

Pengembangan Smart Trashbot Berbasis Internet Of Things Dengan Fitur Gesture Recognition Dan Autonomous Movement

¹Muhammad Rifqo Saputra, ²Kenanya Otniel Suhardi, ³Muhammad Aghnat Mumtaz, ⁴Efren Azriellie, ⁵Theresia Herlina
^{1,2,3,4,5}Bisnis dan Sistem Informasi, Universitas Pradita, Kabupaten Tangerang

E-mail: ¹muhammad.rifqo@student.pradita.ac.id, ²kenanya.otniel@student.pradita.ac.id,
³muhammad.aghnat@student.pradita.ac.id, ⁴efren.azriellie@student.pradita.ac.id,
⁵theresia.herlina@pradita.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prototipe Smart TrashBot, yaitu tempat sampah pintar bergerak berbasis Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi dan kebersihan dalam pengelolaan sampah. Tempat sampah konvensional, statis, dan manual dianggap kurang higienis dan kurang optimal. Oleh karena itu, sistem ini dirancang dengan mengintegrasikan fitur pengenalan gerakan menggunakan modul ESP32-CAM untuk membuka tutup tempat sampah secara otomatis tanpa kontak fisik, serta pergerakan otonom yang memanfaatkan sensor ultrasonik depan untuk navigasi independen guna menghindari rintangan. Sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 Dev Board dan berkomunikasi secara nirkabel melalui protokol MQTT. Pengujian fungsional menggunakan metode Black Box menunjukkan bahwa algoritma validasi 3-frame pada kamera terbukti secara akurat mengenali gerakan dan berhasil mengurangi kesalahan positif. Selain itu, robot mampu bermanuver untuk menghindari rintangan pada jarak kurang dari 25 cm, dan berhasil mengirimkan notifikasi telemetri secara real-time ke sistem dasbor ketika ruang kapasitas sampah yang tersisa kurang dari 7 cm. Meskipun ditemukan sedikit penyimpangan pada kecepatan roda karena sistem kontrol loop terbuka, secara keseluruhan pemisahan Edge AI dan kontrol aktuator IoT pada Smart TrashBot berhasil menciptakan solusi tempat sampah yang interaktif, otomatis, dan higienis.

Kata kunci : Tempat Sampah Cerdas, Internet of Things, Pengenalan Gestur, Navigasi Otonom, MQTT, ESP32.

ABSTRACT

This study aims to develop a prototype of the Smart TrashBot, an Internet of Things (IoT)-based mobile smart trash bin, to improve efficiency and hygiene in waste management. Conventional, static, manual trash bins are considered unhygienic and suboptimal. Therefore, this system is designed by integrating gesture recognition features using the ESP32-CAM module to automatically open the lid without physical contact, along with autonomous movement utilizing the front ultrasonic sensor for independent navigation to avoid obstacles. The system is controlled by an ESP32 Dev Board microcontroller and communicates wirelessly via the MQTT protocol. Functional testing using the Black Box method shows that the camera's 3-frame sequential validation algorithm accurately recognizes gestures and successfully reduces false positives. Furthermore, the robot is able to maneuver to avoid obstacles at a distance of less than 25 cm, and effectively sends real-time telemetry notifications to the dashboard system when the remaining trash capacity is below 7 cm. Although slight deviations in the wheel trajectory were observed due to the open-loop control system, overall, the separation of computation between Edge AI and IoT actuator control on the Smart TrashBot successfully creates an interactive, automated, and hygienic waste management solution.

Keyword : Smart Waste Bin, Internet of Things, Gesture Recognition, Autonomous Movement, MQTT, ESP32.

1. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah di lingkungan perkantoran memerlukan sistem yang lebih efektif karena tempat sampah konvensional masih bersifat manual, statis, dan membutuhkan interaksi langsung dari pengguna. UNEP (2024) menjelaskan bahwa peningkatan aktivitas manusia berdampak pada bertambahnya volume sampah, sehingga diperlukan sistem pengelolaan yang lebih adaptif. Perkembangan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pengelolaan sampah dilakukan secara otomatis melalui sensor dan sistem cerdas. Arthur et al. (2024) menyatakan bahwa penerapan *smart dustbin* berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah, sedangkan Dari et al. (2025) mengembangkan *smart waste bin* berbasis ESP32 untuk pemantauan kapasitas secara otomatis. Aris et al. (2026) juga menunjukkan bahwa integrasi multi-sensor pada *smart waste bin* berbasis ESP32 dapat meningkatkan fungsi pemantauan dan otomatisasi sistem.

