



Perancangan *Prosthetic Hand* Berbasis ESP32 dengan Sistem Kendali Nirkabel *Real-Time* untuk Penyandang Tunadaksa

Sri Lestari¹, Indah Permatasari^{2*}, Fena Nur Mustika³, Maulidya Fitria Zahrah⁴,
Irmayatul Hikmah⁵

¹⁻⁵Telkom University, Indonesia

*Penulis Korespondensi: indahpermata@telkomuniversity.ac.id

Abstract. *Individuals with physical disabilities, particularly those with impaired hand function, require assistive devices that can support daily activities independently. However, the development of prosthetic hands is often constrained by high costs, complex control systems, and limited accessibility of affordable technology. This study aims to design and implement an ESP32-based prosthetic hand with a real-time wireless control system that is simple, stable, and cost-effective. The proposed system employs an ESP32 and Arduino Uno as controllers, a hall effect linear sensor integrated in an electric bicycle throttle as the control input, and servo motors as finger actuators. System performance was evaluated through servo angle accuracy tests, object grasping and lifting experiments, and Quality of Service (QoS) analysis of wireless communication using Wireshark. Experimental results indicate that the system accurately follows commanded servo angles, successfully grasps objects with diameters ranging from 5.5 cm to 12 cm, and lifts loads up to 500 ml at heights between 10 cm and 50 cm. QoS evaluation conducted over 19,150 seconds shows a throughput of 1,737.59 kbps, an average delay of 4.572 ms, jitter of 4.571 ms, and zero packet loss, demonstrating fast and stable real-time communication. These results confirm that the developed prosthetic hand is responsive and functional, and has strong potential for further development as an affordable IoT-based assistive technology for individuals with physical disabilities.*

Keywords: *ESP32; Hall Effect Linear Sensor; Physical Disabilities; Prosthetic Hand; Quality of Service.*

Abstrak. Penyandang tunadaksa khususnya yang mengalami keterbatasan fungsi tangan, membutuhkan alat bantu gerak yang mampu mendukung aktivitas sehari-hari secara mandiri. Namun, pengembangan tangan buatan yang tersedia saat ini masih menghadapi kendala berupa biaya yang relatif tinggi, kompleksitas sistem kendali, serta keterbatasan akses teknologi yang terjangkau. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan *prosthetic hand* berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sistem kendali nirkabel real-time yang sederhana, stabil, dan ekonomis. Metode yang digunakan meliputi perancangan perangkat keras menggunakan ESP32 dan Arduino Uno, pemanfaatan sensor linier *hall effect* dari *throttle* gas sepeda listrik sebagai input kendali, serta motor servo sebagai aktuator penggerak jari. Sistem diuji melalui pengujian sudut servo, kemampuan menggenggam dan mengangkat objek, serta evaluasi *Quality of Service* (QoS) komunikasi nirkabel menggunakan *Wireshark*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menerjemahkan perintah sudut dengan akurasi yang baik, menggenggam objek berdiameter 5,5–12 cm secara stabil, serta mengangkat beban hingga 500 ml pada ketinggian 10–50 cm. Pengujian QoS selama 19.150 detik menunjukkan throughput sebesar 1.737,59 kbps, *delay* rata-rata 4,572 ms, jitter 4,571 ms, dan packet loss 0%, yang menandakan komunikasi data berjalan cepat dan stabil. Berdasarkan hasil tersebut, prototipe *prosthetic hand* yang dikembangkan terbukti responsif, fungsional, dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai solusi teknologi asistif berbasis IoT bagi penyandang tunadaksa.

Kata kunci: *Aula Efek Sensor Linier; ESP32; Kualitas Layanan; Tangan Buatan; Tuna Daksa.*

1. LATAR BELAKANG

Jumlah penyandang disabilitas fisik atau tunadaksa di Indonesia masih tergolong tinggi dan didominasi oleh kelompok usia produktif (Febriani, 2018). Tunadaksa adalah kondisi disabilitas fisik pada anggota tubuh, sendi, atau saraf akibat kecelakaan, penyakit, maupun kelainan bawaan (Azzahra et al., 2025; Syarief et al., 2022; Wijaya et al., 2022). Keterbatasan fungsi anggota gerak, khususnya tangan, berdampak signifikan terhadap kemampuan individu dalam menjalankan aktivitas sehari-hari secara mandiri. Salah satu solusi teknologi asistif yang dapat membantu meningkatkan kemandirian penyandang tunadaksa adalah penggunaan

prosthetic hand atau tangan buatan (Saleh et al., 2022). Tangan prostetik mekanik membantu penyandang disabilitas khususnya tuna daksa untuk mengembalikan fungsi gerak dasar seperti menggenggam, memegang dan mengangkat benda.

