

RANCANG BANGUN ROBOT *ANKLE EXOSKELETON* DENGAN MEKANISME *CABLE-DRIVEN* GUNA ASISTENSI MOBILITAS BERJALAN

*Muhammad Abdul 'Aziz¹, Mochammad Ariyanto², Rifky Ismail²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: aziz.mabdul14@gmail.com

Abstrak

Gangguan mobilitas pada ekstremitas bawah, khususnya kelemahan pada sendi pergelangan kaki (*ankle*), merupakan masalah signifikan yang mempengaruhi kemandirian pasien. Eksoskeleton konvensional tipe rigid memiliki keterbatasan berupa bobot yang berat dan inersia yang tinggi pada bagian kaki (*distal mass*), yang secara eksponensial dapat meningkatkan biaya metabolisme pengguna. Penelitian ini bertujuan merancang bangun prototipe robot *ankle exoskeleton* menggunakan mekanisme *cable-driven* guna memberikan bantuan mikro (*micro-assistance*) sebagai stimulus proprioseptif pada siklus berjalan. Desain sistem memusatkan aktuator motor DC JGB37-545 di area pinggang untuk meminimalkan beban inersia, menyalurkan gaya tarik ke pergelangan kaki melalui transmisi kabel Bowden baja. Komponen utama difabrikasi menggunakan metode *3D printing* dengan material *Polylactic Acid* (PLA). Analisis simulasi struktural (*Finite Element Analysis*) menggunakan ANSYS menunjukkan desain aman dengan *Safety Factor* bernilai 15; di mana komponen *motor box* mengalami tegangan maksimum 1,2053 MPa dan deformasi 0,0148 mm, serta komponen *pulley* memiliki tegangan 0,0493 MPa dan deformasi 0,0003 mm. Pengujian fungsional dan analisis kinematika berbasis video (*Kinovea*) membuktikan purwarupa ini memfasilitasi gerakan berjalan, meski terdapat sedikit pembatasan *Range of Motion* (ROM) pada puncak dorsifleksi dan fluktuasi transisi gerak (*jerk*). Simulasi dinamis (*MuJoCo*) mengonfirmasi saturasi torsi aktuator (1,5 Nm) pada fase *push-off* untuk target pengguna berbobot 68-70 kg, menegaskan bahwa sistem beroperasi murni pada mode bantuan parsial (*Partial Assist*).

Kata Kunci: *ankle exoskeleton; cable-driven; distal mass; analisis elemen hingga; kinematika*

Abstract

Mobility impairments in the lower extremities, particularly weakness in the ankle joint, are a significant issue affecting patient independence. Conventional rigid-type exoskeletons have limitations such as heavy weight and high inertia on the lower limbs (distal mass), which can exponentially increase the user's metabolic cost. This study aims to design and develop a prototype of a cable-driven ankle exoskeleton robot to provide micro-assistance as a proprioceptive stimulus during the gait cycle. The system design centralizes the JGB37-545 DC motor actuator in the waist area to minimize inertia load, transmitting the pulling force to the ankle via a steel Bowden cable transmission. The main components were fabricated using 3D printing methods with Polylactic Acid (PLA) material. Structural simulation (Finite Element Analysis) using ANSYS indicates that the design is highly secure with a Safety Factor of 15; the motor box component experienced a maximum stress of 1.2053 MPa and a deformation of 0.0148 mm, while the pulley component recorded a stress of 0.0493 MPa and a deformation of 0.0003 mm. Functional testing and video-based kinematic analysis (Kinovea) demonstrated that the prototype facilitates walking motion, although there is a slight Range of Motion (ROM) restriction at peak dorsiflexion and movement transition fluctuations (jerk). Dynamic simulation (MuJoCo) confirmed an actuator torque saturation of 1.5 Nm during the push-off phase for target users weighing 68-70 kg, affirming that the system operates purely in Partial Assist mode.