Meskipun beberapa penelitian telah mengembangkan *smart dustbin* untuk pemantauan kapasitas dan buka-tutup otomatis, sebagian besar sistem masih bersifat statis. Ohemu et al. (2025) menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dan servo motor dapat diterapkan pada sistem *smart dustbin* untuk mendukung fungsi otomatis. Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini mengembangkan Smart TrashBot berbasis IoT yang mengintegrasikan *gesture recognition*, *autonomous movement*, pemantauan kapasitas, dan mekanisme buka-tutup otomatis menggunakan ESP32, ESP32-CAM, sensor ultrasonik, motor DC, dan servo motor.

2. LANDASAN TEORI

Internet of Things dan *Smart Waste Bin*

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang menghubungkan perangkat fisik dengan jaringan untuk mengirim dan mengolah data secara otomatis. Pada *smart waste bin*, IoT digunakan untuk mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, dan aktuator guna mendukung pemantauan kapasitas serta kendali otomatis (Intiadi et al., 2026; Venkadesh et al., 2024). Dalam penelitian ini, konsep tersebut dikembangkan menjadi Smart TrashBot yang mampu memantau kondisi sampah, merespons pengguna, dan bergerak secara mandiri.

ESP32, ESP32-CAM, dan Komunikasi Sistem

ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan pada perangkat IoT karena mendukung WiFi, Bluetooth, serta integrasi dengan berbagai komponen elektronik. Hercog et al. (2023) menyatakan bahwa ESP32 fleksibel dan mudah diprogram untuk pengembangan perangkat IoT. Smart TrashBot menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali dan ESP32-CAM sebagai perangkat akuisisi citra untuk fitur *gesture recognition*. Barral Vales et al. (2024) menjelaskan bahwa ESP32-CAM efisien dari sisi biaya dan mudah diintegrasikan pada aplikasi IoT berbasis citra. Komunikasi sistem dilakukan melalui WiFi atau UART, sedangkan protokol seperti MQTT dapat digunakan karena ringan dan sesuai untuk

pertukaran data pada perangkat dengan sumber daya terbatas (Sirmayanti et al., 2021).

Sensor Ultrasonik dan Aktuator

Sensor ultrasonik merupakan sensor jarak yang digunakan untuk mendeteksi objek dan tingkat kepenuhan sampah melalui pantulan gelombang suara. Pada Smart TrashBot, sensor ini berfungsi untuk mendeteksi hambatan dan mendukung navigasi robot (Wang et al., 2024). Aktuator yang digunakan terdiri dari motor DC sebagai penggerak roda, driver motor L298N untuk mengatur arah motor, dan servo motor untuk membuka serta menutup penutup tempat sampah. Shashank et al. (2021) menyatakan bahwa kombinasi sensor ultrasonik, mikrokontroler, dan motor penggerak umum digunakan pada robot sederhana dengan fitur penghindaran hambatan.

Gesture Recognition dan Autonomous Movement

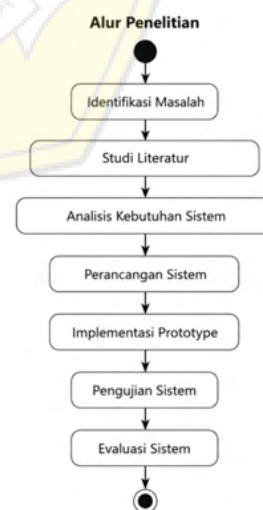
Gesture recognition merupakan teknologi pengenalan gerakan tangan sebagai perintah sistem sehingga memungkinkan interaksi tanpa kontak langsung. Teknologi ini sesuai diterapkan pada Smart TrashBot untuk meningkatkan kebersihan dan kemudahan penggunaan (Mary et al., 2024). Sementara itu, autonomous movement memungkinkan perangkat bergerak otomatis berdasarkan data sensor, seperti sensor ultrasonik untuk mendeteksi jarak dan menghindari hambatan. Niraimathi et al. (2026) menyatakan bahwa navigasi otonom dapat meningkatkan fleksibilitas smart

trash bin berbasis IoT. Dengan menggabungkan kedua teknologi tersebut, Smart TrashBot memiliki keunggulan dibandingkan tempat sampah pintar statis yang hanya mendukung pemantauan kapasitas atau buka-tutup otomatis.

