebut, bahkan diharapkan dapat meningkatkan daya tahan terhadap beban pengguna karena tidak ada ikatan/kuncian yang terjadi pada kedua komponen ini karena komponen telah dijadikan satu. Tabel 3.1 menunjukkan hasil redesain prototipe komponen kaki palsu.

Pilon adapter dengan foot adapter pada produk sebelumnya di desain ulang menjadi ankle adapter dengan alasan hampir sama seperti komponen soket adapter yaitu dengan harapan dapat meningkatkan daya tahan atau kekuatan komponen terhadap beban pengguna karena tidak adanya sambungan/ikatan pada kedua komponen tersebut, mengurangi ongkos produksi dan mengurangi berat dari komponen tersebut. Penambahan komponen bagian atas berupa soket atau sebuah komponen yang berfungsi untuk meneruskan tegangan antara puntung amputasi dengan bagian tubuh atau segmen yang digantikan, bagian ini adalah bagian yang kontak langsung dengan kulit pengguna. Pemilihan material untuk soket tidak hanya didasarkan pada kekuatan soket dalam hal membantu

puntung amputasi untuk menyokong tubuh namun juga harus memperhatikan tingkat kenyamanan pengguna. Material soket haruslah nyaman saat dipakai, tidak cepat menimbulkan luka karena gesekan yang terjadi dengan kulit.

Sedangkan untuk komponen yang lainnya tidak dilakukan re-desain, antara foot dan pilon tidak kita desain ulang dai segi ukuran dan bentuk karena pada bagian ini ukuran kaki dan tinggi pilon beraneka ragam, namun pada pilon kita mencoba membuat dengan material karbon komposit matrik polimer agar mendapatkan berat yang lebih ringan karena pada komponen sebelumnya dipakai bahan Stainless Steel.

Tabel 3.1 Desain ulang komponen kaki palsu

No	Komponen Awal	Re-Desain
1.	soket <i>pyramid</i> adapter 	Soket adapter 
2.	pilon adapter 	
3.	<i>foot</i> adapter 	
4.	pilon adapter 	

Tabel 3.2 merupakan hasil dari desain ulang komponen, penghilangan bagian *screw* pada pilon adapter yaitu 4 rumah baut pengunci dilakukan, karena fungsi bagian tersebut dapat dihilangkan/digantikan pada komponen yang baru tanpa melemahkan dari pada fungsi komponen tersebut, sedangkan pada bagian bawah *foot* adapter geometri panjang kita ganti menjadi persegi panjang yang simetris karena bagian ini tidak berpengaruh pada fungsi penyambungan kaki bawah dengan pilon.
Spesifikasi kaki palsu

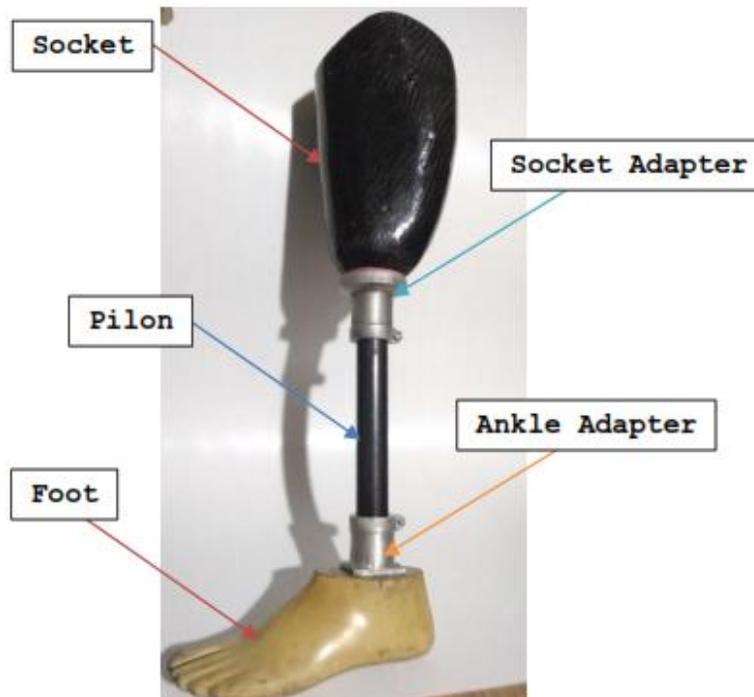
Jenis kaki palsu : *Lower Limb Prothesis*
 Beban pengguna : 60 kg
 Dimensi : Tinggi 45 cm