Keywords: *ankle exoskeleton; cable-driven; distal mass; finite element analysis; kinematics*

1. Pendahuluan

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang robotika telah membawa dampak besar pada berbagai sektor, termasuk kesehatan. Sistem mekanik-elektronik ini kini banyak diterapkan untuk membantu diagnosis, tindakan medis, hingga rehabilitasi pasien [1]. Salah satu pengembangan yang mendapat perhatian luas adalah robot eksoskeleton, yaitu perangkat yang dipakai (*wearable*) di luar tubuh manusia untuk mendukung, memperkuat, atau menggantikan fungsi pergerakan [2].

Gangguan mobilitas pada ekstremitas bawah, khususnya kelemahan pada sendi pergelangan kaki (*ankle*), merupakan masalah signifikan yang mempengaruhi kemandirian pasien pasca-stroke atau lansia. Teknologi eksoskeleton robotik muncul sebagai solusi rehabilitasi yang menjanjikan. Namun, eksoskeleton konvensional tipe rigid (kaku) memiliki keterbatasan fundamental berupa bobot yang berat dan inersia yang tinggi pada kaki (*distal mass*). Menambahkan massa pada bagian ujung kaki terbukti meningkatkan biaya metabolisme pengguna secara eksponensial karena gaya inersia yang besar saat kaki diayunkan [3]. Selain itu, ketidaksesuaian sumbu putar (*joint misalignment*) antara sendi robot yang kaku dan sendi biologis manusia sering menyebabkan ketidaknyamanan dan risiko cedera.

Sebagai solusi inovatif untuk mengatasi masalah tersebut, konsep Soft Wearable Robot atau "Exosuit" dengan mekanisme transmisi kabel (*cable-driven*) mulai diadaptasi. Pendekatan ini menghilangkan kerangka kaku dan menggantikannya dengan transmisi kabel fleksibel. Dalam konfigurasi ini, komponen berat seperti aktuator motor dipindahkan ke pinggang (*waist-mounted*) agar dekat dengan pusat massa tubuh (*Center of Mass*), sementara gaya ditarik dan disalurkan ke pergelangan kaki menggunakan kabel Bowden. Desain ini secara teoritis mampu meminimalkan penalti metabolik dan meningkatkan kenyamanan pengguna secara signifikan [4]. Penelitian terkait membuktikan bahwa penggunaan eksoskeleton berbasis kabel fleksibel (*soft exosuit*) dengan aktuator terpusat terbukti secara klinis mampu mengurangi biaya metabolik secara drastis selama siklus berjalan [5].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun purwarupa robot ankle eksoskeleton menggunakan mekanisme *cable-driven*. Fokus utama penelitian mencakup perancangan komponen ringan berbasis cetak 3D berbahan *Polylactic Acid* (PLA), analisis keamanan struktural menggunakan metode Elemen Hingga (FEA), serta evaluasi kinematika pola jalan untuk melihat kemampuan sistem dalam memberikan bantuan secara parsial.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Perancangan Sistem Mekanik

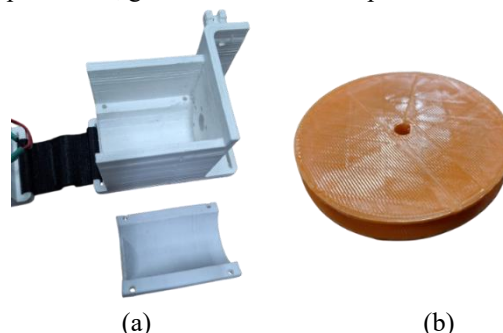
Desain mekanik *ankle exoskeleton* difokuskan pada pemindahan titik berat sistem dari area ekstremitas bawah ke pusat massa tubuh di area pinggang. Aktuator utama menggunakan motor DC JGB37-545 yang ditempatkan pada sebuah wadah (*motor box*) di pinggang. Gaya tarik dari aktuator ditransmisikan menuju sendi pergelangan kaki menggunakan sistem kabel Bowden baja. Pemilihan mekanisme transmisi kabel Bowden ini sangat ideal untuk aktuasi jarak jauh (*remote actuation*) karena memberikan fleksibilitas pergerakan sendi secara multi-arah sekaligus mengkompensasi gesekan (*friction*) yang terjadi [6]. Pemilihan mekanisme transmisi kabel Bowden ini bertujuan untuk memberikan fleksibilitas pergerakan sekaligus mengkompensasi gesekan (*friction*) yang terjadi pada lekuk tubuh pengguna selama siklus berjalan [7].