3. METODOLOGI

Metode Pengembangan

Penelitian ini menggunakan metode prototype dalam pengembangan Smart TrashBot berbasis IoT karena sistem memerlukan proses perancangan, implementasi, dan pengujian secara bertahap (Pressman & Maxim, 2021). Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, analisis kebutuhan sistem, implementasi prototipe, pengujian, dan evaluasi untuk mengembangkan Smart TrashBot dengan fitur gesture recognition, autonomous movement, sensor ultrasonik, dan sistem otomatis berbasis IoT.



Gambar 1. Alur Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah pada tempat sampah konvensional yang masih kurang higienis dan belum otomatis, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur mengenai IoT, robotika bergerak, sensor ultrasonik, gesture recognition, dan komunikasi nirkabel. Selanjutnya dilakukan analisis kebutuhan sistem, perancangan sistem, implementasi prototype melalui perakitan dan pemrograman perangkat, pengujian fungsi sistem seperti sensor, aktuator, navigasi, dan konektivitas, serta evaluasi hasil pengujian sebagai dasar pengembangan lanjutan.

Perancangan Sistem

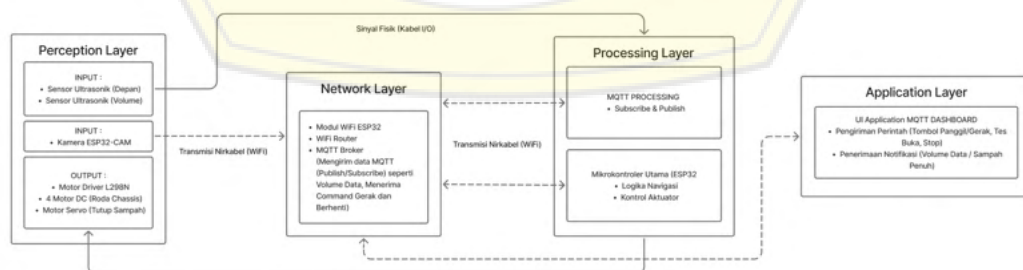
Smart TrashBot dirancang sebagai tempat sampah pintar bergerak yang mengintegrasikan sensor, aktuator, mikrokontroler, dan komunikasi nirkabel. Sistem terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *input*, proses, dan *output*. Bagian *input* meliputi sensor ultrasonik, ESP32-CAM, dan *push button*. Bagian proses dilakukan oleh ESP32 sebagai pusat kendali utama. Bagian *output* terdiri dari motor DC sebagai penggerak robot dan servo motor sebagai

mekanisme buka-tutup penutup tempat sampah.



Gambar 2. Diagram Block

Berdasarkan Gambar 2, sensor ultrasonik digunakan untuk membaca jarak objek dan tingkat kepenuhan tempat sampah. ESP32-CAM digunakan untuk menangkap citra gestur tangan pengguna. Data masukan tersebut diproses oleh ESP32 untuk menentukan respons sistem, seperti menggerakkan robot, menghentikan robot, membuka penutup tempat sampah, atau memberikan indikasi kondisi penuh. Komunikasi sistem dilakukan melalui WiFi atau UART agar proses pengiriman perintah dan pemantauan kondisi perangkat dapat berjalan secara terintegrasi.