Tabel 3.2 Daftar Komponen produk lokal dan produk baru

No	Nama Komponen	Material Produk Lokal	Material
1.	<i>Socket</i>	-	<i>Carbon fiber</i> komposit
2.	<i>Socket adapter</i>	Al Si	Aluminium ANSI 443.0
3.	<i>Pilon</i>	SS	<i>Carbon fiber</i> komposit
4.	<i>Ankle adapter</i>	Al Si	Aluminium ANSI 443.0
5.	<i>foot</i>	<i>Rubber</i>	Silikon <i>rubber</i> RTV 52
6.	<i>Nut Screw/Bolt</i>	SS	SS 304

Proses Manufaktur Prototipe Kaki Palsu

Hasil prototipe kaki palsu tipe lower limb prothesis telah dibuat dengan teknologi yang sederhana serta menggunakan mesin-mesin konvensional yang ada di lab manufaktur. Prototipe dibuat sebanyak dua buah untuk dilakukan pengujian eksperimen serta digunakan sebagai sample dengan skala 1:1 yang sesuai dengan keadaan aslinya (Gambar 3.2). Spesifikasi hasil dari proses manufaktur produk kaki palsu lower limb prothesis ditunjukkan Tabel 3.3. Perbandingan produk kaki paslu lokal dengan pengembangan desain baru ditunjukkan pada Tabel 3.4.



Gambar 3.2. Prototipe Lower Limb Prothesis
 Tabel 3.3 Daftar Komponen-komponen prototipe kaki

No	Komponen	Pengadaan	Material	Berat
1.	Socket	Buat	Carbon Komposit	154 gram
2.	Socket Adapter	Buat	Al ANSI 443.0	76 gram
3.	Pilon	Buat	Carbon Komposit	53 gram
4.	Ankle Adapter	Buat	Al ANSI 443.0	140 gram
5.	Foot / kaki	Buat	Silikon RTV 52	425 gram
6.	Screw	Beli	SS 304	24 gram

Tabel 3.4. Perbandingan produk lokal dengan desain baru

No	Produk lokal	Produk Baru
1.	858 gram 	914 gram 
2.	-	154 gram 
3	111 gram 	76 gram 

4	100 gram 	
5	73 gram 	53 gram 
6	100 gram 	140 gram 
7	46 gram 	
8	248 gram 	245 

Pengujian Statis Prototipe Lower Limb Protesis

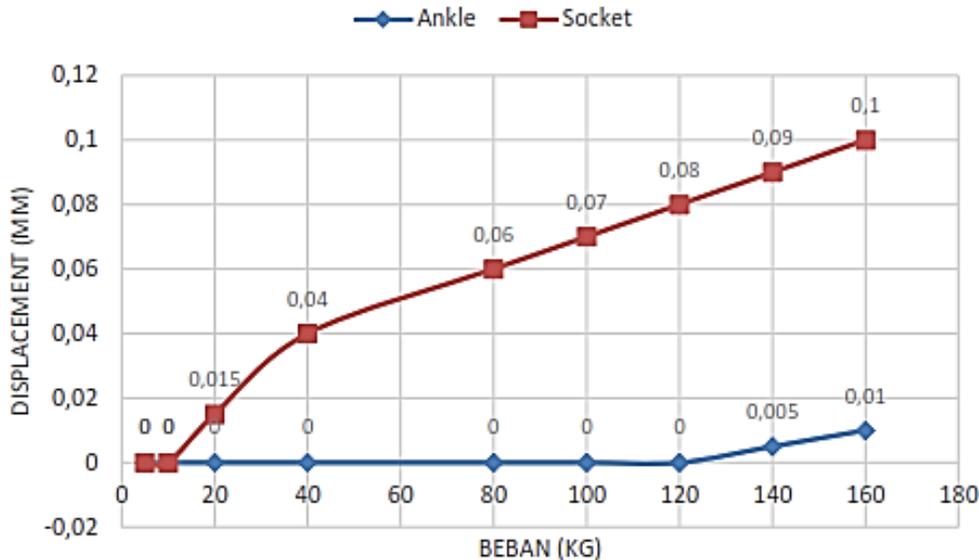
Pengujian dari produk prototipe kaki palsu lower limb protesis ini menggunakan pembebanan sesuai standar ISO 10328, yaitu dilakukan pembebanan aksial secara vertikal dengan beban minimal 5 kg sampai dengan beban maksimal 160 kg. Adapun beberapa alat uji yang dipakai dalam eksperimen ini antara lain: 2 buah dial indicator untuk mengetahui

defleksi yang terjadi pada komponen adapter, yaitu adapter socket kaki beserta adapter foot ankle, ada dua variasi pilon yang digunakan dalam pengujian ini yaitu pilon carbon komposit dan pilon Stainles Steel. Skema pengujian static pada kaki palsu ditunjukkan pada Gambar 3.3. Pengujian dengan melakukan pembebanan bertahap dari 5kg sampai dengan 160kg dengan masing-masing pengamatan pembebanan dilakukan 10 kali, setiap satu siklus pembebanan dilakukan kalibrasi alat ukur dan kelurusan dari komponen uji beserta kelengkapannya.