Gambar 1. Desain 3D *ankle exoskeleton* mekanisme *cable-driven*

2.2 Manufaktur dan Simulasi Struktural

Komponen struktural utama, yang meliputi *motor box* dan *pulley*, difabrikasi menggunakan metode *3D printing* berteknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM). Material yang digunakan adalah *Polylactic Acid* (PLA), yang dipilih karena memiliki karakteristik kemudahan cetak serta rasio kekuatan terhadap massa yang mumpuni untuk aplikasi robotik ringan [8]. Sebelum fabrikasi, integritas struktural desain divalidasi melalui *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan perangkat lunak ANSYS. Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi distribusi tegangan *Von Mises* dan deformasi maksimum di bawah pembebanan operasional, guna memastikan komponen terhindar dari risiko kegagalan struktural [9].



Gambar 2. Komponen cetak 3D berbahan *Polylactic Acid* (PLA): (a) *Motor box*, (b) *Pulley*

2.3 Skenario Pengujian dan Evaluasi

Kinerja purwarupa dievaluasi melalui dua pendekatan fungsional:

1. Analisis Kinematika: Pengujian dilakukan secara langsung pada pengguna untuk merekam pola jalan. Data pergerakan dievaluasi menggunakan perangkat lunak Kinovea guna menganalisis *Range of Motion* (ROM) pada sendi pergelangan kaki dan parameter *jerk* (turunan dari percepatan) untuk menilai kehalusan biomekanika gerak [8].

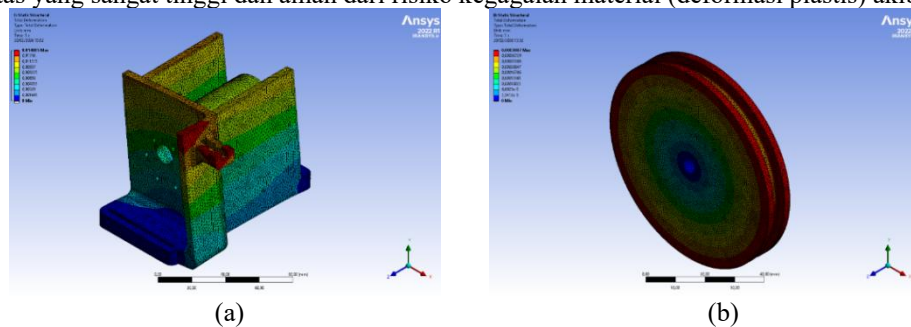
2. Simulasi Dinamis: Karakteristik gaya dan batas saturasi torsi aktuator divalidasi menggunakan simulasi komputasi dinamika (MuJoCo). Simulasi ini difokuskan untuk mengukur profil torsi motor saat pengguna (target berat 68-70 kg) memasuki fase *push-off* pada siklus berjalan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Realisasi Prototipe dan Analisis Kekuatan Struktur (FEA)

Prototipe *ankle exoskeleton* dengan mekanisme *cablе-driven* berhasil direalisasikan dengan menempatkan aktuator di area pinggang. Konfigurasi ini terbukti efektif meminimalkan beban inersia pada kaki (*distal mass*), dibuktikan dengan bobot total perangkat keras yang secara keseluruhan hanya mencapai 1,8 kg.