Gambar 3. Arsitektur Jaringan IoT Smart TrashBot

Gambar 3 menunjukkan arsitektur IoT Smart TrashBot yang terdiri dari Perception Layer, Network

Layer, Processing Layer, dan Application Layer. Pada Perception Layer, sensor ultrasonik dan

ESP32-CAM digunakan untuk membaca kondisi lingkungan serta gestur pengguna, sedangkan motor DC dan servo berfungsi sebagai aktuator. Data dikirim melalui WiFi dengan protokol MQTT menuju ESP32 untuk diproses sebagai logika navigasi dan kontrol. Hasil pemrosesan ditampilkan pada dashboard MQTT untuk monitoring kondisi tempat sampah dan pengiriman perintah secara real-time.

Alur Kerja Sistem

Alur kerja Smart TrashBot dimulai ketika ESP32 melakukan inisialisasi terhadap sensor, aktuator, dan komunikasi. Setelah sistem aktif, sensor ultrasonik depan membaca jarak objek di sekitar robot. Jika jarak berada pada kondisi aman, robot dapat bergerak maju. Jika objek berada terlalu dekat, robot akan berhenti atau mundur untuk menghindari hambatan. Pada fitur *gesture recognition*, ESP32-CAM menangkap citra tangan pengguna sebagai masukan visual. Mary et al. (2024) menjelaskan bahwa pengenalan gestur tangan dapat dilakukan melalui pengolahan citra dan pendeteksian titik tangan secara *real-time*.

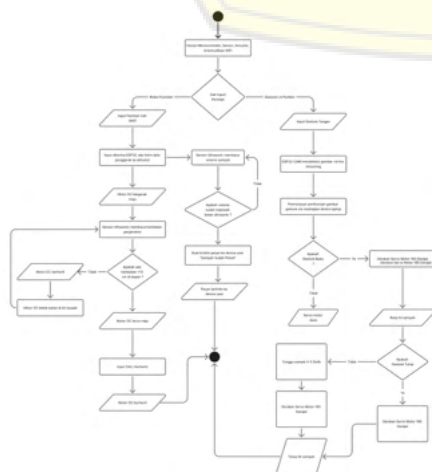
Gambar 4. Alur kerja sistem Smart TrashBot

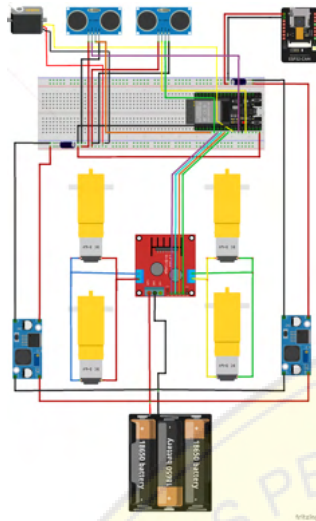
Berdasarkan Gambar 4, gestur tangan yang dikenali akan diproses sebagai perintah untuk membuka penutup tempat sampah menggunakan servo motor, kemudian menutupnya kembali secara otomatis. Sensor ultrasonik bagian dalam digunakan untuk membaca tingkat kepenuhan sampah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Perangkat Keras dan Pemetaan Pin

Perakitan perangkat keras *Smart TrashBot* dibagi menjadi rancangan sasis bagian dalam (mekanis penggerak roda) dan bagian luar (sensor dan interaksi). Penggerak utama menggunakan 4 buah motor DC yang dikendalikan oleh satu unit *motor driver* L298N. Distribusi daya dari baterai utama (11.1V–12.6V) diturunkan menjadi 5V menggunakan dua unit *Step-Down Buck Converter* terpisah guna mengisolasi suplai daya ESP32-CAM agar tidak terganggu oleh *noise* arus motor DC. Realisasi perkabelan fisik antarkomponen di atas *breadboard* ditunjukkan melalui skema Fritzing pada Gambar 5 di bawah ini.





Gambar 5. Skematik Hubungan Fisik Komponen (Wiring Fritzing)

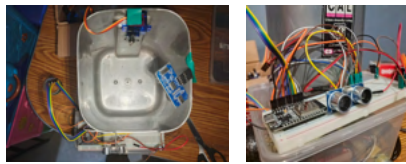
Untuk memastikan setiap komponen terhubung pada pin data yang tepat pada ESP32 Dev Board sesuai dengan baris kode program, detail pemetaan pin disajikan secara terstruktur pada Tabel 1.