Pengembangan prosthetic hand telah banyak dilakukan sistem pengendali jari dengan pemetaan nilai sensor flex ke sudut motor servo mampu menghasilkan gerakan jari yang menyerupai tangan manusia secara sederhana dan efektif (Prambudi et al., 2019). Namun, penggunaan sensor flex memiliki keterbatasan dari sisi kestabilan sinyal, ketahanan material, serta rentan terhadap noise akibat perubahan mekanik berulang. Penelitian lain merancang sistem kendali lengan robot dengan memanfaatkan sensor giroskop untuk mendeteksi orientasi dan pergerakan tangan pengguna dalam mendeteksi perubahan sudut dan orientasi secara dinamis (Siregar et al., 2025). Akan tetapi, penggunaan sensor giroskop memiliki beberapa keterbatasan, antara lain akumulasi *drift* pada pengukuran sudut, kebutuhan proses kalibrasi yang relatif sering, serta sensitivitas terhadap gangguan gerakan yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif yang lebih sederhana, ekonomis, namun tetap responsif dan andal.

Penelitian ini merancang dan mengembangkan *prosthetic hand* berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sistem kendali nirkabel *real-time*, menggunakan *hall effect linear* sensor dari *throttle* gas sepeda listrik sebagai input dan motor servo sebagai aktuator. Pada tangan buatan penggunaan sensor *Hall effect linear* unggul karena kontakless, kecil, murah, cukup linier, dan dapat dipakai sebagai sensor posisi (Borisov et al., 2017; Jones et al., 2020a, 2020b; Kim et al., 2016). Dengan demikian sensor ini sangat cocok untuk jari prostetik yang padat komponen dan banyak titik pengukuran. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan sistem *prosthetic hand* yang fungsional, stabil, dan terjangkau bagi penyandang tunadaksa.

2. KAJIAN TEORITIS

Kajian teoritis pada penelitian ini mencakup konsep dasar *prosthetic hand* sebagai alat bantu gerak bagi penyandang tunadaksa, serta prinsip kerja *Hall Effect Linear Sensor* yang digunakan sebagai input kendali dalam sistem prosthetic hand yang dikembangkan.

Prosthetic Hand

Prosthetic merupakan perangkat medis yang dirancang untuk menggantikan bagian anggota tubuh yang hilang akibat cedera traumatis maupun kelainan bawaan sejak lahir. Salah satu bentuk prosthetic adalah prosthetic hand atau jari prostetik yang dikembangkan untuk mengembalikan fungsi motorik dan fleksibilitas pada individu yang mengalami kehilangan sebagian atau seluruh jari tangan. Pengembangan prosthetic hand tidak hanya bertujuan

memperbaiki aspek estetika, tetapi juga berfokus pada peningkatan kemampuan fungsional pengguna dalam melakukan aktivitas sehari-hari secara mandiri dan efisien. Prinsip dasar teknologi *prosthetic* adalah meniru gerakan alami anggota tubuh manusia agar pengguna dapat merasakan kenyamanan, kemudahan penggunaan, serta peningkatan kualitas hidup dalam menjalankan fungsi tangan secara optimal (Ulan et al., 2024). *Prosthetic hand* dirancang menyerupai tangan manusia baik dari segi bentuk maupun fungsi, dan dapat dikendalikan melalui berbagai metode, seperti perangkat mekanis, sinyal kontraksi otot, maupun sistem kendali berbasis sensor dan elektronik. Efektivitas *prosthetic hand* sangat bergantung pada kemampuannya dalam meniru gerakan tangan manusia secara alami dan responsif (Ngurah et al., 2019).

Hall Effect Linear Sensor (Sensor Medan Magnet)

Hall effect linear sensor merupakan salah satu jenis sensor medan magnet yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan dan intensitas medan magnet di sekitarnya. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada efek Hall, yaitu fenomena fisika di mana muatan listrik yang mengalir pada material konduktif atau semikonduktif akan mengalami deviasi akibat gaya Lorentz ketika dikenai medan magnet yang tegak lurus terhadap arah arus. Akibatnya, terbentuk tegangan Hall yang nilainya berbanding lurus dengan kekuatan medan magnet yang diterima, sehingga menghasilkan sinyal keluaran yang bersifat linier (Winarto & Puput, 2018). Secara struktural, *hall effect linear sensor* terdiri dari lapisan semikonduktor sebagai media aliran arus dan sepasang elektroda yang berfungsi mengukur tegangan akibat pengaruh medan magnet eksternal. Kemampuan sensor dalam mengonversi perubahan medan magnet menjadi sinyal listrik menjadikannya banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti sistem otomotif, robotika, perangkat medis, dan elektronik.

Pada kondisi tanpa medan magnet, sensor menghasilkan tegangan referensi (offset) sekitar setengah dari tegangan suplai, yaitu $\pm 2,5$ V pada suplai 5 V. Ketika medan magnet diberikan, terjadi perubahan kecil pada tegangan keluaran yang bersifat linier terhadap intensitas medan magnet, sesuai dengan sensitivitas sensor. Karakteristik linier dan respons real-time ini menjadikan *hall effect linear sensor* stabil dan mudah diintegrasikan dengan sistem mikrokontroler (Wibowo et al., 2022). Selain digunakan untuk mendeteksi posisi, sensor Hall juga banyak dimanfaatkan dalam pengukuran kecepatan putaran atau *Revolution Per Minute* (RPM). Sensor mendeteksi perubahan medan magnet setiap kali terjadi pergerakan atau rotasi, kemudian menghasilkan sinyal listrik yang diproses oleh mikrokontroler melalui konversi analog ke digital. Nilai RPM selanjutnya dihitung berdasarkan jumlah pulsa yang diterima dalam interval waktu tertentu.

3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini disusun untuk menjelaskan tahapan perancangan dan implementasi sistem *prosthetic hand* berbasis mikrokontroler ESP32 dengan kendali nirkabel real-time. Metodologi difokuskan pada perancangan perangkat keras, penyusunan skematik rangkaian sistem, serta konfigurasi rangkaian dengan mikrokontroler ESP32.

Desain Perangkat Keras

Perangkat keras prosthetic hand pada penelitian ini terdiri dari dua mikrokontroler, yaitu ESP32 dan Arduino Uno, lima buah motor servo yang masing-masing berfungsi sebagai penggerak jari, serta throttle gas sepeda listrik yang digunakan sebagai perangkat input utama. Seluruh komponen utama dirangkai pada sebuah rangka berbahan kayu, sedangkan throttle ditempatkan secara terpisah untuk memudahkan pengoperasian oleh pengguna. *Throttle* dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 melalui kabel untuk membaca perubahan posisi yang selanjutnya diproses sebagai perintah kendali gerakan motor servo. Desain perangkat keras prosthetic hand secara keseluruhan seperti dibawah ini.

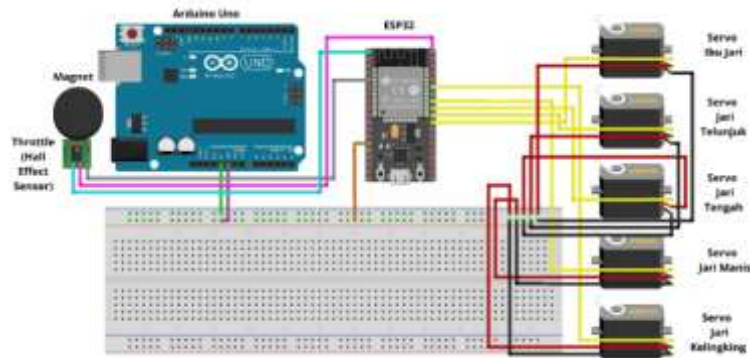


Gambar 1. Desain Perangkat Keras.

Pada gambar 1. menunjukan koneksi *throttle* gas ke rangkaian pengendali di dalam *prosthetic hand* serta penataan komponen internal seperti motor servo dan mekanisme penggerak yang disusun secara ringkas dan terintegrasi. Tampilan ini memberikan gambaran mengenai konstruksi dan tata letak komponen pada prosthetic hand yang dirancang.

Skematik Rangkaian Sistem

Skematik rangkaian sistem menggambarkan hubungan antar komponen dalam sistem prosthetic hand.



Gambar 2. Rangkaian Perangkat Keras *Prosthetic Hand*.

Konfigurasi pin pada skematik rangkaian sistem *prosthetic hand* dirancang untuk mendukung proses pembacaan sensor, pengolahan data, dan pengendalian aktuator secara optimal. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pembaca input dari throttle gas berbasis *hall effect linear sensor*, di mana sinyal analog sensor dihubungkan ke pin ADC ESP32 (GPIO 34), sedangkan pin 3,3 V dan GND digunakan sebagai catu daya dan referensi *ground*. Data hasil pembacaan sensor selanjutnya dikirimkan secara nirkabel melalui modul Wi-Fi internal ESP32 ke Arduino Uno. Arduino Uno berfungsi sebagai pengendali aktuator dengan memanfaatkan pin digital PWM D3, D5, D6, D9, dan D10 untuk mengontrol lima buah motor servo yang masing-masing menggerakkan satu jari *prosthetic hand*, dengan pin 5 V sebagai sumber tegangan dan GND sebagai *ground* bersama. Konfigurasi ini memungkinkan sistem bekerja secara *real-time* dengan komunikasi yang stabil antara unit input dan aktuator.

Konfigurasi Rangkaian dengan ESP32

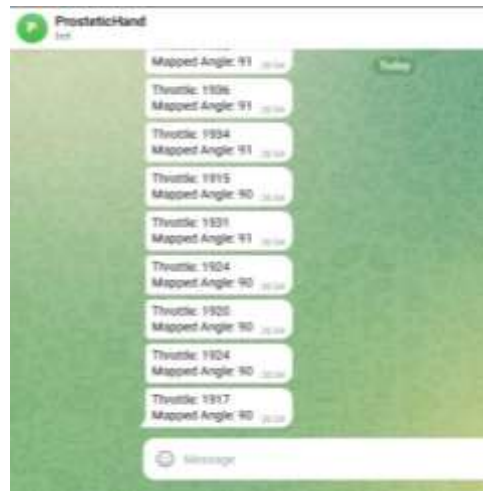
Konfigurasi rangkaian dengan ESP32 pada sistem *prosthetic hand* meliputi pengaturan input dari *throttle* gas dan pengendalian motor servo sebagai aktuator. *Throttle* gas berbasis *hall effect linear sensor* dikonfigurasi sebagai input analog pada pin ADC ESP32 untuk membaca perubahan tegangan yang merepresentasikan posisi *throttle*, kemudian nilai tersebut diproses dan dipetakan ke sudut gerak servo. Motor servo dikonfigurasi untuk menerima sinyal kendali berupa *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan berdasarkan hasil pemetaan input *throttle*, sehingga setiap perubahan posisi *throttle* menghasilkan pergerakan servo yang proporsional dan responsif. Seluruh konfigurasi dirancang untuk memastikan sistem mampu bekerja secara *real-time* dengan respons yang stabil dan akurat dalam menggerakkan jari *prosthetic hand*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja sistem *prosthetic hand* berdasarkan serangkaian pengujian yang meliputi respons sistem terhadap input pengguna, keakuratan pergerakan motor servo dalam mengikuti sudut yang diinginkan, serta kemampuan prototipe dalam menjalankan fungsi dasar tangan seperti menggenggam, melepaskan dan mengangkat objek. Selain itu, dilakukan pengujian waktu dan jarak tempuh pergerakan jari pada aktivitas tertentu untuk mengevaluasi efektivitas dan efisiensi kinerja sistem secara keseluruhan.

Hasil Pengujian Sudut

Pengujian variasi sudut servo dilakukan untuk mengevaluasi keakuratan pergerakan jari prosthetic hand terhadap perintah sudut yang dikirimkan melalui sistem. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan sudut servo yang diperintahkan melalui aplikasi Telegram dengan sudut aktual yang dicapai oleh motor servo.



Gambar 3. Tampilan Data pada Telegram.

Data pengukuran ditampilkan di Telegram seperti pada Gambar 3. Selain itu, parameter kekuatan *throttle* dalam satuan RPM serta waktu pengiriman data juga dicatat untuk menilai kestabilan sistem kendali dan komunikasi data. Pengujian dilakukan pada lima variasi sudut, yaitu 0° , 45° , 90° , 135° , dan 180° .

Tabel 1. Hasil Data Pengujian Sudut.

Sudut Servo Aktual	Sudut Servo Data Telegram	Kekuatan <i>Thorttle</i> (rpm)	Waktu Pengiriman Data (sekon)
$0,6^0$	0^0	848,8	5
$45,6^0$	$44,8^0$	1384,6	5
$86,6^0$	$90,2^0$	1923,2	5
$135,4^0$	$135,2^0$	2455	5
176^0	$179,8^0$	2989,4	5

Tabel 1. menyajikan hasil rata-rata pengujian sistem prosthetic hand pada kelima variasi sudut tersebut. Parameter yang diamati meliputi sudut servo aktual, sudut perintah dari Telegram, kekuatan throttle (RPM), dan waktu pengiriman data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut servo aktual memiliki nilai yang sangat mendekati sudut perintah, dengan selisih yang relatif kecil pada setiap variasi sudut. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menerjemahkan perintah sudut secara akurat dan konsisten, serta mencerminkan respons sistem kendali yang presisi.

Selain itu, hasil pengujian memperlihatkan bahwa nilai kekuatan *throttle* meningkat seiring dengan bertambahnya sudut servo. Nilai RPM terendah diperoleh pada sudut 0° , sedangkan nilai RPM tertinggi terjadi pada sudut 180° , yang mengindikasikan bahwa kebutuhan daya motor servo semakin besar pada sudut gerak yang lebih tinggi. Sementara itu, waktu pengiriman data tercatat konstan sebesar 5 detik pada seluruh variasi pengujian, menunjukkan bahwa sistem komunikasi data berjalan secara stabil tanpa adanya keterlambatan yang signifikan. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem *prosthetic hand* memiliki performa yang responsif, efisien, dan andal, dengan hubungan yang konsisten antara sudut servo, kekuatan throttle, dan kestabilan komunikasi data.

Hasil Pengujian Menggenggam Objek

Pengujian menggenggam objek dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan prosthetic hand dalam menyesuaikan gerakan jari terhadap objek dengan ukuran yang berbeda-beda. Pada pengujian ini digunakan beberapa objek dengan variasi diameter yang bertujuan untuk menilai fleksibilitas, kekuatan genggam, serta efektivitas sistem dalam melakukan fungsi dasar tangan secara stabil dan proporsional.



Gambar 4. Pengujian Menggenggam Objek.

Tabel 2. Hasil Data Pengujian Menggenggam Objek.

Diameter Benda (cm)	Waktu Percobaan (sekon)	Waktu Menggenggam (sekon)	Sudut Servo (°)					Kekuatan Throttle (RPM)	Keterangan
			1	2	3	4	5		
3,5	60	0	180	180	180	180	180	2992	Tidak Menggenggam
5,5	60	60	180	170	180	180	165	2989	Menggenggam
7,5	60	60	180	160	180	165	125	2992	Menggenggam
9	60	60	180	135	180	165	105	2988	Menggenggam
12	60	60	180	90	90	100	50	2992	Menggenggam

Tabel 2. menyajikan hasil terbaik pengujian kemampuan prosthetic hand dalam menggenggam objek dengan variasi diameter antara 3,5 cm hingga 12 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kemampuan genggam sangat dipengaruhi oleh ukuran diameter objek serta performa mekanik dan sistem kendali secara keseluruhan. Pada objek dengan diameter 3,5 cm, prosthetic hand belum mampu melakukan genggam secara efektif karena celah antar jari masih terlalu besar, meskipun sudut servo dan nilai throttle telah mencapai kondisi maksimum. Sebaliknya, mulai dari diameter 5,5 cm hingga 12 cm, prosthetic hand mampu menggenggam objek dengan baik dan stabil, dengan performa optimal ditunjukkan pada objek berdiameter 7,5 cm yang dapat digenggam secara konsisten selama 60 detik. Selain itu, hasil pengujian memperlihatkan bahwa sudut servo dan posisi jari prosthetic sangat bergantung pada besar kecilnya diameter objek. Semakin besar diameter objek, sudut tekuk servo yang terbentuk cenderung semakin kecil karena jari harus membuka lebih lebar untuk menyesuaikan ukuran objek, sehingga kemampuan jari untuk menekuk secara penuh menjadi terbatas.

Hasil Data Pengujian Mengangkat Objek

Pengujian bertujuan untuk mengetahui kemampuan *prosthetic hand* dalam menggenggam dan mengangkat objek. Pada objek uji berupa botol plastik berisi air sebanyak 300 ml yang digenggam dan diangkat secara vertikal pada ketinggian 10–50 cm dari permukaan lantai untuk mengevaluasi waktu respons dan kestabilan sistem.

Tabel 3. Hasil Pengujian berdasarkan Ketinggian.

Ketinggian (cm)	Volume (ml)	Waktu Prototipe Menggenggam (sekon)	Sudut Telegram (°)	Kekuatan Thortell	Keterangan
10	500	120	180	2991	Terangkat
20	500	120	180	2986	Terangkat
30	400	120	180	2990	Terangkat
40	400	120	180	2990	Terangkat
50	300	120	180	2995	Terangkat

Berdasarkan Tabel menunjukkan sistem *prosthetic hand* menunjukkan performa yang stabil dalam pengujian waktu genggam pada variasi ketinggian objek antara 10 cm hingga 50 cm. Seluruh pengujian memperlihatkan sudut servo mencapai 180° , yang menunjukkan bahwa sistem merespons perintah menggenggam secara maksimal pada setiap kondisi. Nilai kekuatan throttle berada pada rentang yang relatif konstan, yaitu antara 2986 hingga 2995 RPM, menandakan bahwa perubahan ketinggian objek tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja motor servo. Selain itu, seluruh objek pada setiap ketinggian berhasil digenggam dengan waktu operasi yang konsisten, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem *prosthetic hand* mampu bekerja secara andal dan stabil pada berbagai ketinggian dalam kondisi penggunaan nyata.

Hasil Pengujian Jarak Tempuh

Pengujian ini bertujuan untuk menilai kemampuan *prosthetic hand* dalam mempertahankan genggamannya selama pergerakan pada jarak 20 cm, 40 cm, 80 cm, dan 100 cm. Parameter yang diamati meliputi sudut servo dari Telegram, kekuatan throttle (RPM), serta keberhasilan perpindahan objek.

Tabel 4. Hasil Pengujian Berdasarkan Jarak Tempuh.

Jarak (cm)	Waktu yang Ditempuh (sekon)	Sudut Telegram ($^\circ$)	Kekuatan <i>Thortell</i> (RPM)	Keterangan
20	20	180	2990	Sampai Tujuan
	50	180	2986	Terjatuh (saat 18 sekon)
	60	180	2992	Terjatuh (saat 55 sekon)
	70	180	2981	Sampai Tujuan
	100	180	3104	Sampai Tujuan
40	10	180	3104	Sampai Tujuan
	70	180	2975	Terjatuh (saat 14 sekon)
	80	180	2987	Sampai Tujuan
	100	180	2958	Sampai Tujuan
80	10	180	2962	Sampai Tujuan
	100	180	2939	Sampai Tujuan
	10	170	2933	Sampai Tujuan
100	90	180	2970	Terjatuh (saat 42 sekon)
	100	180	2987	Terjatuh (saat 41 sekon)

Berdasarkan hasil pengujian jarak tempuh, sistem *prosthetic hand* menunjukkan performa yang relatif baik pada jarak pendek hingga menengah, khususnya pada jarak 20 cm dan 40 cm, dengan sebagian besar percobaan berhasil mencapai tujuan. Pada jarak 20 cm, sistem berhasil pada tiga dari lima percobaan, sementara kegagalan terjadi pada durasi tertentu meskipun nilai *throttle* berada pada kisaran tinggi, yang mengindikasikan bahwa kestabilan genggamannya tidak hanya dipengaruhi oleh kekuatan motor, tetapi juga oleh durasi operasi dan

kestabilan sudut servo. Pada jarak 40 cm, sistem menunjukkan performa yang lebih stabil dengan hanya satu kegagalan, meskipun masih terdapat sensitivitas terhadap variasi waktu tertentu. Pada jarak 80 cm, *prosthetic hand* mampu mempertahankan genggamannya dengan baik selama sudut servo berada pada posisi maksimal, sehingga seluruh percobaan berhasil. Sebaliknya, pada jarak 100 cm, tingkat kegagalan meningkat terutama pada durasi waktu yang lebih lama, di mana penurunan sudut servo menyebabkan genggamannya menjadi tidak stabil meskipun nilai *throttle* tetap tinggi. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kestabilan sudut servo dan durasi operasi memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap keberhasilan genggamannya dibandingkan kekuatan *throttle*, terutama pada jarak tempuh yang lebih jauh.

Hasil Pengujian QoS

Pengujian *Quality of Service* (QoS) dilakukan untuk mengevaluasi kinerja komunikasi data pada prototipe *prosthetic hand* dalam mengirimkan informasi secara *real-time* dari mikrokontroler ESP32 ke aplikasi Telegram. Parameter QoS yang dianalisis meliputi *throughput*, *packet loss*, *delay*, dan *jitter*. Pengujian dilakukan selama 19.150 detik menggunakan perangkat lunak *Wireshark*, dengan total 4.188 paket data yang berhasil dikirim tanpa adanya *packet loss* (0%). Hasil pengujian menunjukkan nilai *throughput* sebesar 1.737,59 kbps dengan rata-rata pengiriman 218,7 paket per detik dan ukuran paket sebesar 993 byte. Nilai *delay* rata-rata tercatat sebesar 4,572 ms, jauh di bawah ambang batas 150 ms, sedangkan nilai *jitter* rata-rata sebesar 4,571 ms, yang juga berada di bawah batas toleransi 30 ms. Hal ini menunjukkan sistem dapat mentransmisikan data secara cepat, stabil, dan presisi. Meskipun masih terdapat keterbatasan dalam kelenturan gerak dan kekuatan genggamannya, prototipe telah menjalankan fungsi utamanya dengan baik dan memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi *prosthetic hand* yang lebih canggih dan adaptif.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *prosthetic hand* berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sistem kendali nirkabel real-time menggunakan hall effect linear sensor sebagai input dan motor servo sebagai aktuator. Pada pengujian menggenggam objek, *prosthetic hand* mampu melakukan fungsi genggamannya secara efektif pada objek dengan diameter 5,5 cm hingga 12 cm, dengan performa optimal pada diameter 7,5 cm. Pengujian pengangkatan objek juga menunjukkan bahwa sistem mampu menggenggam dan mengangkat beban hingga 500 ml pada ketinggian 10–50 cm dengan kinerja yang stabil.

Selain itu, hasil pengujian *Quality of Service* (QoS) menunjukkan performa komunikasi nirkabel yang sangat baik dengan nilai throughput sebesar 1.737,59 kbps, delay rata-rata 4,572 ms, jitter 4,571 ms, dan packet loss 0%, yang membuktikan bahwa sistem mampu bekerja secara cepat dan real-time. Secara keseluruhan, prototipe prosthetic hand yang dikembangkan telah menjalankan fungsi dasar tangan dengan baik dan menunjukkan potensi sebagai solusi teknologi asistif yang sederhana, stabil, dan terjangkau bagi penyandang tunadaksa.

Saran

Pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada peningkatan desain mekanik dan material prosthetic hand agar mampu menahan beban yang lebih besar serta meningkatkan fleksibilitas gerakan jari. Selain itu, integrasi sistem kendali yang lebih adaptif, penggunaan sensor tambahan, serta optimasi algoritma kendali diharapkan dapat meningkatkan presisi dan kenyamanan penggunaan. Evaluasi performa pada pengguna secara langsung juga perlu dilakukan untuk mengkaji aspek ergonomi dan keandalan sistem dalam penggunaan jangka panjang.

DAFTAR REFERENSI

- Azzahra, I. N., Zain, S. Z., Az-Zahra, A., Zahra, D. F., Pertiwi, A. D., & Kartika, W. I. (2025). Analisis kemampuan kognitif pada anak tuna daksa. *Aulad: Journal on Early Childhood*, 8(2), 697–705. <https://doi.org/10.31004/aulad.v8i2.922>
- Borisov, I. I., Borisova, O. V., Krivosheev, S. V., Oleynik, R. V., & Reznikov, S. S. (2017). Prototyping of EMG-controlled prosthetic hand with sensory system. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 16027–16031. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1915>
- Febriani, I. (2018). Penerimaan diri pada remaja penyandang tuna daksa. *Psikoborneo*, 6(1), 150–157.
- Jones, D., Wang, L., Ghanbari, A., Vardakastani, V., Kedgley, A. E., Gardiner, M. D., Vincent, T. L., Culmer, P. R., & Alazmani, A. (2020a). Design and evaluation of magnetic hall effect tactile sensors for use in sensorized splints. *Sensors*, 20(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/s20041123>
- Jones, D., Wang, L., Ghanbari, A., Vardakastani, V., Kedgley, A. E., Gardiner, M. D., Vincent, T. L., Culmer, P. R., & Alazmani, A. (2020b). Design and evaluation of magnetic hall effect tactile sensors for use in sensorized splints. *Sensors*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/s20041123>
- Kim, J., Choi, S., Cho, K., & Nam, K. (2016). Position estimation using linear Hall sensors for permanent magnet linear motor systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(12), 7644–7652. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2591899>

- Ngurah, I. G. L., Danudiningrat, A. P., Khoswanto, H., & Santoso, P. (2019). Kendali gerak prosthetic hand menggunakan flex sensors dan accelerometer. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(1), 6–11.
- Prambudi, G. E., Maulana, R., & Kurniawan, W. (2019). Implementasi sistem pengendali jari tangan robot dengan sensor flex menggunakan metode MAP. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 3(1), 291–300. <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Saleh, K. P. Y., Ismail, R., & Ariyanto, M. (2022). Low cost mechanical prosthetic hand (Metic Hand) design for under elbow hand amputation patients. *Jurnal Rotasi*, 24(4), 26–32.
- Siregar, L. A., Ananda, Y., Adha, A. M., & Iqbal, M. (2025). Rancang bangun lengan robot berbasis Arduino menggunakan sistem kontrol sensor giroskop. *Journal of Electrical and System Control Engineering*, 8(2), 201–206. <https://doi.org/10.31289/jesce.v6i2.12986>
- Syarief, N. S., Pangestu, A. A., Putri, H. K., Filkhaqq, T. A., & Harjanti, G. Y. N. (2022). Karakteristik dan model pendidikan bagi anak tuna daksa. *Edification Journal*, 4(2), 275–285. <https://doi.org/10.37092/ej.v4i2.337>
- Ulan, R. F. J., Nur'Aidha, A. C., Kumarajati, D. Y. H., Agisna, F., & Chaerunisa, S. T. (2024). Perancangan jari prostetik untuk penyandang tuna daksa berbasis sensor sentuh dan Arduino Uno. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v9i1.291>
- Wibowo, P., Bakti, P., & Supono, I. (2022). Sistem verifikasi medan magnet untuk sumber magnet kumparan sejajar. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, dan Teknik Elektronika*, 10(2), 379–393. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v10i2.379>
- Wijaya, I. K. M., Wardana, I. W. R., & Budiarta, I. G. E. (2022). Rancangan ruang untuk rumah tinggal penyandang disabilitas tuna daksa. *Jurnal Linears*, 5(2), 43–51. <https://doi.org/10.26618/j-linears.v5i2.8237>
- Winarto, B. W. T., & Puput, W. R. (2018). Rancang bangun sistem levitasi magnet menggunakan kontrol PID. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(1), 63–70.