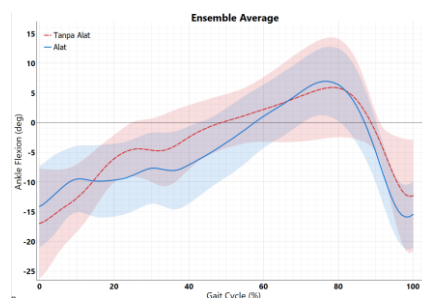
Untuk memvalidasi keamanan operasional, simulasi elemen hingga (FEA) dilakukan pada komponen cetak 3D berbahan PLA. Hasil simulasi menunjukkan bahwa di bawah pembebanan maksimal, komponen *motor box* hanya mengalami tegangan (*stress*) maksimum sebesar 1,2053 MPa dengan deformasi 0,0148 mm. Sementara itu, komponen *pulley* mencatat tegangan yang jauh lebih kecil, yakni 0,0493 MPa dengan deformasi 0,0003 mm. Dari data tersebut, kedua komponen menghasilkan nilai *Safety Factor* (SF) sebesar 15. Nilai ini mengindikasikan bahwa desain struktural memiliki integritas yang sangat tinggi dan aman dari risiko kegagalan material (deformasi plastis) akibat beban kerja.



Gambar 3. Distribusi tegangan *Von Mises* hasil simulasi elemen hingga pada (a) *Motor box* dan (b) *Pulley*

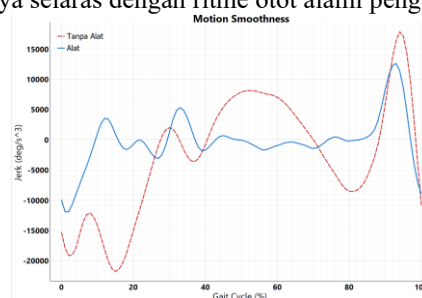
3.2 Analisis Pola Jalan (*Gait Analysis*) dan Kinematika

Pengujian fungsional pada pengguna menunjukkan bahwa purwarupa secara umum dapat memfasilitasi gerakan lokomotorik dasar selama siklus berjalan. Namun, evaluasi kinematika menggunakan Kinovea merekam adanya sedikit restriksi (pembatasan) *Range of Motion* (ROM) pada area puncak dorsifleksi. Restriksi ini terjadi secara spesifik pada rentang 15-40% dari fase *mid-stance*.



Gambar 4. Grafik perbandingan sudut *Range of Motion* (ROM) pergelangan kaki pada siklus berjalan normal dan saat menggunakan eksoskeleton

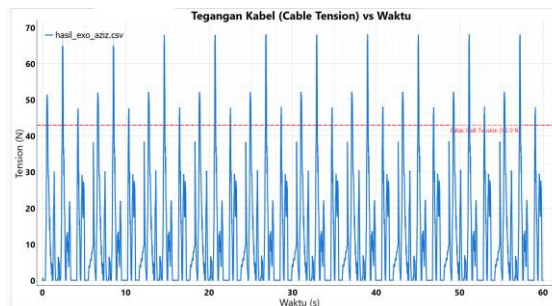
Lebih lanjut, analisis parameter *jerk* (perubahan percepatan) memperlihatkan adanya fluktuasi pada transisi gerak [10]. Fluktuasi ini mengindikasikan keberadaan getaran mekanis pada sistem transmisi kabel, atau menunjukkan bahwa tarikan motor aktuator belum sepenuhnya selaras dengan ritme otot alami pengguna (*fighting the motor*).



Gambar 5. Analisis parameter *jerk* untuk evaluasi kehalusan transisi gerak selama siklus berjalan

3.3 Evaluasi Torsi Aktuator dan Dinamika Bantuan

Untuk memvalidasi kapasitas aktuator dalam memberikan bantuan dorongan gaya berjalan, simulasi dinamis dilakukan menggunakan lingkungan komputasi MuJoCo. Berdasarkan parameter target pengguna dengan berat badan 68-70 kg, kurva hasil simulasi mengonfirmasi bahwa motor DC JGB37-545 mengalami saturasi torsi di angka 1,5 Nm tepat saat sistem memasuki fase *push-off* (tolakan kaki). Batas saturasi ini menegaskan bahwa sistem aktuasi yang dirancang beroperasi murni pada mode bantuan parsial (*Partial Assist*). Alat ini belum dapat menggantikan kerja otot secara penuh, melainkan berfungsi sebagai stimulus proprioseptif tambahan guna memberikan dorongan mikro (*micro-assistance*) pada pergelangan kaki.