No	Nama Komponen	Pin Perangkat	Pin ESP32 Dev Board	Fungsi Fungsional
1	Motor Driver L298N	IN1 / IN2	Pin 32 / Pin 33	Kendali Motor Sisi Kiri
		IN3 / IN4	Pin 25 / Pin 26	Kendali Motor Sisi Kanan
2	Ultrasonik Depan	TRIG / ECHO	Pin 13 / Pin 35	Sensor Jarak Jauh (Anti-Tabrak)
3	Ultrasonik Bak	TRIG / ECHO	Pin 12 / Pin 34	Sensor Volume Kapasitas Sampah
4	Motor Servo	(Sinyal/PWM)	Pin 14	Penggerak Buka-Tutup Mekanis Lid

Tabel 1. Pemetaan Pin Komponen Elektronik terhadap ESP32 Dev Board

Setelah perancangan skematik dan pemetaan pin selesai, seluruh komponen elektronik dirakit dan diintegrasikan ke dalam sasis mekanis. Wujud nyata (hardware) dari purwarupa Smart TrashBot yang telah dirakit secara utuh dan siap untuk diuji fungsionalitasnya ditunjukkan pada Gambar 6.

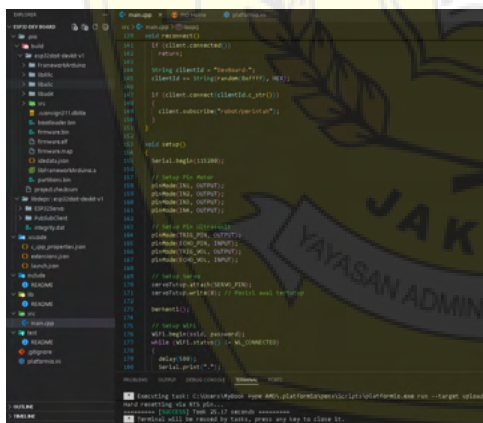




Gambar 6. Wujud Fisik Purwarupa Smart TrashBot (a) Tampak Full Depan, (b) Tampak Atas, (c) Detail Wiring Breadboard

Implementasi Perangkat Lunak

Pemrograman dilakukan menggunakan bahasa C++ VS Code extension Platform IO. Pada sisi ESP32-CAM, program utama mengintegrasikan model inferensi Machine Learning lokal dari platform Edge Impulse (ESP32CAM-GESTURE_AI_inferencing.h). Program diatur



Gambar 7. Tampilan Framework Platform IO di VS Code

Pada sisi ESP32 Dev Board, kode diimplementasikan menggunakan metode non-blocking delay berbasis fungsi millis(). Hal ini memungkinkan robot melakukan navigasi pergerakan roda secara bersamaan sambil mendengarkan (listening) topik MQTT serta mengukur kapasitas bak sampah tanpa mengalami interupsi waktu (freezing).

Pengujian Fitur Gesture Recognition dan Aktuasi Servo

Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi seberapa baik ESP32-CAM mengenali gestur tangan pengguna dan merespons dengan membuka penutup tempat sampah melalui motor servo. Pengujian dilakukan secara *Black Box* dengan memberikan masukan berupa gestur "Buka" di depan kamera, yang hasilnya dirangkum pada Tabel 2

Kondisi Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengamatan di Lapangan	Kesimpulan
Jarak ideal (15-30 cm), pencahayaan cukup	Kamera mengenali gestur (akurasi > 0.70) dan servo terbuka.	Servo berhasil terbuka dan tertutup kembali setelah 4 detik.	BERHASIL
Sudut tangan miring atau pencahayaan redup	Kamera tetap mengenali gestur tangan.	Sistem membutuhkan waktu lebih lama dan posisi tangan harus disesuaikan ulang agar gestur dapat terdeteksi konsisten selama 3 <i>frame</i> .	BERHASIL DENGAN CATATAN

Latar belakang (<i>background</i>) kompleks	Sistem tidak terpicu (<i>false positive</i>).	Servo tidak bergerak secara acak, fitur filter 3 <i>frame</i> bekerja dengan baik.	BERHASIL
---	---	--	----------

