Perancangan Sistem IoT untuk Monitoring dan Setting Robot Fisioterapi Lower Limb 3 DOF Berbasis Android

1st Nadya Nandayu Janna
Fakultas Teknik Elektro
Teknik Elektro, Telkom University
Surabaya, Indonesia
nadyanandayu@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Dimas Adiputra
Fakultas Teknik Elektro
Teknik Elektro, Telkom University
Surabaya, Indonesia
dimasze@telkomuniversity.ac.id

3rd Chaironi Latif
Fakultas Teknik Elektro
Teknik Elektro, Telkom University
Surabaya, Indonesia
chaironi@telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — Penelitian ini membahas perancangan sistem Internet of Things (IoT) untuk monitoring dan setting robot fisioterapi lower limb dengan tiga derajat kebebasan (3 DOF) yang meliputi sendi ankle, knee, dan hip. Sistem dirancang secara modular dan terdistribusi, di mana setiap sendi dikendalikan secara independen menggunakan mikrokontroler ESP32 dan motor BLDC AK70-10. Komunikasi antara node robot dan aplikasi Android dilakukan melalui jaringan WiFi menggunakan protokol TCP/IP dengan format data JSON. Aplikasi Android berfungsi sebagai antarmuka pengguna untuk pengaturan parameter terapi, monitoring sudut gerak, serta pembacaan sensor Force Sensitive Resistor (FSR) secara real-time. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa komunikasi jaringan, akurasi sudut, respons sensor, serta usability antarmuka. Hasil pengujian menunjukkan latensi komunikasi berada pada rentang 20–140 ms untuk satu node dan meningkat hingga 90–220 ms saat seluruh node aktif, yang masih berada dalam batas aman untuk aplikasi fisioterapi pasif. Kalibrasi sudut menggunakan inclinometer digital menunjukkan deviasi maksimum ±2°. Berdasarkan hasil tersebut, sistem yang dirancang dinilai stabil, modular, dan layak digunakan sebagai prototipe awal robot fisioterapi berbasis IoT.**

***Kata kunci*—android, bldc, esp32, iot, robot fisioterapi, tcp/ip.**

I. PENDAHULUAN

Stroke dan gangguan neurologis lainnya sering menyebabkan penurunan fungsi motorik pada ekstremitas bawah yang berdampak langsung terhadap kemampuan berjalan dan aktivitas fungsional pasien [15], [19], [22]. Rehabilitasi fisioterapi berperan penting dalam memulihkan fungsi tersebut melalui latihan gerak yang berulang, terkontrol, dan konsisten [20], [29]. Dalam perkembangannya, robot fisioterapi digunakan untuk meningkatkan intensitas dan presisi latihan, serta mengurangi ketergantungan terhadap terapi manual [15], [16], [30]. Namun, sebagian besar sistem robot rehabilitasi yang ada masih bersifat terintegrasi penuh, mahal, dan kurang fleksibel [16], [29].

Penelitian ini mengusulkan sistem robot fisioterapi *lower limb* dengan tiga derajat kebebasan (3 DOF) yang dirancang secara modular. Pendekatan modular memungkinkan setiap sendi—ankle, knee, dan hip—dioperasikan secara independen sesuai kebutuhan terapi pasien **[2], [3]**. Selain itu, penerapan konsep Internet of Things (IoT) memungkinkan sistem dikendalikan dan dimonitor secara nirkabel melalui aplikasi Android **[5], [11], [24]**. Dengan demikian, sistem diharapkan lebih fleksibel, terjangkau, dan mudah dikembangkan **[5], [23]**.

II. KAJIAN TEORI

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang memungkinkan berbagai perangkat fisik untuk saling terhubung melalui jaringan komunikasi dan bertukar data secara real-time. Dalam konteks sistem rehabilitasi robotik, IoT berperan penting dalam mendukung monitoring, pengendalian jarak jauh, serta pencatatan data terapi secara terpusat. Penerapan IoT memungkinkan sistem fisioterapi tidak hanya berfungsi sebagai alat mekanis, tetapi juga sebagai sistem cerdas yang adaptif terhadap kondisi pengguna dan lingkungan terapi [5], [9], [24].

Penggunaan IoT pada robot fisioterapi memberikan keuntungan berupa fleksibilitas operasional dan efisiensi biaya. Sistem dapat dikendalikan melalui antarmuka berbasis aplikasi tanpa koneksi kabel langsung, sehingga memudahkan pengaturan terapi dan meningkatkan kenyamanan pengguna. Selain itu, data hasil terapi seperti sudut gerak sendi, status motor, dan respons sensor dapat disimpan dan dianalisis untuk evaluasi jangka panjang [11], [21].

Mikrokontroler ESP32 merupakan salah satu platform yang banyak digunakan pada aplikasi IoT karena memiliki modul WiFi terintegrasi, kemampuan pemrosesan yang baik, serta konsumsi daya yang relatif rendah. ESP32 mendukung komunikasi TCP/IP sehingga mampu berfungsi sebagai server maupun client dalam jaringan lokal. Pada sistem robot fisioterapi, ESP32 digunakan sebagai pusat kendali lokal untuk setiap modul sendi, menerima perintah dari aplikasi Android, serta mengirimkan data sensor dan status aktuator secara real-time [5], [21], [33].

Motor Brushless DC (BLDC) AK70-10 digunakan sebagai aktuator utama dalam sistem ini karena memiliki karakteristik torsi tinggi, presisi sudut yang baik, dan keandalan tinggi untuk aplikasi robotik. Motor BLDC bekerja tanpa sikat sehingga menghasilkan gesekan yang lebih kecil dan umur pakai yang lebih panjang dibandingkan motor DC konvensional. Pengendalian motor dilakukan melalui protokol komunikasi Controller Area Network (CAN) yang dikenal stabil dan banyak digunakan pada sistem industri dan robotika [20], [29], [32].

Sensor Force Sensitive Resistor (FSR) digunakan untuk mendeteksi tekanan pada telapak kaki pasien selama latihan berjalan. Perubahan nilai resistansi pada sensor FSR merepresentasikan besarnya gaya yang diberikan, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi fase gait seperti *heel strike* dan *toe off*. Data dari sensor ini berperan penting dalam sistem rehabilitasi karena memungkinkan robot merespons kondisi aktual pengguna secara adaptif [7], [28].

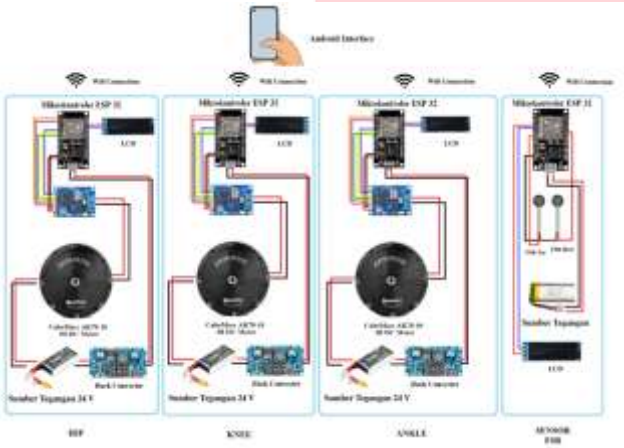
Komunikasi data antara perangkat keras dan aplikasi Android dilakukan menggunakan protokol TCP/IP melalui jaringan WiFi lokal. Protokol ini dipilih karena memiliki mekanisme pengiriman

data yang andal dan berurutan, sehingga sesuai untuk sistem kendali yang membutuhkan keakuratan dan kestabilan komunikasi. Data dikemas dalam format JavaScript Object Notation (JSON) karena bersifat ringan, terstruktur, dan mudah diproses baik oleh ESP32 maupun aplikasi Android [5], [21], [25].

Antarmuka aplikasi Android berfungsi sebagai media interaksi antara pengguna dan sistem robot fisioterapi. Desain antarmuka yang sederhana dan responsif sangat penting untuk mengurangi kesalahan pengoperasian dan meningkatkan kenyamanan pengguna. Aplikasi Android memungkinkan pengguna melakukan pengaturan parameter terapi, monitoring kondisi sistem secara real-time, serta evaluasi hasil terapi melalui visualisasi data [6], [26], [27].

III. METODE

Metode Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang meliputi perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian dan evaluasi kinerja sistem. Sistem terdiri dari beberapa node ESP32 yang masing-masing mengendalikan satu motor BLDC AK70-10 dan sensor terkait. Setiap node berkomunikasi langsung dengan aplikasi Android melalui jaringan WiFi lokal menggunakan protokol TCP/IP.



GAMBAR 1
(SKEMATIK RANGKAIAN)

Gambar 1 Memperlihatkan rangkaian perangkat keras salah satu modul sendi yang terdiri dari ESP32, modul CAN SN65HVD230, motor BLDC AK70-10, dan sensor FSR.

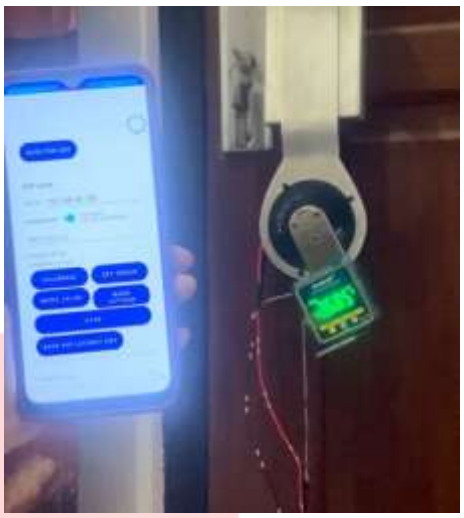
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi sistem robot fisioterapi lower limb 3 DOF dilakukan dengan mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak secara modular. Evaluasi sistem diawali dengan pengujian implementasi hardware dan software untuk memastikan seluruh komponen berfungsi sesuai dengan perancangan.



GAMBAR 2
(RANGKAIAN HARDWARE NODE ANKLE)

Gambar 2 menunjukkan hasil implementasi perangkat keras pada salah satu modul sendi yang terdiri dari mikrokontroler ESP32, motor BLDC AK70-10, dan modul CAN SN65HVD230,



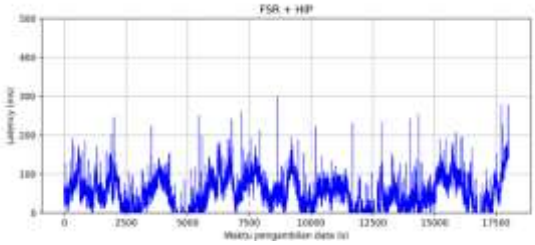
GAMBAR 3
(SIMULASI SOFTWARE DAN HARDWARE)

Simulasi Implementasi perangkat lunak ditunjukkan pada **Gambar 3**, yang memperlihatkan aplikasi Android sebagai antarmuka monitoring dan setting sistem. Aplikasi mampu melakukan koneksi ke node ESP32, mengirimkan perintah kendali, serta menampilkan data sudut motor dan sensor secara real-time. Integrasi antara hardware dan software menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi secara sinkron dan modular. Hardware juga dikalibrasi dengan menggunakan inclinometer dan hasil pengujian diasjikan pada tabel berikut :

TABEL 1
(TABEL HASIL PENGUKURAN SUDUT DENGAN INCLINOMETER)

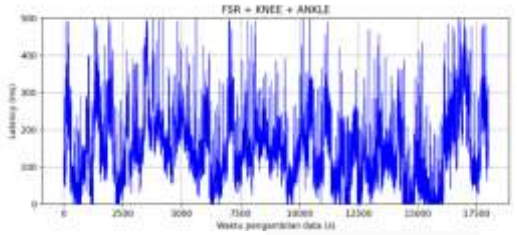
No	Target Sudut	Origin (°)	Hasil yang diharapkan (°)	Hasil Pengukuran (°)	Selisih/Error (°)
1	28.65 °	0.15	28.80	29.05	0.25
2	28.65 °	0.10	28.75	25.21	3.54
3	28.65 °	0.00	28.65	28.90	0.25
4	28.65 °	0.06	28.59	28.59	0
5	28.65 °	0.20	28.85	29.85	1.00
6	28.65 °	0.15	28.80	25.85	3.05
7	28.65 °	0.50	29.15	27.95	1.20
8	28.65 °	0.25	28.80	27.10	1.70
9	28.65 °	0.9	29.95	26.90	2,65
10	28.65 °	1.04	29.69	29.20	0.49

Akurasi sudut gerak dievaluasi menggunakan inclinometer digital sebagai pembanding. **Tabel 1** menyajikan hasil kalibrasi sudut yang menunjukkan deviasi maksimum sebesar ±2°. Nilai error ini masih dapat diterima untuk aplikasi rehabilitasi dan tidak menimbulkan risiko terhadap pengguna.



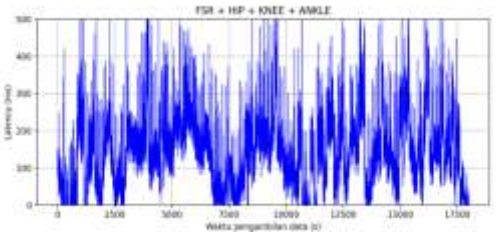
GAMBAR 4
(GRAFIK LATENSI SAAT 2 NODE AKTIF)

Pengujian performa komunikasi jaringan dilakukan setelah sistem hardware dan software terintegrasi dengan baik. **Gambar 4** menunjukkan hasil pengujian latensi komunikasi saat dua node ESP32 aktif. Latensi yang terukur berada pada rentang 20–140 ms, yang menunjukkan komunikasi WiFi berjalan stabil pada kondisi beban jaringan rendah.



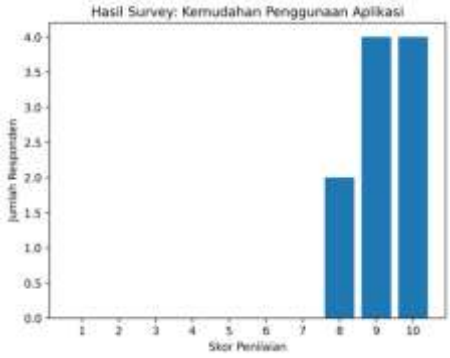
GAMBAR 5
(GRAFIK LATENSI SAAT 3 NODE AKTIF)

Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian latensi komunikasi saat tiga node aktif secara bersamaan (FSR, knee, dan ankle). Terlihat bahwa latensi komunikasi mengalami fluktuasi akibat meningkatnya beban jaringan WiFi karena pertukaran data secara simultan dari beberapa node. Nilai latensi umumnya berada di bawah 250 ms, meskipun terdapat lonjakan sesaat pada beberapa waktu pengambilan data. Meskipun demikian, komunikasi tetap berlangsung stabil tanpa kegagalan koneksi, sehingga sistem masih memenuhi kebutuhan aplikasi fisioterapi pasif yang tidak memerlukan respons waktu nyata yang sangat ketat.

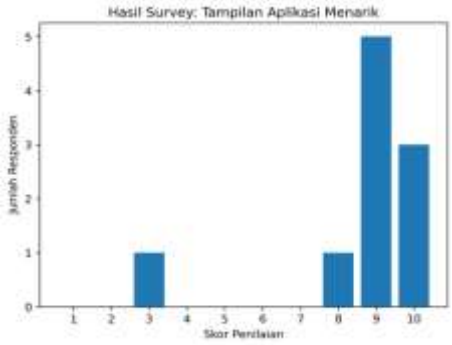


GAMBAR 6
(GRAFIK LATENSI SAAT 4 NODE AKTIF)

Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian latensi komunikasi saat empat node aktif secara bersamaan, yaitu sensor FSR serta modul hip, knee, dan ankle. Pada kondisi ini, latensi komunikasi mengalami fluktuasi yang lebih besar dibandingkan pengujian dengan jumlah node yang lebih sedikit akibat meningkatnya beban pertukaran data pada jaringan WiFi. Nilai latensi yang terukur berada pada rentang sekitar 80–450 ms, dengan mayoritas data berada pada kisaran 100–300 ms dan beberapa lonjakan sesaat mendekati nilai maksimum. Meskipun terjadi peningkatan latensi, sistem tetap mampu mempertahankan koneksi tanpa terjadinya kegagalan komunikasi, sehingga masih dapat digunakan untuk aplikasi fisioterapi pasif yang tidak memerlukan respons waktu nyata yang sangat ketat.



GAMBAR 7
(HASIL SURVEY KEMUDAHAN UI)



GAMBAR 8
(HASIL SURVEY TAMPILAN DAN RESPONSIVITAS)



GAMBAR 9
(HASIL SURVEY TINGKAT ERROR)

Evaluasi usability aplikasi Android disajikan pada **Gambar 7-9** dan **Tabel 2**. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa aplikasi memiliki tingkat kemudahan penggunaan yang baik, tampilan antarmuka yang jelas, serta responsivitas yang memadai tanpa ditemukan kesalahan operasional selama pengujian.

TABEL 2
(RINGKASAN HASIL PENGUJIAN)

Aspek Pengujian	Rentang Nilai	Dominan	Catatan
Kemudahan digunakan	8–10	9–10	Pengguna merasa mudah dioperasikan
Kemudahan dipahami	8–10	9–10	Fungsi dan menu jelas

Aspek Pengujian	Rentang Nilai	Dominan	Catatan
Tampilan menarik	3–10	9	Mayoritas menilai tampilan menarik
Responsivitas fitur	8–10	8 & 10	Fitur berjalan cepat saat ditekan
Error aplikasi	Ya/Tidak	Tidak (100%)	Tidak ditemukan error pada aplikasi

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, sistem yang dikembangkan mampu beroperasi secara stabil, baik dari sisi integrasi hardware dan software maupun performa komunikasi jaringan. Pendekatan modular dan penerapan IoT melalui aplikasi Android memberikan fleksibilitas penggunaan serta kemudahan monitoring dan setting sistem robot fisioterapi.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem IoT untuk monitoring dan setting robot fisioterapi lower limb 3 DOF berbasis ESP32 dan aplikasi Android. Sistem mampu mengintegrasikan modul hip, knee, ankle, serta sensor FSR secara modular dan beroperasi stabil melalui jaringan WiFi. Hasil pengujian menunjukkan latensi komunikasi pada kondisi jarak dekat berada pada rentang 20–220 ms dengan latensi maksimum mencapai ±488 ms saat seluruh node aktif, sedangkan pada kondisi terhalang dinding latensi meningkat hingga sekitar ±1200 ms. Meskipun terjadi peningkatan latensi seiring bertambahnya jumlah node dan adanya penghalang, sistem tetap mempertahankan konektivitas tanpa kegagalan komunikasi. Akurasi sudut gerak menunjukkan deviasi maksimum ±2°, dan sensor FSR mampu merespons tekanan secara real-time. Evaluasi usability menunjukkan aplikasi Android mudah digunakan dan responsif. Berdasarkan hasil tersebut, sistem yang dikembangkan layak digunakan sebagai prototipe awal robot fisioterapi pasif berbasis IoT dan berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada tahap penelitian selanjutnya.

REFERENSI

[1] H. A. Abdul-Ghani, D. Konstantas, dan M. Mahyoub, "A comprehensive IoT attacks survey based on a building-block reference model," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 10, no. 3, pp. 1–13, 2019.

[2] D. Adiputra *et al*., "Control reference parameter for stance assistance using a passive controlled ankle foot orthosis—A preliminary study," *Applied Sciences*, 2019.

[3] D. Adiputra *et al*., "Pengembangan robot exoskeleton ekstremitas bawah nasional dengan novel sistem kendali kecepatan sudut sendi berdasarkan body mass index pasien untuk asistensi fisioterapi," Proposal Penelitian RIIM, BRIN, 2024.

[4] D. Adiputra, N. Nazmi, I. Bahiuddin, dan U. Ubaidillah, "A review on the control of the mechanical properties of ankle foot orthosis for gait assistance," *Actuators*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.3390/act8010010.

[5] A. Al-Fuqaha *et al*., "Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.

[6] F. Almeida dan M. Silva, "Mobile application development: A comparison of native and hybrid approaches," *J. Inf. Syst. Eng. Manag.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–11, 2021.

[7] T. Arakawa dan T. Lee, "Development of FSR-based gait analysis system for rehabilitative monitoring," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 40, no. 5, pp. 489–498, 2003.

[8] K. Ashton, "That 'Internet of Things' thing," *RFID Journal*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.

[9] L. Atzori, A. Iera, dan G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Netw.*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

[10] J. Chae *et al*., "Proprioceptive training combined with rehabilitation regimen for lower limb dysfunction in stroke patients," *Frontiers in Neurology*, vol. 15, 2024.

[11] C. Chen *et al*., "Internet-of-Things-based rehabilitation systems: A review," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1201, 2021.

[12] D. Chen *et al*., "Human–robot interaction in rehabilitation: A review," *Current Robotics Reports*, vol. 1, no. 1, pp. 1–12, 2020.

[13] S. C. Cramer *et al*., "Efficacy of home-based telerehabilitation vs in-clinic therapy," *JAMA Neurology*, vol. 76, no. 9, pp. 1079–1087, 2019.

[14] T. Q. Dinh *et al*., "A survey of mobile core network evolution for LTE networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 1, pp. 114–133, 2013.

[15] A. Esquenazi, S. Lee, dan A. Packel, "Robotics for gait training after spinal cord injury and stroke," *Top. Spinal Cord Inj. Rehabil.*, vol. 23, no. 2, pp. 128–140, 2017.

[16] E. R. Garcia *et al*., "A review of rehabilitation robotic systems for stroke patients," *J. Robotics Mechatronics*, vol. 33, no. 4, pp. 635–646, 2021.

[17] M. S. Grewal, L. R. Weill, dan A. P. Andrews, *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.

[18] Google, "Android Developers: Build your first app," 2023. [Online]. Available: https://developer.android.com

[19] J. Hidler dan A. Wall, "Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted gait training," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–13, 2005.

[20] S. Hussain *et al*., "Robot-assisted physiotherapy of ankle injuries," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 95, no. 1, pp. 205–223, 2019.

[21] J. I. Ibarra *et al*., "Real-time performance evaluation of IoT communication protocols," *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5573, 2020.

[22] Y. W. Kim, "Balance training in addition to conventional rehabilitation program in stroke patients," *Brain & Neurorehabilitation*, vol. 17, p. e15, 2024.

[23] S. Kumar *et al*., "Role of IoT in healthcare: A survey," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 165, pp. 599–606, 2019.

[24] I. Lee dan K. Lee, "The Internet of Things: Applications, investments, and challenges," *Bus. Horizons*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, 2015.

[25] V. Lippi *et al*., "Human–robot synchrony: Latency requirements for rehabilitation robotics," *Nature Mach. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 25–36, 2022.

[26] J. Nielsen, *Usability Engineering*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 1994.

[27] D. A. Norman, *The Design of Everyday Things*, Rev. ed. New York, NY, USA: Basic Books, 2013.

[28] J. L. Pons, *Rehabilitation Exoskeletal Robotics*. Berlin, Germany: Springer, 2010.

[29] Texas Instruments, "SN65HVD230 CAN transceiver datasheet," 2015.

[30] T-Motor, "AK70-10 actuator specifications," 2020.

[31] B. Siciliano dan O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed. Springer, 2016.

[32] Z. Xiao *et al*., "Development and control of a lower limb rehabilitation robot using ESP32-based IoT communication," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 5, pp. 3690–3698, 2021.