Gambar 6. Profil keluaran torsi aktuator pada simulasi dinamis fase *push-off* (MuJoCo)

4. Kesimpulan

Rancang bangun purwarupa *ankle exoskeleton* dengan mekanisme *cable-driven* berhasil direalisasikan secara efektif. Penempatan aktuator motor DC di area pinggang terbukti mampu meminimalkan beban inersia ayunan pada kaki (*distal mass*), yang ditunjukkan dengan rendahnya bobot total perangkat keras, yakni hanya sebesar 1,8 kg. Komponen struktural berbahan dasar PLA hasil cetak 3D (*motor box* dan *pulley*) juga menunjukkan tingkat keamanan yang sangat memadai. Berdasarkan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA), desain tersebut memiliki *Safety Factor* (SF) bernilai 15, menjadikannya sangat aman dari risiko kegagalan struktural operasional.

Dari segi kinerja biomekanika, purwarupa ini mampu memfasilitasi gerakan berjalan dan memberikan gaya dorong dengan batas saturasi torsi sebesar 1,5 Nm pada fase *push-off* (beroperasi dalam mode *Partial Assist*). Meskipun demikian, evaluasi kinematika menunjukkan masih terdapat sedikit restriksi *Range of Motion* (ROM) pada puncak dorsifleksi (fase 15-40% *mid-stance*) serta fluktuasi *jerk* pada transisi gerak. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk pengembangan ke depannya, diperlukan penyempurnaan pada algoritma kendali agar tarikan motor dapat sepenuhnya selaras dan sinkron dengan pergerakan otot alami pengguna tanpa menimbulkan efek *fighting the motor*.

5. Daftar Pustaka

- [1] Shi, D., Zhang, W., Zhang, W., & Ding, X. (2019). A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 32, 1-11.
- [2] Khomami, S. A., & Xie, S. Q. (2021). Soft wearable robots for lower limb rehabilitation: A review. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*.
- [3] Bae, J., Sivi, C., Rouleau, M., Menard, N., O'Donnell, K., Galiana, I., ... & Walsh, C. J. (2015). A lightweight and efficient portable soft exosuit for paretic ankle assistance in walking. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5481-5488.
- [4] Awad, L. N., Bae, J., O'Donnell, K., De Rossi, S. M. M., Hendron, K., Sloop, L. H., ... & Walsh, C. J. (2017). A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke. *Science Translational Medicine*, 9(400), eaai9084.
- [5] Quinlivan, B. T., Lee, S., Malcolm, P., Rossi, D. M., Grimmer, M., Sivi, C., ... & Walsh, C. J. (2017). Assistance magnitude versus metabolic cost reductions for a tethered multiarticular soft exosuit. *Science Robotics*, 2(2), eaah4416.
- [6] Glowinski, S., Ptak, A., & Krzyzynski, T. (2020). Design and analysis of a cable-driven exoskeleton. *Mechanism and Machine Theory*, 150, 103850.
- [7] Chen, Z., Zhang, Z., & Wu, X. (2014). Friction modeling and compensation of Bowden-cable transmission system. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(10).
- [8] Hussain, G., et al. (2021). Fused Deposition Modeling (FDM) of PLA: A Review. *Polymers*.
- [9] Tran Thanh Tung, dkk. (2023). Structural analysis of exoskeleton frames. *International Journal of Mechanical Engineering*.
- [10] Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* (4th ed.). John Wiley & Sons.