

RANCANG BANGUN ROBOT *LOWER-LIMB EXOSKELETON* DENGAN MEKANISME *CABLE DRIVEN* GUNA REHABILITASI GANGGUAN MOBILITAS

*Hari Agung Hazma Hizrian¹, Mochammad Ariyanto², M. Munadi²

¹Mahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: aufaopexck@gmail.com

Abstrak

Gangguan mobilitas pada ekstremitas bawah akibat kondisi medis seperti *stroke* atau cedera tulang belakang memerlukan intervensi rehabilitasi yang efektif. Teknologi robot *exoskeleton* berkembang sebagai solusi asistif, namun tantangan utama terletak pada bobot perangkat dan interaksi yang aman dengan pengguna. Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun prototipe *lower-limb exoskeleton* menggunakan mekanisme *cable-driven* yang ringan serta mengembangkan sistem analisis pola jalan (*gait analysis*) berbasis visi komputer yang terjangkau. Perancangan mekanik menggunakan motor *Brushless DC* (BLDC) dengan transmisi kabel sintetis (*Dyneema*) dan komponen struktural berbahan PLA hasil cetak 3D. Sistem kendali dan monitoring dikembangkan menggunakan algoritma Python dengan pustaka *MediaPipe* untuk mendeteksi sudut sendi secara *real-time* tanpa penanda (*markerless*). Evaluasi kinerja meliputi karakterisasi gaya tarik aktuator terhadap sinyal PWM dan validasi akurasi sistem pengukuran visual dibandingkan dengan perangkat lunak standar *Kinovea*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aktuator mampu menghasilkan gaya tarik maksimum sebesar 8,34 N (0,85 kg) pada kondisi beban puncak. Validasi sistem pengukuran menunjukkan korelasi tinggi antara metode Python/*MediaPipe* dan *Kinovea*, membuktikan keandalan sistem dalam memantau sudut fleksi lutut dan orientasi vertikal tubuh. Penelitian ini menyimpulkan bahwa mekanisme *cable-driven* efektif dalam mereduksi bobot sistem pada kaki, dan integrasi sistem visi komputer menawarkan solusi monitoring rehabilitasi yang presisi.

Kata Kunci: *cable-driven; computer vision; gait analysis; lower-limb exoskeleton; rehabilitasi*

Abstract

Mobility impairments in the lower extremities due to medical conditions such as stroke or spinal cord injury require effective rehabilitation interventions. Exoskeleton robot technology has emerged as an assistive solution, yet major challenges remain regarding device weight and safe user interaction. This study aims to design and build a lower-limb exoskeleton prototype using a lightweight cable-driven mechanism and to develop an affordable computer vision-based gait analysis system. The mechanical design utilizes a Brushless DC (BLDC) motor with synthetic cable transmission (Dyneema) and 3D-printed PLA structural components. The control and monitoring system was developed using Python algorithms with the MediaPipe library to detect joint angles in real-time without markers (markerless). Performance evaluation included characterizing actuator tensile force against PWM signals and validating the accuracy of the visual measurement system against standard Kinovea software. Test results indicate that the actuator is capable of producing a maximum tensile force of 8.34 N (0.85 kg) under peak load conditions. Validation of the measurement system showed a high correlation between the Python/MediaPipe method and Kinovea, demonstrating the system's reliability in monitoring knee flexion angles and vertical body orientation. This study concludes that the cable-driven mechanism is effective in reducing system weight on the leg, and the integration of computer vision offers a precise rehabilitation monitoring solution.

Keywords: *cable-driven; computer vision; gait analysis; lower-limb exoskeleton; rehabilitation*

1. Pendahuluan

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang robotika, telah membawa dampak besar pada berbagai sektor kehidupan manusia, termasuk kesehatan. Di bidang ini, robot berperan penting dalam membantu diagnosis, tindakan medis, hingga rehabilitasi pasien [1]. Salah satu pengembangan yang mendapat perhatian luas adalah robot *exoskeleton*, yaitu perangkat yang dipakai (*wearable*) di luar tubuh manusia untuk mendukung, memperkuat, atau menggantikan fungsi pergerakan [2]. Secara umum, *exoskeleton* diklasifikasikan berdasarkan fungsinya, yaitu untuk rehabilitasi medis, asistensi kehidupan sehari-hari, peningkatan kekuatan (*power augmentation*), serta *haptic* dan teleoperasi [3].

Gangguan mobilitas pada ekstremitas bawah akibat *stroke*, cedera tulang belakang, atau kelemahan otot menjadi masalah signifikan dalam bidang rehabilitasi medis. Teknologi robot *exoskeleton* berkembang sebagai solusi untuk

membantu pasien dalam latihan berjalan, memperbaiki keseimbangan, serta meningkatkan koordinasi dan kekuatan otot [4]. Mekanisme kerja dari *lower limb exoskeleton* melibatkan kombinasi aktuator, sensor, dan sistem kendali yang memungkinkan gerakan yang presisi dan adaptif sesuai dengan kebutuhan pengguna [5].

Namun, sebagian besar *exoskeleton* konvensional yang menggunakan aktuator rigid (seperti motor servo atau pneumatik) memiliki keterbatasan signifikan. Keterbatasan tersebut meliputi bobot yang berat, inersia tinggi, dan potensi ketidaksejajaran (*misalignment*) antara sendi robot dan sendi biologis pengguna. Hal ini tidak hanya mengurangi kenyamanan tetapi juga meningkatkan biaya metabolik atau energi yang dikeluarkan oleh pengguna. Sebagai alternatif, mekanisme *cable-driven* menawarkan solusi dengan memindahkan aktuator jauh dari sendi (misalnya ke pinggang), sehingga mengurangi beban inersia pada kaki [12].

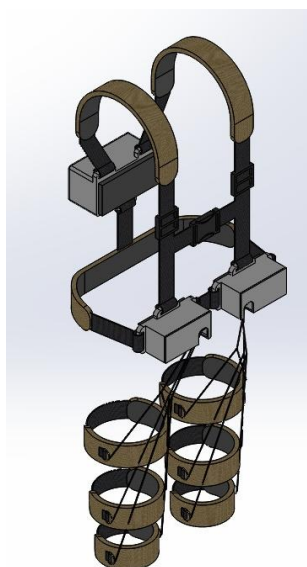
Penelitian ini mengusulkan rancang bangun robot *lower-limb exoskeleton* dengan mekanisme *cable-driven*. Pendekatan ini dipilih untuk menciptakan alat rehabilitasi yang lebih ringan, fleksibel, dan aman. Selain itu, penelitian ini juga mengintegrasikan sistem analisis gerak (*gait analysis*) berbasis visi komputer untuk memantau perkembangan rehabilitasi pasien secara *real-time* dan terjangkau, menggantikan sistem *motion capture* konvensional yang mahal. Tujuan utama dari penelitian ini adalah menghasilkan prototipe fisik yang terintegrasi, menguji karakteristik aktuator, serta memvalidasi sistem pengukuran kinematika yang dikembangkan.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan perancangan produk yang terstruktur, dimulai dari identifikasi kebutuhan, perancangan konsep, analisis teknik, hingga manufaktur dan pengujian.

2.1 Perancangan Mekanik dan Material

Desain mekanik difokuskan pada pengurangan bobot dan ergonomi. Material utama yang digunakan adalah paduan aluminium untuk komponen struktural utama dan PLA (*Polylactic Acid*) untuk komponen non-struktural seperti *cover*, *bracket*, danudukan sensor. PLA dipilih karena kemudahan manufaktur menggunakan *3D printing FDM (Fused Deposition Modeling)* serta biaya yang rendah [20].

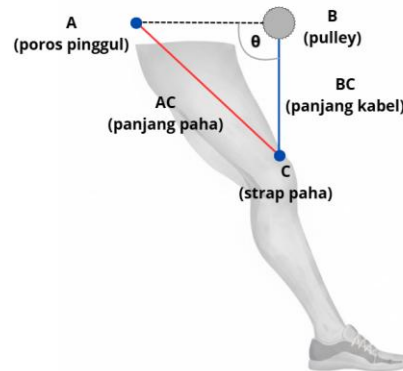


Gambar 1. Desain 3D model *lower-limb exoskeleton cable-driven*.

Untuk sistem transmisi, digunakan kabel sintetis (*Dyneema* atau *Kevlar*) yang memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang sangat tinggi. Kabel ini dipasangkan dalam *Bowden cable* untuk mentransmisikan gaya tarik dari aktuator di pinggang menuju sendi lutut. Pemilihan kabel sintetis didasarkan pada fleksibilitas dan kenyamanan yang lebih baik dibandingkan kabel baja [18].

2.2 Sistem Pengukuran *Gait Analysis*

Sistem monitoring pola jalan dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka MediaPipe Pose. Algoritma ini mendeteksi 33 titik *landmark* tubuh secara *real-time* dari input kamera RGB, tanpa memerlukan penanda fisik (*markerless*) pada tubuh pasien [19]. Data koordinat sendi pinggul (*hip*), lutut (*knee*), dan pergelangan kaki (*ankle*) diolah menggunakan prinsip vektor *dot product* untuk menghitung sudut anatomis sendi.



Gambar 2. Model kinematika representasi vektor untuk perhitungan sudut sendi.

Validasi sistem pengukuran dilakukan melalui studi komparasi antara data sudut yang dihasilkan dari hasil analisis video oleh algoritma Python dan menggunakan perangkat lunak Kinovea.

2.3 Analisis Beban dan Kekuatan Struktur

Analisis beban dilakukan untuk menghitung torsi statis dan dinamis yang diperlukan. Torsi statis minimum untuk menahan betis dihitung sebesar 4.09 Nm, sedangkan torsi dinamis puncak untuk berjalan diperkirakan mencapai 23.46 Nm berdasarkan literatur biomekanika. Analisis kekuatan struktur dilakukan menggunakan metode Elemen Hingga (*Finite Element Analysis* - FEA) pada perangkat lunak Autodesk Inventor untuk memastikan komponen cetak 3D (seperti *Pulley* dan *Housing* motor) aman digunakan [22].

3. Hasil dan Pembahasan

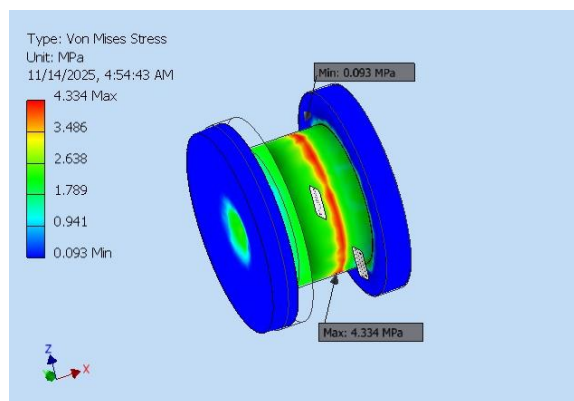
3.1 Analisis Kinematika dan Kebutuhan Gaya

Analisis kinematika maju (*forward kinematics*) dilakukan untuk menentukan hubungan antara perubahan sudut lutut dan panjang kabel yang ditarik. Berdasarkan parameter antropometri subjek (tinggi 160 cm, massa 51 kg), dihitung bahwa untuk mencapai rentang gerak (ROM) fleksi 0° hingga 120°, diperlukan mekanisme penarikan yang presisi.

Perhitungan gaya kabel kritis menunjukkan bahwa untuk menghasilkan torsi dinamis sebesar 23.46 Nm dengan jari-jari *pulley* 12.68 mm, kabel harus menahan gaya tarik sebesar 1850 N. Meskipun kabel *Dyneema* mampu menahan beban ini (>3000 N), komponen struktural menjadi titik kritis yang harus dianalisis lebih lanjut.

3.2 Analisis Kekuatan Komponen (FEA)

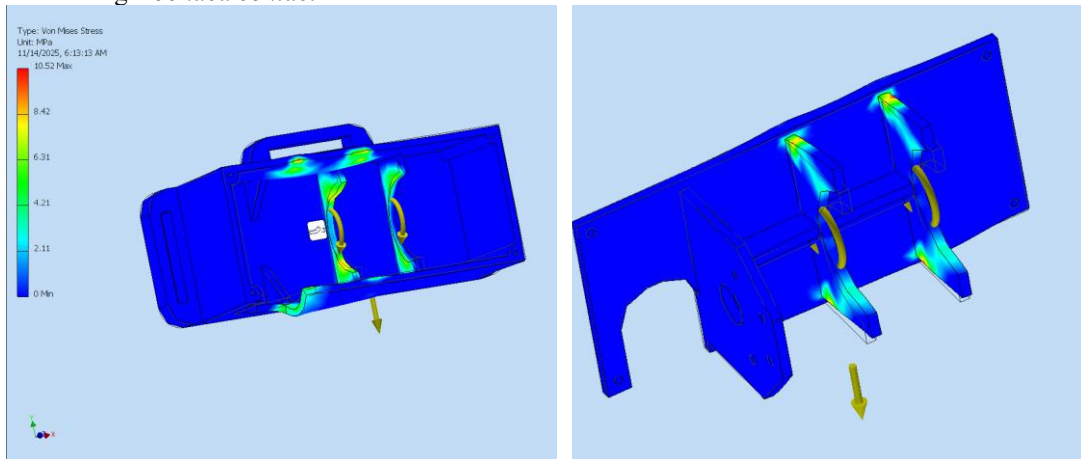
Analisis kekuatan struktural dilakukan pada dua komponen kritis, yaitu puli danudukan motor (*housing*), untuk memvalidasi keamanan desain berbahan PLA (*Polylactic Acid*) terhadap beban operasional. Puli merupakan komponen krusial yang berfungsi mentransmisikan gaya tarik dari motor melalui kabel *Dyneema* menuju sendi lutut. Mengingat komponen ini diproduksi menggunakan teknik *3D Printing* dengan material PLA, validasi kekuatan struktural menjadi sangat penting. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional dengan menetapkan material PLA yang memiliki kekuatan luluh (*Yield Strength*) σ_y sebesar 45 MPa dan Modulus Young E sebesar 3.5 GPa. Pembebanan diterapkan berupa beban tarik kabel puncak sebesar 1850 N yang didistribusikan sebagai *bearing load* pada permukaan alur (*groove*) puli. Untuk kondisi batas (*boundary conditions*), lubang poros ditahan menggunakan *Pin Constraint* guna menahan gerakan radial, sementara bidang simetri diberi *Frictionless Constraint* untuk mereplikasi pemasangan pada poros kaku dan meminimalkan *bending* aksial.



Gambar 3. Hasil simulasi pulley

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan maksimum terjadi di bagian tengah alur tempat kabel bekerja, dengan nilai tegangan Von Mises tercatat hanya sebesar 4.334 MPa. Berdasarkan nilai tersebut, diperoleh Safety Factor (SF) yang sangat tinggi yaitu 10.38. Nilai ini jauh melampaui batas aman standar rekayasa ($SF > 2.0$), membuktikan bahwa desain puli berbahan PLA ini memiliki integritas struktural yang sangat baik dan mampu menahan beban operasional dinamis tanpa risiko kegagalan plastis.

Selanjutnya, analisis dilakukan padaudukan motor (*housing*) yang menanggung beban paling signifikan, yaitu gaya torsi reaksi yang dihasilkan motor saat menarik kabel, serta menopang beban statis motor dan elektronik. Mengingat komponen ini juga diproduksi menggunakan material PLA, analisis kekuatan menjadi sangat krusial. Simulasi dilakukan pada *assembly* dudukan motor dengan menetapkan properti material PLA yang sama ($\sigma_y = 45$ MPa, $E = 3.5$ GPa). Pembebanan diterapkan berupa momen torsi reaksi sebesar 23.46 N.m pada permukaan interior penyangga motor, disertai dengan beban gravitasi percepatan 9810 mm/s^2 . Untuk kondisi batas (*boundary conditions*), permukaan area pemasangan ke rangka ditahan menggunakan *fixed constraint*, sedangkan interaksi sambungan antara wadah kanan dan tutup kiri disimulasikan sebagai *bonded contact*.

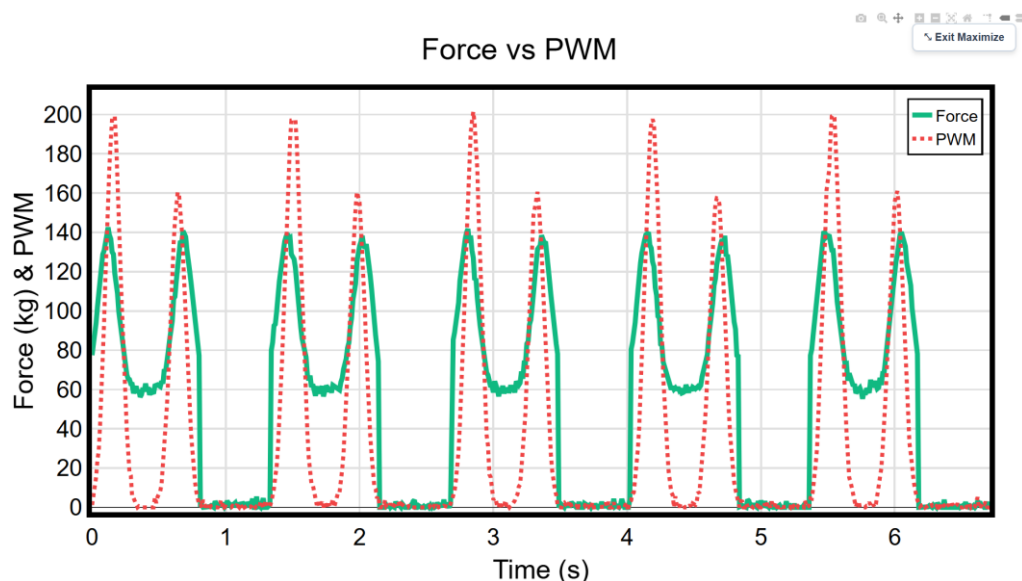


Gambar 4. Hasil simulasi *housing*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tegangan *Von Mises* maksimum terkonsentrasi di sekitar titik *constraint* dan sudut-sudut interior yang berdekatan dengan dudukan motor, dengan nilai puncak tercatat sebesar 20.32 MPa. Berdasarkan nilai tersebut, diperoleh *Safety Factor* sebesar 2.21. Angka ini memvalidasi bahwa meskipun menggunakan material polimer PLA, desain *housing* memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban dinamis dan statis tanpa mengalami deformasi plastis atau kegagalan struktur.

3.3 Pengujian Karakteristik Aktuator

Pengujian dilakukan untuk melihat hubungan antara sinyal kontrol (PWM) dan gaya tarik yang dihasilkan. Grafik karakteristik menunjukkan respons yang cukup linear antara nilai PWM (0-255) dan gaya tarik (N).



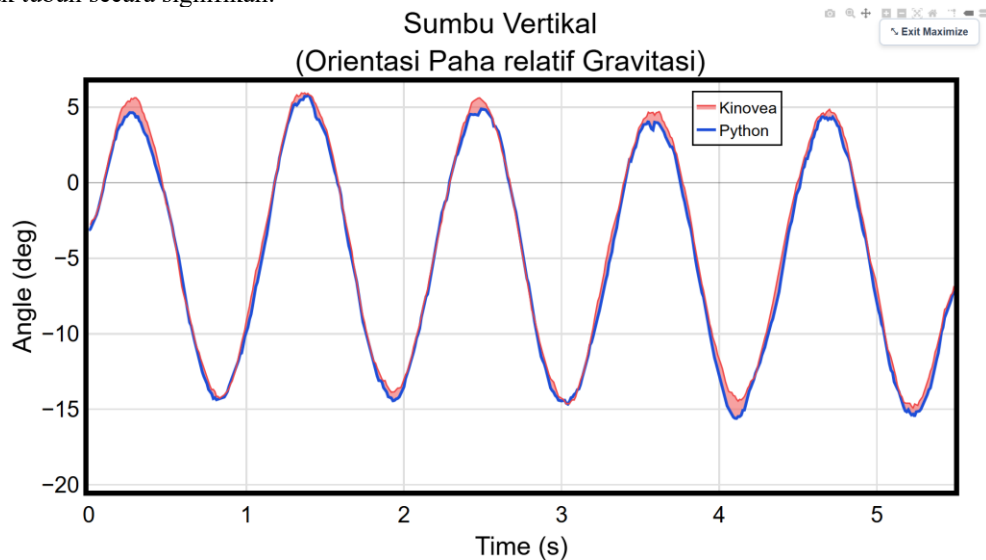
Gambar 5. Grafik hubungan antara sinyal PWM dan gaya tarik aktuator

Pada pengujian beban puncak, aktuator mampu menghasilkan gaya tarik maksimum sebesar 8.34 N (0.85 kg). Meskipun nilai ini masih di bawah kebutuhan teoritis untuk menopang berat tubuh penuh dalam rehabilitasi aktif berat, gaya ini terbukti cukup untuk memberikan fungsi isyarat gerak (*haptic cueing*) dan bantuan minimal pada fase ayun (*swing phase*) untuk pasien dengan kelemahan otot ringan. Adanya *dead-zone* pada PWM rendah (<20) mengindikasikan adanya gesekan statis (*stiction*) pada sistem transmisi yang perlu dikompensasi dalam algoritma kontrol.

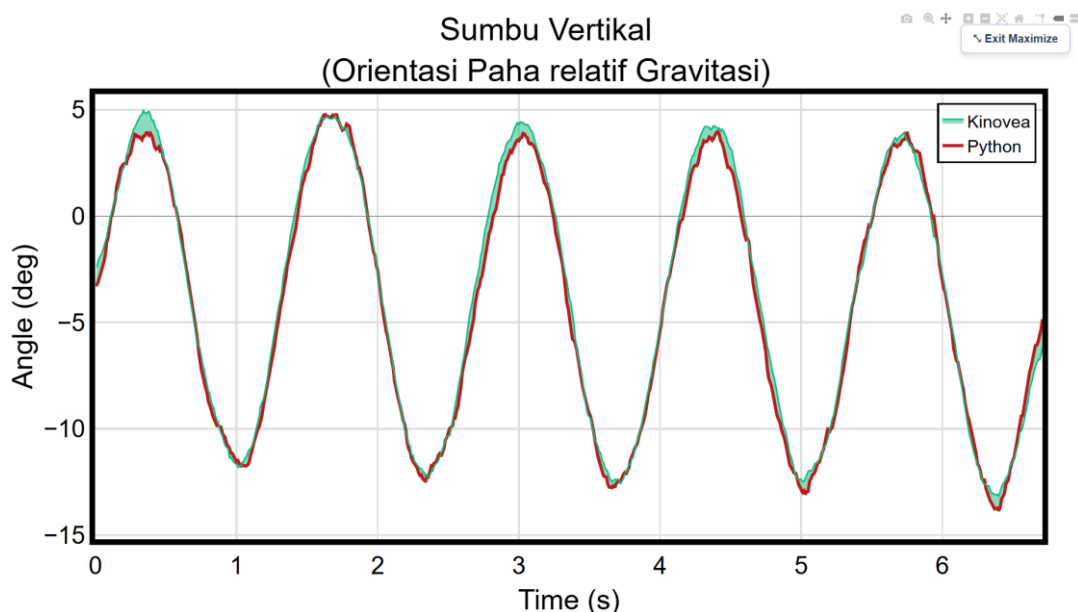
3.4 Analisis Pola Jalan (*Gait Analysis*)

Evaluasi kinerja biomekanika dilakukan dengan menganalisis dua parameter kinematika utama, yaitu sudut sumbu vertikal (*segment angle*) dan sudut anatomis sendi (*joint angle*). Analisis ini membandingkan profil gerak subjek dalam dua kondisi: berjalan normal (*baseline*) dan berjalan dengan bantuan *exoskeleton* (*assisted gait*), guna mengidentifikasi dampak intervensi *exoskeleton* terhadap pola jalan alami.

Parameter pertama yang dievaluasi adalah stabilitas orientasi tubuh melalui sudut sumbu vertikal segmen paha. Pada kondisi berjalan normal, data menunjukkan pola sinusoidal yang simetris dengan rentang gerak total sebesar $26,0^\circ$ (ekstensi $-18,0^\circ$ hingga fleksi $+8,0^\circ$). Saat subjek menggunakan *exoskeleton*, profil gerak tetap mempertahankan pola harmonis yang serupa, namun terjadi sedikit penurunan amplitudo gerak. Rentang total berkurang menjadi $23,7^\circ$, dengan rincian ekstensi $-16,5^\circ$ dan fleksi $+7,2^\circ$. Fenomena ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat beban tambahan dari perangkat, pengguna mampu beradaptasi dengan melakukan pemendekan langkah (*shorter stride length*) tanpa kehilangan keseimbangan postural. Grafik perbandingan ini memvalidasi bahwa desain *exoskeleton* tidak mengganggu orientasi tegak tubuh secara signifikan.

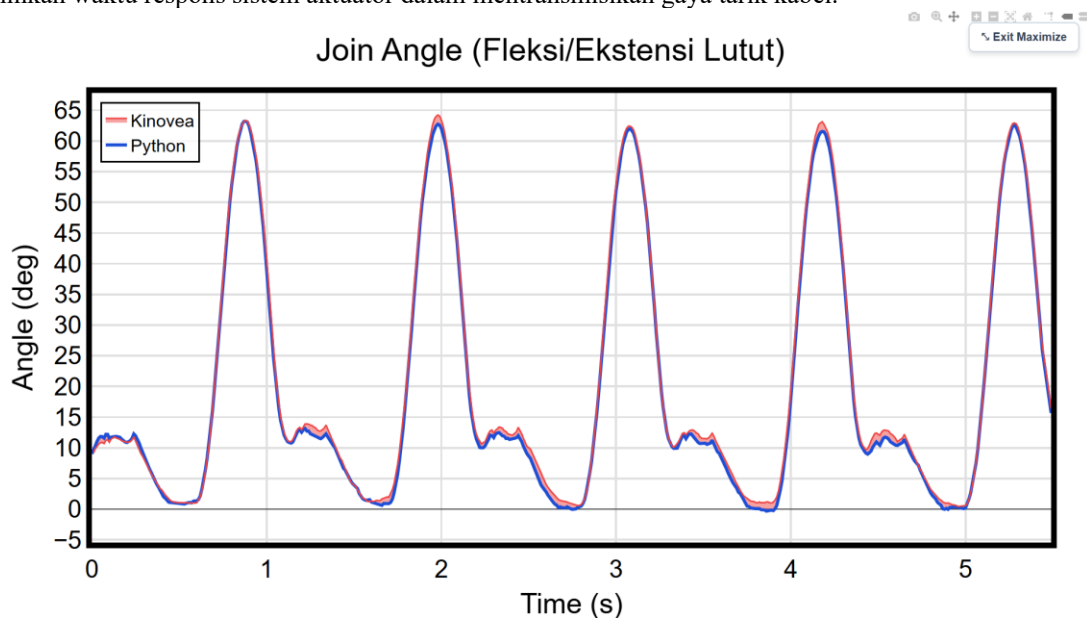


Gambar 6. Grafik sumbu vertikal berjalan normal

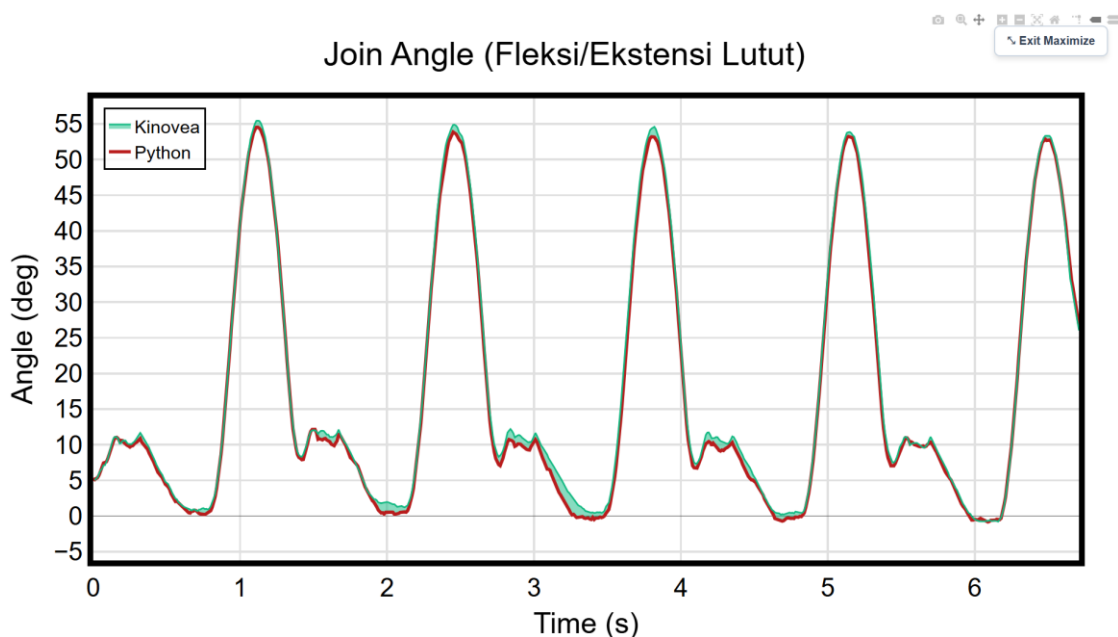


Gambar 7. Grafik sumbu vertikal menggunakan exoskeleton

Parameter kedua adalah sudut anatomis lutut, yang merepresentasikan mekanika fleksi dan ekstensi sendi. Pada kondisi normal, puncak fleksi lutut saat fase ayun (*mid-swing*) tercatat mencapai $68,1^\circ$, yang memberikan jarak aman kaki dari lantai (*ground clearance*) yang optimal. Sebaliknya, saat menggunakan *exoskeleton*, puncak fleksi mengalami penurunan menjadi $57,4^\circ$. Reduksi amplitudo sebesar $15,7\%$ ini disebabkan oleh adanya hambatan pasif (*passive stiffness*) dari gesekan sistem transmisi kabel dan inersia komponen mekanik. Meskipun terjadi penurunan, sudut $57,4^\circ$ masih berada dalam batas aman fungsional untuk berjalan tanpa risiko tersandung (*toe drag*). Selain itu, teramati adanya pergeseran fase (*phase shift*) di mana puncak ayunan terjadi sedikit lebih lambat dibandingkan kondisi normal, yang mencerminkan waktu respons sistem aktuator dalam mentransmisikan gaya tarik kabel.



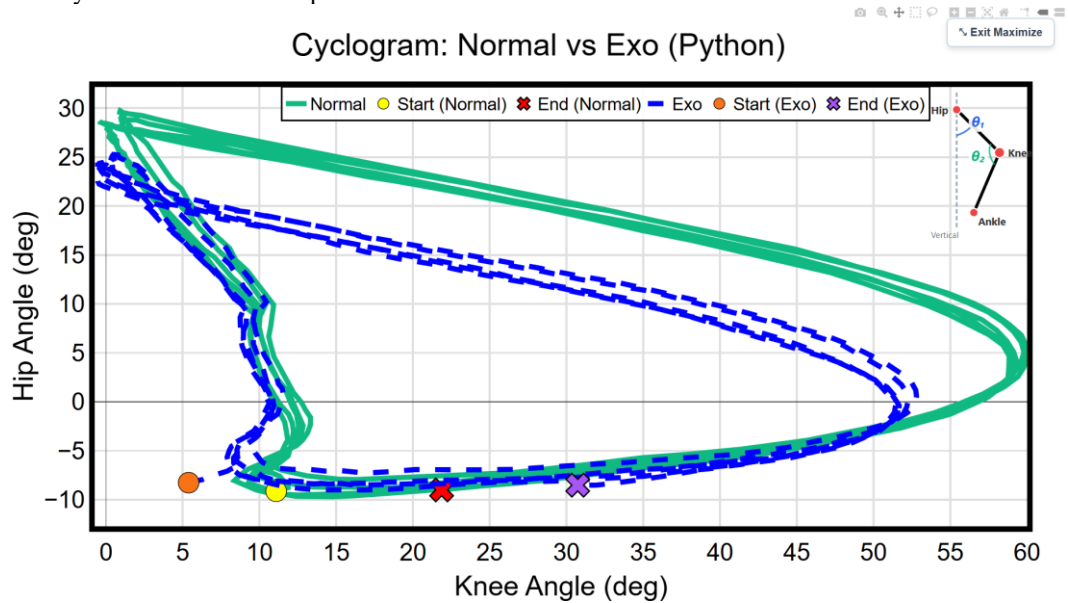
Gambar 8. Grafik sudut anatomis berjalan normal



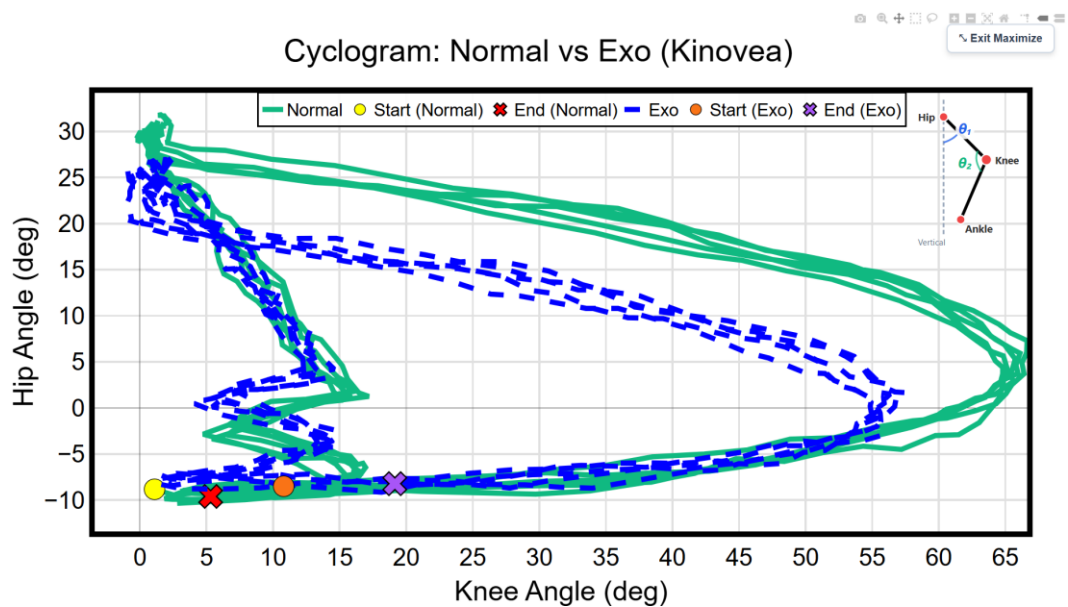
Gambar 9. Grafik sudut anatomi menggunakan *exoskeleton*

Analisis selanjutnya meninjau kualitas koordinasi antar-sendai menggunakan diagram *Cyclogram*. Pada kondisi normal, lintasan siklus (*loop*) berbentuk elips lebar yang menandakan efisiensi pemanfaatan momentum inersia kaki. Saat menggunakan *exoskeleton*, area *loop* mengalami penyempitan yang signifikan, merepresentasikan penurunan energi kinetik langkah dan ketergantungan pengguna pada bantuan torsi motor. Meskipun demikian, topologi siklus tertutup tetap terjaga tanpa adanya pola gerakan acak (*chaotic*), membuktikan bahwa sistem kendali berhasil memfasilitasi

sinkronisasi gerak dasar. Fenomena sudut tajam pada fase *Heel Strike* dalam grafik *cyclogram* menandakan transisi cepat sistem dari mode ayunan bebas ke mode penahan beban.



Gambar 10. Grafik Cyclogram Perbandingan Jalan Normal vs Exoskeleton (Data Python)



Gambar 11. Grafik Cyclogram Perbandingan Jalan Normal vs Exoskeleton (Data Kinovea)

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe *lower-limb exoskeleton* berbasis mekanisme *cable-driven* yang mengintegrasikan struktur mekanik dengan sistem monitoring berbasis visi komputer. Analisis elemen hingga (FEA) mengonfirmasi keamanan desain dengan *Safety Factor* sebesar 10,38 untuk *pulley* dan 2,21 untuk dudukan motor. Pengujian performa menunjukkan sistem aktuator BLDC mampu menghasilkan gaya tarik maksimum 8,34 N (0,85 kg), yang efektif untuk memberikan bantuan isyarat gerak pada fase ayun. Evaluasi biomekanika mencatat adanya adaptasi gerak berupa penurunan puncak fleksi lutut dari $68,1^\circ$ (normal) menjadi $57,4^\circ$ (dengan alat), serta reduksi rentang gerak vertikal dari $26,0^\circ$ menjadi $23,7^\circ$ akibat kekakuan pasif sistem. Meskipun terjadi penurunan rentang gerak sekitar 15,7%, analisis koordinasi sendi (*cyclogram*) mengonfirmasi bahwa pengguna tetap dapat mempertahankan stabilitas dan pola jalan yang harmonis, menjadikan prototipe ini layak sebagai solusi rehabilitasi ringan yang aman dan terjangkau.

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), 74.
- [2] Khomami, M. A., et al. (2021). Artificial Muscle Actuators for Soft Exoskeletons: A Review. *Soft Robotics*, 8(3), 245-260.
- [3] Grosu, S., Rodriguez-Guerrero, C., Vanderborght, B., Lefeber, D., & Keyser, R. (2019). A Multi-Joint Cable-Driven Exoskeleton for Lower Limb Rehabilitation. *Mechanism and Machine Theory*, 133, 498-513.
- [4] Jinman, Z., et al. (2021). Clinical Effectiveness and Adaptability of Lower Limb Exoskeletons in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1), 1-18.
- [5] Chen, B., & Li, Z. (2020). Control Strategies for Cable-Driven Lower Limb Exoskeletons: A Review. *Robotics and Autonomous Systems*, 126, 103447.
- [6] Tran Thanh Tung, et al. (2023). Optimization of Exoskeleton Frame Design for Enhanced Structural Integrity and Weight Reduction. *Results in Engineering*, 18, 101049.
- [7] Zoss, A. B., Kazerooni, H., & Chu, A. (2006). Biomechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(2), 128-138.
- [8] Chang, E., et al. (2021). Safety and Compliance in Cable-Driven Exoskeletons for Lower Limb Rehabilitation. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 3(2), 345-356.
- [9] Yan, J., et al. (2022). Design and Control of a Cable-Driven Lower Limb Exoskeleton with Series Elastic Actuators. *Mechatronics*, 84, 102792.
- [10] Niku, S. B. (2020). *Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications*. 3rd Edition. Wiley.
- [11] Bogue, R. (2015). Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. *Industrial Robot: An International Journal*, 42(5), 421-427.
- [12] Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 144-158.
- [13] Bergveld, H. J., Kruijt, W. S., & Notten, P. H. L. (2002). *Battery Management Systems: Design by Modelling*. Philips Research Book Series. Springer.
- [14] Afif, M. T., & Pratiwi, I. A. P. (2015). Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid dan Nickel-Metal Hydride pada Penggunaan Mobil Listrik – Review. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(2), 95-99.
- [15] Setyawan, A. (2016). Perancangan Sistem Kendali Motor DC Menggunakan Mikrokontroler untuk Aplikasi Robotika. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(1), 45-52.
- [16] Prasad, A., et al. (2024). Mechanical Characterization of Nylon Webbing and Synthetic Cables for Flexible Transmission Systems. *Tribology International*, 191, 109120.
- [17] Hosseini, S. M., et al. (2021). Mechanical Properties of High-Performance Synthetic Cables for Robotic Actuation. *Materials & Design*, 198, 109340.
- [18] Hou, Y., & Zhang, L. (2025). Finite Element Analysis of Lower Limb Exoskeleton Structure under Dynamic Loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 189, 106001.
- [19] Stancu, A., & Fratila, R. (2021). Validation of MediaPipe Pose for Gait Analysis in Rehabilitation. *2021 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)*, 1-4.
- [20] Hussain, I., et al. (2021). Design and Fabrication of a 3D Printed Soft Exoskeleton for Hand Rehabilitation. *Rapid Prototyping Journal*, 27(9), 1667-1678.
- [21] Wei, W., Qu, H., & Wang, W. (2018). Kinematics Analysis and Simulation of a Lower Limb Exoskeleton Robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 1074, 012028.
- [22] Vashista, V., & Agrawal, S. K. (2020). Experimental Characterization of Human Walking with a Cable-Driven Exoskeleton. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(2), 489-498.