Gambar 3.3. Pengujian Prototype Lower Limb Prosthesis, (kiri: posisi pembacaan alat ukur, kanan: posisi pembebanan dengan 5Kg beban)

Gambar 3.4 merupakan hasil displacement pada komponen ankle adapter dan socket adapter untuk pilon Carbon fiber. Komponen ankle adapter mengalami sedikit defleksi atau pergeseran. Defleksi pertama kali terdeteksi pada level pembebanan 140 kg dengan nilai sebesar 0,005 mm. Defleksi maksimum yang terjadi pada komponen ini tercatat sebesar 0,01 mm pada pembebanan 160 kg. Sementara itu, pada komponen socket adapter, peningkatan grafik defleksi sudah terlihat sejak level pembebanan 20 kg dan terus meningkat hingga mencapai 160 kg. Nilai defleksi tertinggi pada komponen ini tercatat sebesar 0,1 mm. Tren peningkatan defleksi yang signifikan terlihat pada rentang pembebanan 20 kg hingga 40 kg, di mana defleksi meningkat dari 0,015 mm menjadi 0,04 mm.



Gambar 3.4. Displacement pada komponen ankle adapter dan socket adapter untuk pylon Carbon fiber

Pada komponen ankle adapter, terdeteksi adanya defleksi atau pergeseran kecil. Defleksi pertama kali terjadi pada level pembebanan sebesar 140 kg, dengan nilai sebesar 0,005 mm. Defleksi maksimum yang tercatat pada komponen ini adalah sebesar 0,01 mm pada level pembebanan 160 kg. Sementara itu, untuk komponen socket adapter, peningkatan grafik defleksi mulai terlihat sejak level pembebanan 20 kg dan terus meningkat hingga 160 kg. Nilai defleksi tertinggi yang tercatat pada komponen ini adalah sebesar 0,1 mm.

Hasil pengamatan terhadap grafik pada Gambar 3.4 menunjukkan bahwa komponen-komponen yang terbuat dari material aluminium ANSI/AA 443.0 mengalami defleksi maksimum sebesar 0,1 mm untuk pylon karbon, dan 0,11 mm untuk pylon baja tahan karat (stainless steel). Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa displacement yang terjadi pada pembebanan 160 kg, untuk jenis kaki palsu lower limb prosthesis kategori P3—yang dirancang bagi pengguna dengan berat maksimal 60 kg—masih berada dalam batas aman sesuai dengan standar ISO 10328. Hal ini dikarenakan nilai displacement yang terjadi masih jauh di bawah batas maksimum yang diizinkan oleh ISO 10328, yaitu sebesar 5 mm.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan memproduksi prototipe kaki palsu lower limb prosthesis 1:1 setinggi 45 cm dengan desain sederhana dan ringan, menggunakan material komposit karbon fiber dan aluminium ANSI 443.0. Prototipe ini mampu menahan beban hingga 160 kg dan telah diuji berdasarkan standar ISO 10328. Hasil pengujian menunjukkan displacement maksimum sebesar 0,1 mm, jauh di bawah batas 5 mm yang ditentukan, sehingga dinyatakan aman untuk pengguna dengan berat maksimal 60 kg.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bernadheta, F. H. (2010). Kajian Dynamic Gait Bagi Pengguna Prosthetic Atas Lutut Endoskeletal Sistem Energy Storing Dengan Mekanisme 2 Bar. Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

- [2] Ebrahim, Sadeghi-Demneh, Forghany, S., Onmanee, P., Trinler, U., Dillon, M. P., & Baker, R. (2018). The influence of standards and clinical guidelines on prosthetic and orthotic service quality: A scoping review. *Disability and rehabilitation*, 40(20), 2458-2465.
- [3] Irawan, A. P., Soemardi, T. P., Reksoprodjo, A. H. S., & Widjajalaksmi, K. (2011). Tensile and flexural strength of ramie fiber reinforced epoxy composites for socket prosthesis application. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 6(1), 46-50.
- [4] Laszczak, P., Mcgrath, M., Tang, J., Gao, J., Jiang, L., Bader, D. L., ... & Zahedi, S. (2016). A pressure and shear sensor system for stress measurement at lower limb residuum/socket interface. *Medical engineering & physics*, 38(7), 695-700.
- [5] Pithawa, A. K., Singh, G., & Ravindranath, G. (2006). Clinical Appraisal of Indigenous Below Knee Endoskeletal Carbon Fibre Prosthesis. *Medical Journal Armed Forces India*, 62(2), 108-111.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN