

# Implementasi dan Analisis Sistem Kendali Robot Ikan Berbasis ESP32 Menggunakan Komunikasi Bluetooth dan Aplikasi Mobile

Rifki Muhida<sup>1</sup>, Riza Muhida<sup>2</sup>, Muhammad Riza<sup>2</sup>, Ari Legowo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Industri, YPTK Universitas Putra Indonesia, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Bandar Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

<sup>3</sup>Engineering Technology and Sciences, Higher Colleges of Technology, Abu Dhabi, UAE

\*rifkimuhida@gmail.com

**Abstract-** This study aims to implement and analyze an ESP32-based robotic fish control system using Bluetooth communication and a mobile application as the user interface. The developed system integrates an ESP32 microcontroller, servo motors as actuators, a Bluetooth communication module, and a mobile application to enable real-time operation. An experimental method was employed, consisting of system design, implementation, and performance evaluation. The testing procedure included dry testing and aquatic environment testing to assess communication responsiveness, motion stability, maneuverability, and connectivity reliability. Experimental results showed that the robotic fish successfully executed forward, left-turn, and right-turn movements with stable performance in water. Bluetooth communication remained reliable up to a distance of 10 m, with an average latency ranging from 78–108 ms when the robot was stationary on the water surface and 92–138 ms during maneuvering conditions. The robotic fish also achieved a continuous operating time of approximately 30 minutes using the integrated battery system. These results demonstrate that the proposed ESP32-based control system provides reliable real-time performance and has strong potential for further development in Internet of Things (IoT)-based robotic and intelligent control applications..

**Keywords:** ESP32, robotic fish, control system, Bluetooth, real-time control

**Abstrak-** Studi ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan menganalisis sistem kontrol ikan robot berbasis ESP32 menggunakan komunikasi Bluetooth dan aplikasi seluler sebagai antarmuka pengguna. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32, motor servo sebagai aktuator, modul komunikasi Bluetooth, dan aplikasi seluler untuk memungkinkan operasi waktu nyata. Metode eksperimental digunakan, yang terdiri dari desain sistem, implementasi, dan evaluasi kinerja. Prosedur pengujian meliputi pengujian kering dan pengujian lingkungan perairan untuk menilai respons komunikasi, stabilitas gerak, kemampuan manuver, dan keandalan konektivitas. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa ikan robot berhasil melakukan gerakan maju, belok kiri, dan belok kanan dengan kinerja stabil di dalam air. Komunikasi Bluetooth tetap andal hingga jarak 10 m, dengan latensi rata-rata berkisar antara 78–108 ms ketika robot diam di permukaan air dan 92–138 ms selama kondisi manuver. Ikan robot juga mencapai waktu operasi terus menerus sekitar 30 menit menggunakan sistem baterai terintegrasi. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis ESP32 yang diusulkan memberikan kinerja real-time yang andal dan memiliki potensi yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut dalam aplikasi robotika dan kontrol cerdas berbasis Internet of Things (IoT).

**Kata Kunci:** ESP32, robot ikan, sistem kendali, Bluetooth, waktu nyata

## 1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi robotika dan sistem kendali cerdas dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan peningkatan yang signifikan, khususnya pada aplikasi berbasis sistem tertanam (\*embedded system\*) dan Internet of Things (IoT). Integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak memungkinkan pengembangan sistem robotik yang lebih adaptif, efisien, dan mampu beroperasi secara real-time dalam berbagai lingkungan, termasuk lingkungan akuatik [1], [2]. Salah satu bentuk

implementasi yang berkembang pesat adalah robot ikan biomimetik, yaitu robot yang dirancang untuk meniru mekanisme gerak alami ikan guna mencapai efisiensi propulsi dan manuverabilitas yang lebih baik dibandingkan sistem konvensional [3], [4].

Dalam konteks informatika, pengembangan robot tidak hanya berfokus pada aspek mekanik, tetapi juga pada sistem kendali, komunikasi data, dan interaksi manusia dengan sistem (\*human-machine interaction\*).

Vol.17 no.1 | Juni 2026

EXPLORE: ISSN: 2087-2062, Online ISSN: 2686-181X / DOI: <http://dx.doi.org/10.36448/jsit.v17i1.4822>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Penggunaan mikrokontroler seperti ESP32 menjadi sangat populer karena kemampuannya dalam menyediakan fitur komputasi yang memadai serta integrasi konektivitas nirkabel seperti Wi-Fi dan Bluetooth dalam satu chip [5], [6]. Kemampuan tersebut memungkinkan implementasi sistem kendali berbasis jaringan yang mampu beroperasi secara real-time dan mendukung berbagai aplikasi IoT, termasuk pengendalian robot secara jarak jauh melalui perangkat mobile [7].

Selain itu, teknologi komunikasi Bluetooth, khususnya Bluetooth Low Energy (BLE), telah banyak digunakan dalam sistem robotika untuk mendukung komunikasi data yang efisien dengan konsumsi daya yang rendah. Teknologi ini memungkinkan interaksi langsung antara robot dan pengguna melalui aplikasi mobile sehingga meningkatkan fleksibilitas dan kemudahan pengoperasian sistem [8]. Dalam penelitian sebelumnya, penggunaan Bluetooth pada sistem robot telah terbukti mampu meningkatkan respons interaksi serta menyediakan kontrol yang lebih intuitif melalui perangkat pengguna [9].

Pada bidang robot ikan, beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa sistem kendali berbasis motor servo yang dikombinasikan dengan algoritma kontrol yang tepat dapat menghasilkan gerakan yang menyerupai ikan asli dengan tingkat efisiensi yang tinggi [3], [10]. Penggunaan aktuator servo memberikan keunggulan dalam menghasilkan pola gerakan osilasi yang fleksibel serta memungkinkan implementasi berbagai strategi kendali untuk meningkatkan kemampuan manuver robot. Namun demikian, integrasi antara sistem kendali, komunikasi data, dan antarmuka pengguna masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan robot ikan yang dapat beroperasi secara efektif dan responsif [11].

Perkembangan sistem IoT juga memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan kemampuan monitoring dan kontrol pada sistem robotik. Dengan memanfaatkan platform berbasis ESP32, sistem dapat dikembangkan tidak hanya untuk melakukan kontrol gerak, tetapi juga pengumpulan dan pengiriman data secara real-time ke perangkat pengguna [7], [12]. Selain itu, penerapan konsep kecerdasan komputasional pada perangkat IoT membuka peluang pengembangan sistem robot yang lebih adaptif, cerdas, dan terhubung [13], [14]. Hal ini menjadikan ESP32 sebagai salah satu platform yang banyak digunakan dalam pengembangan robotika modern karena menawarkan kemampuan komputasi yang memadai dengan biaya implementasi yang relatif rendah [15].

Meskipun berbagai penelitian mengenai robot ikan biomimetik telah menunjukkan keberhasilan dalam pengembangan desain mekanik, sistem propulsi, dan pola gerakan yang menyerupai ikan alami, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek hidrodinamika dan struktur robot. Evaluasi terhadap performa komunikasi nirkabel, waktu respons sistem kendali, serta integrasi antara mikrokontroler, aplikasi mobile, dan aktuator masih relatif terbatas. Selain itu, beberapa penelitian belum menyajikan analisis kuantitatif mengenai latensi komunikasi maupun keandalan koneksi Bluetooth pada

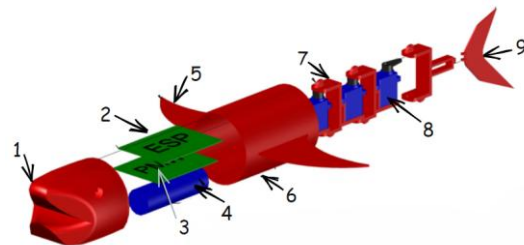
kondisi operasional di lingkungan air yang dinamis. Keterbatasan tersebut menyebabkan efektivitas sistem kendali real-time pada robot ikan belum dapat dievaluasi secara komprehensif.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan menganalisis sistem kendali robot ikan berbasis ESP32 yang menggunakan komunikasi Bluetooth dan aplikasi mobile sebagai antarmuka pengguna. Fokus utama penelitian ini adalah pada analisis performa sistem kendali, respons komunikasi, serta integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak dalam menghasilkan sistem yang stabil dan efisien. Kontribusi penelitian ini terletak pada evaluasi performa komunikasi Bluetooth dan respons sistem kendali secara real-time pada robot ikan biomimetik berbasis ESP32. Dengan pendekatan tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem robotika berbasis informatika yang lebih terintegrasi, responsif, dan aplikatif.

## 2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk mengimplementasikan dan menganalisis sistem kendali robot ikan berbasis ESP32 dengan komunikasi Bluetooth dan aplikasi mobile sebagai antarmuka pengguna. Tahapan penelitian meliputi perancangan sistem, integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi algoritma kendali, serta pengujian performa komunikasi dan gerakan robot. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjalankan perintah secara real-time, stabilitas gerakan, serta keandalan komunikasi Bluetooth pada lingkungan akuatik.

Struktur mekanik dan integrasi komponen utama robot ikan ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem terdiri atas mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan, motor driver, motor servo sebagai aktuator, baterai 3,7 V sebagai sumber daya, serta struktur mekanik berupa badan, sirip, dan ekor robot. Mikrokontroler ESP32 menerima perintah dari aplikasi mobile melalui komunikasi Bluetooth, kemudian mengolah data tersebut menjadi sinyal PWM yang digunakan untuk mengendalikan motor servo.



**Gambar 1.** Struktur dan integrasi komponen utama robot ikan berbasis ESP32

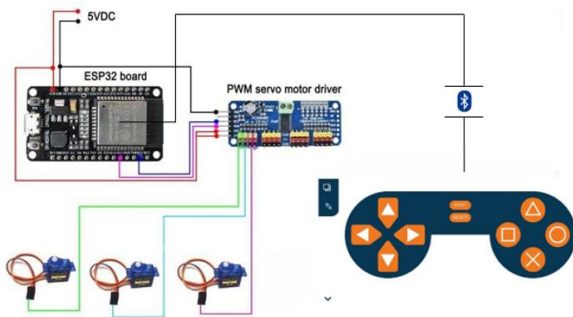


Untuk memperjelas identifikasi setiap komponen yang digunakan pada robot ikan, keterangan bagian-bagian utama ditunjukkan pada Tabel 1.

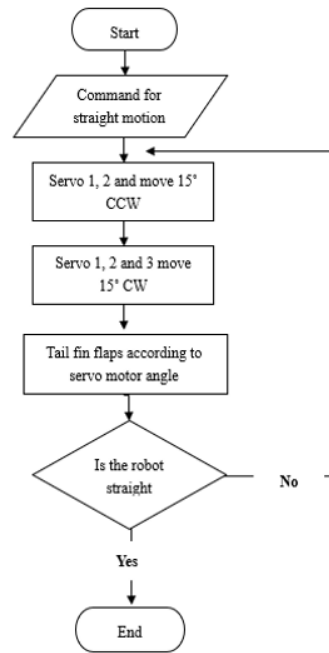
**Tabel 1.** Komponen Utama Robot Ikan Berbasis ESP32.

No	Komponen
1	Cover Head
2	ESP32 Microcontroller
3	Motor Driver
4	Battery 3.7 V
5	Fish Fin
6	Cover Body
7	Servo Motor
8	Servo Motor

Selanjutnya, konfigurasi sistem kendali dan hubungan antar komponen elektronik ditunjukkan pada Gambar 2. Diagram tersebut menunjukkan hubungan antara ESP32, motor driver, motor servo, sumber daya baterai, dan aplikasi mobile berbasis Bluetooth. Pada sistem ini, ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang menerima input dari pengguna kemudian menerjemahkannya menjadi sinyal PWM untuk menggerakkan motor servo.



**Gambar 2.** Diagram kelistrikan dan sistem kendali robot ikan berbasis ESP32 dan PWM servo



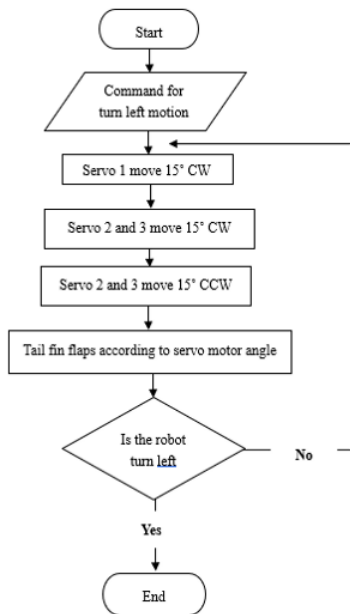
**Gambar 3.** Flowchart algoritma kendali gerak maju robot ikan berbasis input pengguna

Komunikasi antara pengguna dan robot dilakukan melalui aplikasi mobile berbasis Bluetooth. Perintah seperti gerak maju, belok kiri, dan belok kanan dikirimkan ke ESP32 melalui koneksi Bluetooth. Selanjutnya, ESP32 memproses perintah tersebut dan menghasilkan sinyal PWM yang digunakan untuk mengendalikan sudut putar motor servo sehingga menghasilkan pola gerakan yang diinginkan.

Untuk menghasilkan gerakan maju, digunakan algoritma kendali yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada kondisi ini motor servo bekerja secara sinkron sehingga menghasilkan osilasi ekor yang simetris dan mendorong robot bergerak ke depan.

Selain gerak maju, robot juga dirancang untuk melakukan manuver belok kiri dan belok kanan. Algoritma gerak belok kiri ditunjukkan pada Gambar 4. Pada kondisi ini sudut putar servo dimodifikasi sehingga menghasilkan gaya dorong yang lebih besar pada salah satu sisi tubuh robot dan menyebabkan robot bergerak ke arah kiri.



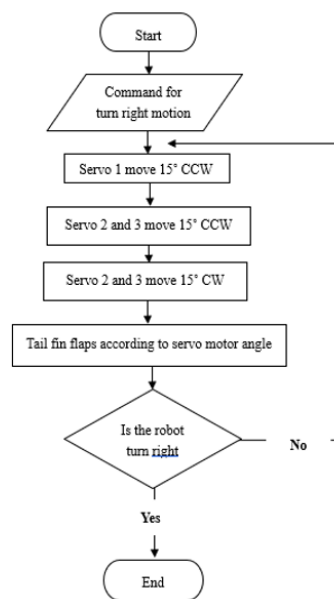


**Gambar 4.** Flowchart algoritma kendali gerak belok kiri pada robot ikan

Algoritma gerak belok kanan ditunjukkan pada Gambar 5. Prinsip kerjanya serupa dengan gerak belok kiri, namun konfigurasi sudut servo dibalik sehingga menghasilkan arah gerak yang berlawanan.

Pengujian sistem dilakukan dalam dua tahap, yaitu dry testing dan aquatic testing. Dry testing bertujuan untuk memastikan seluruh komponen elektronik, algoritma kendali, dan komunikasi Bluetooth dapat berfungsi dengan baik sebelum robot dioperasikan di lingkungan air. Setelah seluruh fungsi sistem berjalan normal, dilakukan aquatic testing untuk mengevaluasi performa gerakan robot dalam kondisi operasional sebenarnya.

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi latensi komunikasi Bluetooth, jangkauan konektivitas, stabilitas gerakan, kemampuan manuver, dan durasi operasi sistem. Pengukuran latensi dilakukan dengan menghitung selang waktu antara perintah yang diberikan melalui aplikasi mobile dan respons awal motor servo. Pengujian dilakukan pada beberapa jarak komunikasi, yaitu 2 m, 5 m, 8 m, dan 10 m. Setiap pengujian dilakukan sebanyak lima kali pengulangan dan nilai yang digunakan merupakan nilai rata-rata hasil pengukuran.



**Gambar 5.** Flowchart algoritma kendali gerak belok kanan pada robot ikan

Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi kinerja sistem kendali yang telah dikembangkan. Hasil analisis digunakan untuk menentukan tingkat keberhasilan integrasi ESP32, komunikasi Bluetooth, dan aplikasi mobile dalam menghasilkan sistem kendali robot ikan yang responsif, stabil, dan mampu beroperasi secara real-time.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil implementasi sistem kendali robot ikan berbasis ESP32 menunjukkan bahwa integrasi antara mikrokontroler, komunikasi Bluetooth, aplikasi mobile, dan aktuator motor servo dapat berjalan dengan baik. Sistem yang dikembangkan mampu menerima perintah dari pengguna melalui aplikasi mobile dan menerjemahkannya menjadi gerakan robot secara real-time. Implementasi perangkat keras yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 6. Pada tahap ini dilakukan pengujian awal (dry testing) untuk memastikan seluruh komponen elektronik, komunikasi Bluetooth, dan algoritma kendali dapat berfungsi sesuai dengan perancangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh motor servo mampu merespons perintah yang diberikan tanpa mengalami kesalahan komunikasi maupun gangguan sinkronisasi antar aktuator.

Setelah seluruh fungsi sistem dinyatakan berjalan dengan baik, pengujian dilanjutkan pada lingkungan air untuk mengevaluasi performa komunikasi Bluetooth dan kemampuan robot dalam menjalankan perintah gerakan. Pengukuran dilakukan pada beberapa variasi jarak komunikasi untuk mengetahui pengaruh jarak terhadap latensi sistem kendali. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan data yang diperoleh, sistem mampu mempertahankan konektivitas Bluetooth secara stabil hingga jarak 10 meter. Pada kondisi robot berada di



permukaan air, latensi rata-rata berada pada rentang 78–108 ms, sedangkan ketika robot melakukan manuver aktif di dalam air nilai latensi meningkat menjadi 92–138 ms. Peningkatan tersebut disebabkan oleh perubahan orientasi robot selama bergerak serta adanya pengaruh lingkungan air terhadap propagasi sinyal Bluetooth. Meskipun demikian, seluruh nilai latensi masih berada pada rentang yang dapat diterima untuk aplikasi kendali real-time sehingga tidak mengganggu proses pengoperasian robot.



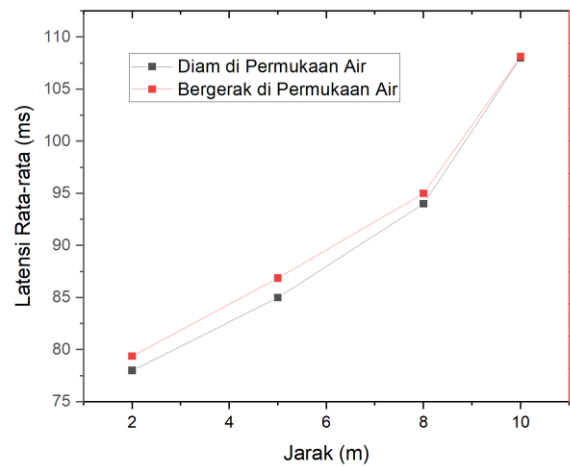
**Gambar 6.** Pengujian awal (dry testing) sistem kendali robot ikan untuk mengevaluasi respons motor servo dan komunikasi Bluetooth sebelum pengujian di lingkungan air.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Latensi dan Jangkauan Komunikasi Bluetooth

Kondisi Pengujian	Jarak (m)	Latensi Rata-rata (ms)	Status Komunikasi
Diam di Permukaan Air	2	78	Stabil
Diam di Permukaan Air	5	85	Stabil
Diam di Permukaan Air	8	94	Stabil
Diam di Permukaan Air	10	108	Stabil
Bermanuver di Air	2	92	Stabil
Bermanuver di Air	5	104	Stabil
Bermanuver di Air	8	117	Stabil
Bermanuver di Air	10	138	Stabil

Hubungan antara jarak komunikasi dan latensi sistem ditunjukkan pada Gambar 7. Grafik menunjukkan bahwa latensi meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jarak antara robot dan perangkat pengendali. Namun peningkatan tersebut masih bersifat linear dan tidak

menyebabkan hilangnya konektivitas selama pengujian berlangsung. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan ESP32 sebagai platform kendali memberikan performa komunikasi yang cukup baik untuk mendukung sistem robotika berbasis Bluetooth.



**Gambar 7.** Hubungan antara jarak komunikasi Bluetooth dan latensi sistem kendali robot ikan.

Selain evaluasi komunikasi, dilakukan pula pengujian terhadap kemampuan gerak robot di lingkungan air sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8. Robot mampu melakukan gerakan maju, belok kiri, dan belok kanan sesuai dengan perintah yang diberikan melalui aplikasi mobile. Gerakan osilasi ekor yang dihasilkan motor servo memberikan gaya dorong yang cukup untuk menghasilkan pergerakan yang stabil. Selama pengujian, robot dapat mempertahankan keseimbangan tubuh dengan baik baik pada kondisi diam maupun saat bermanuver. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi massa dan konfigurasi aktuator yang digunakan telah mampu menghasilkan karakteristik gerak yang menyerupai ikan secara alami.



**Gambar 8.** Pengujian robot ikan pada lingkungan air untuk mengevaluasi performa sistem kendali, stabilitas gerakan, dan kemampuan manuver secara real-time.



Evaluasi menyeluruh terhadap sistem dilakukan dengan mengamati parameter kalibrasi servo, waktu respons, keandalan waterproofing, stabilitas gerakan, kemampuan manuver, dan efisiensi energi. Ringkasan hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil tersebut, waktu respons sistem rata-rata berada pada kisaran 100 ms yang menunjukkan bahwa komunikasi antara aplikasi mobile dan ESP32 berlangsung dengan cepat. Sistem waterproofing yang diterapkan juga terbukti mampu melindungi seluruh komponen elektronik dari masuknya air selama pengujian. Selain itu, robot memiliki radius belok sekitar 30 cm dan mampu beroperasi secara kontinu hingga 30 menit menggunakan sumber daya baterai yang tersedia.

**Tabel 3.** Hasil Evaluasi Kinerja Sistem Kendali Robot Ikan Berbasis ESP32

Jenis Pengujian	Parameter	Hasil
Dry Testing	Kalibrasi Servo	Berhasil
Dry Testing	Waktu Respons	$\pm 100$ ms
Leakage Testing	Waterproofing	Tidak ditemukan kebocoran
Stability Testing	Stabilitas Gerakan	Stabil
Stability Testing	Radius Belok	$\pm 30$ cm
Open Water Testing	Durasi Operasi	$\pm 30$ menit

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali robot ikan berbasis ESP32 yang dikembangkan mampu bekerja secara responsif, stabil, dan andal. Integrasi antara komunikasi Bluetooth, aplikasi mobile, dan motor servo menghasilkan sistem kendali yang mampu menjalankan perintah secara real-time dengan tingkat latensi yang rendah. Selain itu, kemampuan mempertahankan konektivitas hingga jarak 10 meter serta durasi operasi mencapai 30 menit menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi yang baik untuk dikembangkan lebih lanjut pada aplikasi robotika biomimetik berbasis Internet of Things (IoT), khususnya untuk kebutuhan edukasi, eksplorasi, dan penelitian lingkungan perairan.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan dan menganalisis sistem kendali robot ikan berbasis ESP32 yang memanfaatkan komunikasi Bluetooth dan aplikasi mobile sebagai antarmuka pengguna. Integrasi antara mikrokontroler ESP32, motor servo, dan komunikasi nirkabel mampu menghasilkan sistem kendali yang responsif dan dapat beroperasi secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot mampu menjalankan perintah gerak maju, belok kiri, dan belok

kanan dengan baik serta mempertahankan stabilitas gerakan selama beroperasi di lingkungan air.

Evaluasi performa komunikasi menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan konektivitas Bluetooth secara stabil hingga jarak 10 meter. Nilai latensi komunikasi berada pada rentang 78–108 ms saat robot berada di permukaan air dan meningkat menjadi 92–138 ms saat robot melakukan manuver aktif. Meskipun terjadi peningkatan latensi pada kondisi bergerak, sistem tetap mampu memberikan respons yang cepat dan tidak menimbulkan gangguan terhadap proses pengendalian robot.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa sistem waterproofing yang diterapkan mampu melindungi seluruh komponen elektronik dari kebocoran selama pengoperasian. Selain itu, robot memiliki kemampuan manuver yang baik dengan radius belok sekitar 30 cm serta mampu beroperasi secara kontinu hingga 30 menit menggunakan sumber daya baterai yang tersedia. Hasil tersebut menunjukkan bahwa platform ESP32 memiliki potensi yang baik untuk diterapkan pada sistem robotika biomimetik berbasis Internet of Things (IoT).

Untuk penelitian selanjutnya, sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan sensor lingkungan, komunikasi jarak jauh berbasis Wi-Fi atau LoRa, serta algoritma navigasi cerdas sehingga robot ikan dapat digunakan tidak hanya sebagai media edukasi, tetapi juga untuk aplikasi monitoring kualitas air, eksplorasi lingkungan perairan, dan pengumpulan data secara otonom.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] M. Abir and M. Rahman, "Design and development of an autonomous aquatic robot with SONAR-based fish detection and feed distribution, water quality monitoring, and data-driven production forecasting in aquaculture," 2025. doi: 10.13140/RG.2.2.23506.26561.
- [2] Z. Yu, K. Li, Y. Ji, and S. Yang, "Designs, motion mechanism, motion coordination, and communication of bionic robot fishes: A survey," 2022. doi: 10.48550/arXiv.2206.15304.
- [3] A. Agrawal, "Robotic fish design and control based on biomechanics," IFAC Proceedings Volumes, 2014. doi: 10.3182/20140313-3-IN-3024.00235.
- [4] Y. Li et al., "A comprehensive review on fish-inspired robots," International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 19, 2022. doi: 10.1177/17298806221103707.
- [5] Espressif Systems, "ESP32 technical overview," 2022.
- [6] V. Barral, O. Campos, T. Domínguez-Bolaño, C. Escudero, and J. A. García-Naya, "Fine time measurement for the Internet of Things: A practical approach using ESP32," IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, 2022. doi: 10.1109/JIOT.2022.3158701.
- [7] M. S. Uddin and M. Prahara, "IoT-based weather monitoring system using ESP32 microcontroller,"



- International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology, pp. 693–701, 2025. doi: 10.48175/IJAR SCT-29283.
- [8] M. Scheunemann, K. Dautenhahn, M. Salem, and B. Robins, “Utilizing Bluetooth Low Energy for human-robot interaction,” 2016.
- [9] S. M. Kumar et al., “IoT-based fish pond monitoring system to enhance its productivity,” in Proc. IEEE ICIPTM, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIPTM57143.2023.10117894.
- [10] D. Xu et al., “Propulsion control of bionic robotic fish based on deep deterministic policy gradient algorithm,” IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2025. doi: 10.1109/OJIES.2025.3606965.
- [11] T. Sadoun, S. Mokrani, R. Aoudjit, J. Lloret, and M. Belkadi, “Adaptive radio access technology selection on ESP32-based IoT devices using reinforcement learning,” Engineering Research Express, vol. 7, no. 4, 2025. doi: 10.1088/2631-8695/ae24c5.
- [12] D. Ghazali, N. S. M. Nor, M. A. Mohaini, and H. Saputra, “Smart IoT-based monitoring system for fish breeding,” Journal of Advanced Research in Applied Mechanics, vol. 104, pp. 1–11, 2023. doi: 10.37934/aram.104.1.111.
- [13] P. Chetyrbok et al., “Computational intelligence for the Internet of Things,” E3S Web of Conferences, vol. 371, 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202337106001.
- [14] M. Jamuna and A. M. Prakash, “A study of communication protocols for Internet of Things (IoT) devices: Review,” 2021. doi: 10.2991/ahis.k.210913.033.
- [15] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntic, and O. Težak, “Design and implementation of ESP32-based IoT devices,” Sensors, vol. 23, no. 15, p. 6739, 2023. doi: 10.3390/s23156739.