Tabel 2. Hasil Pengujian Gesture Recognition dan Servo

Berdasarkan hasil pengujian, fitur gesture recognition dapat berjalan dengan baik namun masih sensitif terhadap posisi tangan dan pencahayaan. Hal ini disebabkan model Machine Learning pada Edge Impulse hanya menggunakan sekitar 300 dataset per kelas, sehingga kemampuan generalisasi model terhadap variasi sudut tangan dan kondisi cahaya masih terbatas. Akibatnya, pengguna perlu memposisikan tangan secara tepat agar nilai confidence threshold > 0,70 dapat tercapai secara konsisten.

Pengujian Navigasi Mandiri (Autonomous Movement) dan Obstacle Avoidance

Pengujian ini dilakukan untuk melihat kemampuan mobilitas robot dalam merespons status CARI_HP (bergerak mencari pengguna) dan menghindari hambatan menggunakan sensor ultrasonik depan dengan batas jarak aman <25 cm

Skenario Hambatan	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengamatan Pergerakan	Kesimpulan
Jalur lurus tanpa hambatan	Robot maju lurus secara konstan.	Robot mampu melaju lurus dengan cukup stabil pada awal pergerakan.	BERHASIL
Terdapat hambatan di depan (< 25 cm)	Robot berhenti, mundur/belok untuk menghindar, lalu maju kembali.	Robot berhasil berhenti dan berputar. Namun, setelah berputar arah, laju lurus robot terkadang mengalami deviasi (sedikit berbelok/mengsong).	BERHASIL DENGAN CATATAN
Terjebak di sudut atau hambatan beruntun	Robot mencari jalan keluar dan kembali maju.	Terkadang robot terjebak dalam pergerakan berputar (berotasi di tempat) jika sensor terus-menerus mendeteksi hambatan dari berbagai sisi.	KURANG OPTIMAL

Tabel 3. Hasil Pengujian Navigasi Anti-Tabrak

Hasil pengujian yang belum sempurna merupakan hal wajar dalam penelitian. Kekurangan sistem, seperti keterbatasan dataset gesture dan pergerakan roda yang kurang stabil, justru menjadi bahan evaluasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Pengujian Deteksi Kapasitas Sampah dan Notifikasi Telemetri

Pengujian ini bertujuan memvalidasi performa sensor ultrasonik internal dalam memantau kapasitas bak sampah setiap interval 5 detik. Ambang batas status penuh diatur pada sisa jarak < 7 cm

Kondisi Fisik Bak	Aksi Notifikasi yang Diharapkan	Hasil Tampilan Dashboard MQTT	Kesimpulan
Sampah belum penuh	Sistem tidak mengirim pesan.	Tidak ada aktivitas pengiriman data pada topik robot/notif.	BERHASIL
Sampah Penuh (< 7 cm)	Mengirim pesan "Penuh! Tolong buang sampahnya." tepat 1 kali.	Pesan peringatan diterima oleh broker MQTT secara <i>real-time</i> tanpa terjadi <i>spamming</i> .	BERHASIL

Tabel 4. Hasil Pengujian Deteksi Volume Sampah

Pembahasan dan Evaluasi Kinerja Keseluruhan

Berdasarkan hasil pengujian, integrasi Edge AI pada ESP32-CAM dan sistem IoT berbasis ESP32 berhasil membentuk prototipe Smart TrashBot yang mampu menjalankan sensor, motor, dan telemetri secara bersamaan menggunakan metode non-blocking millis(). Namun, masih terdapat beberapa kendala, seperti sensitivitas gesture recognition akibat keterbatasan dataset pelatihan serta deviasi arah gerak robot karena sistem kontrol masih bersifat open-loop tanpa sensor encoder. Oleh karena itu, peningkatan jumlah dataset, augmentasi data, serta penggunaan encoder dan kontrol PID direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi dan presisi navigasi robot di masa mendatang.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, Smart TrashBot berbasis IoT berhasil dikembangkan sebagai tempat sampah pintar yang interaktif, otomatis, dan higienis. Sistem mampu menjalankan gesture recognition, navigasi otomatis, serta monitoring

kapasitas sampah secara real-time melalui MQTT. Meskipun masih terdapat keterbatasan pada pencahayaan dan stabilitas pergerakan robot, prototipe telah memenuhi tujuan penelitian dengan baik.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pengampu mata kuliah dan Program Studi Sistem Informasi Universitas Pradita atas arahan, masukan, dan dukungan selama proses pengembangan prototipe Smart TrashBot berbasis *Internet of Things*. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh anggota tim yang telah berkontribusi dalam perancangan, implementasi, dan pengujian sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Aris, M., Danamik, N. F., Purba, K. A., Manalu, D. R., & Saragi, D. P. (2026). *Perancangan dan Implementasi Sistem Smart Waste Bin Berbasis ESP32 dengan Integrasi Multi-Sensor*. 4(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.61722/jssr.v4i2.9492>
- Arthur, M. P., Shoba, S., & Pandey, A. (2024). A survey of smart dustbin systems using the IoT and deep learning.

- Artificial Intelligence Review*, 57(3), 56. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10646-6>
- Dari, U., Ikhwan, M., & Saptari, M. A. (2025). Smart waste bin: Iot-based smart trash bin monitoring system. *Journal of Computer Science, Information Technology and Telecommunication Engineering*, 6(2), 901–907. <https://doi.org/10.30596/jcositte.v6i2.25986>
- Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and implementation of esp32-based iot devices. *Sensors*, 23(15), 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
- Intiadi, P., Sihaloho, G., Dito Prasetyo, A. F., & Wibowo, B. (2026). Development of an iot-based smart waste bin with automated operation and capacity monitoring. *International Journal of Science Education and Cultural Studies*, 4(2), 65–81. <https://doi.org/10.58291/ijsecs.v4i2.379>
- Mary, S. I., Anand, M. S., Manikandan, A. S., & Senthamiluthu, M. (2024). *HAND GESTURE RECOGNITION USING MEDIAPIPE AND OPENCV*. 12. <https://ijcrt.org/papers/IJCRT2402615.pdf>
- Niraimathi, S., Srilaxman, S., & Vishnu, R. M. (2026). *Smart Trash Bin with Autonomous Navigation and IoT Monitoring*. 4(5). <https://ijpub.org/ijvra/papers/IJVRA2605445.pdf>
- Ohemu, M. F., Areji, P., Adeleke, H., Alabi, C., & Adekogba, O. (2025). *Design and Implementation of an IoT-Enhanced Smart Dustbin for Waste Management*. 163–170. https://www.laujet.com/conference/2025/docs/LAUFET_15_2025.pdf
- P., V., S.V., D., & N., V. (2024). Smart dustbin using esp32 for waste management. *IRO Journal on Sustainable Wireless Systems*, 6(4), 309–317. <https://doi.org/10.36548/jsws.2024.4.002>
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2021). *Software engineering: A practitioner's approach* (9th edn). Mc Graw Hill.
- Shashank, V., Kundan, S., & Srijia, A. (2021). *Obstacle avoidance robotic vehicle using HC-SR04 ultrasonic sensor* (Vol. 12). Turkish Journal of Computer and Mathematics Education.
- Sirmayanti, S. (2021). Watering stimulation of allium cepa l plants based on iot through the esp32 microcontroller and mqtt protocol. *JOURNAL OF INFORMATICS AND TELECOMMUNICATION ENGINEERING*, 4(2), 343–354. <https://doi.org/10.31289/jite.v4i2.4456>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global waste management outlook 2024: Beyond an age of waste—Turning rubbish into a resource* [United Nations Environment Programme]. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>
- Vales, V. B., Fernández, O. C., Domínguez-Bolaño, T., Escudero, C. J., & García-Naya, J. A. (2024, January 29). *Fine time measurement for the internet of things: A practical approach using esp32*. arXiv.Org. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3158701d4f>
- Wang, L., Zhu, X., Li, Z., & Li, S. (2024). Ultrasonic obstacle avoidance and full-speed-range hybrid control for intelligent garages. *Sensors*, 24(17), 5694. <https://doi.org/10.3390/s24175694>