



RANCANG BANGUN TONG SAMPAH OTONOM BERBASIS ALGORITMA *LINE FOLLOWER* DAN DETEKSI KAPASITAS PENUH MENGGUNAKAN IOT

Ali Yazid Rahman

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

Email: ar5423275@gmail.com

ABSTRAK

Pengelolaan sampah secara konvensional pada area dalam ruangan (*indoor*) sering kali menghadapi kendala keterlambatan pengangkutan akibat ketergantungan pada proses inspeksi manual. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem tong sampah otonom berbasis line follower menggunakan algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID) serta pemantauan kapasitas isi wadah secara real-time berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 sebagai unit pemroses utama, modul sensor infrared tracking BFD-1000 untuk pembacaan lintasan garis, serta sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur ketinggian tumpukan sampah. Data telemetri kapasitas dikirimkan ke Web Dashboard berbasis Next.js melalui protokol komunikasi *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Hasil pengujian navigasi menunjukkan bahwa penentuan parameter kendali PID optimal pada nilai $K_p=8,0$; $K_i=0,0$; $K_d=3,0$ menghasilkan pergerakan sasis yang stabil, teredam dari osilasi, serta mencapai tingkat keberhasilan navigasi sebesar 100% menyusuri lintasan sepanjang 5 meter. Pengujian sensor ultrasonik yang dilengkapi algoritma median filter menghasilkan tingkat akurasi pengukuran sebesar 98,27% dan akurasi klasifikasi status kapasitas sebesar 100%. Pengujian komunikasi IoT mencatatkan rata-rata latensi transmisi data sebesar 325 ms dengan tingkat packet loss 0,00%. Seluruh pengujian fungsional berbasis Black Box bernilai 100% valid, membuktikan integrasi antara navigasi PID lokal dan telemetri IoT berhasil mewujudkan sistem pengelolaan sampah yang efisien.

Kata Kunci: ESP32; IoT; Line Follower; MQTT; Next.js; Algoritma PID.

ABSTRACT

Conventional indoor waste management often faces collection delays due to reliance on manual inspection processes. This study aims to design and implement an autonomous line-follower trash bin system using the *Proportional-Integral-Derivative* (PID) algorithm alongside real-time container capacity monitoring based on the *Internet of Things* (IoT). The system is built using the ESP32 DevKit V1 microcontroller as the main processing unit, a BFD-1000 infrared tracking sensor module for line trajectory detection, and an HC-SR04 ultrasonic sensor to measure waste stack height. Capacity telemetry data is transmitted to a Next.js-based Web Dashboard via the *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) protocol. Navigation test results indicate that optimal PID control parameters $K_p=8.0$; $K_i=0.0$; $K_d=3.0$ yield stable chassis movement with damped oscillations, achieving a 100% navigation success rate along a 5-meter track. Ultrasonic sensor testing equipped with a median filter algorithm achieved a measurement accuracy of 98.27% and a 100% status classification accuracy. IoT communication testing recorded an average data transmission latency of 325 ms with a 0.00% packet loss rate. All Black Box

functional tests were 100% valid, proving that the integration of local PID navigation and IoT telemetry successfully realizes an efficient smart waste management system.

Keywords: ESP32; IoT; Line Follower; MQTT; Next.js; PID Algorithm.

PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah di Indonesia saat ini menghadapi tantangan yang sangat serius. Berdasarkan data nasional, volume sampah mencapai 34,2 juta ton pada tahun 2024, di mana hanya 59,74% (sekitar 20,4 juta ton) yang terkelola dengan baik, sementara 13,8 juta ton sisanya tidak terkelola. Proyeksi dari Bappenas bahkan menunjukkan lonjakan volume sampah menjadi 63 juta ton pada 2025 dan berpotensi menyentuh 82,2 juta ton pada 2045. Keterbatasan infrastruktur seperti Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang sudah jenuh mengakibatkan penumpukan sampah di tong sampah publik dan area TPS, yang pada gilirannya berdampak negatif terhadap kesehatan masyarakat serta menyebabkan pencemaran lingkungan.

Untuk mengatasi keterlambatan pengangkutan akibat sistem inspeksi manual, diperlukan solusi inovatif berbasis teknologi informasi. Penelitian sebelumnya telah memperkenalkan konsep Smart Trash atau tempat sampah pintar berbasis *Internet of Things* (IoT). Damayanti & Noer (2025) mengembangkan sistem tempat sampah yang dapat membuka-tutup otomatis dan memonitor kapasitas via Telegram. Setiawan et al. (2025) merancang tempat sampah pemilah organik dan anorganik, sementara penelitian lain menggunakan logika Fuzzy untuk mendeteksi kandungan gas amonia pada sampah.

Meskipun sistem pemantauan telah banyak diteliti, mayoritas penelitian terdahulu masih berfokus pada tong sampah statis (diam di tempat) yang mengharuskan petugas kebersihan tetap mendatangi setiap titik lokasi secara manual. Belum banyak tersedia instrumen portabel spesifik berupa tong sampah yang dapat bergerak secara otonom di lingkungan kebersihan. Di sisi lain, riset mengenai robot line follower untuk memindahkan barang telah terbukti efisien dalam industri, namun jarang diintegrasikan ke dalam ekosistem pengelolaan limbah terpadu yang dipantau melalui web dashboard.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem tong sampah otonom yang dapat bergerak secara mandiri mengikuti jalur menggunakan sensor Infrared Tracking (Line Follower) dengan kendali algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Sistem ini diintegrasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk memantau kapasitas penuh secara real-time menggunakan sensor ultrasonik. Ketika tong sampah mencapai kapasitas penuh, sistem dirancang untuk mengirimkan notifikasi data telemetry ke server MQTT sekaligus menginstruksikan robot untuk kembali ke stasiun perhentian (docking) secara otomatis.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan model pengembangan Rancang Bangun (*Research and Development*), yaitu metode yang bertujuan merancang, membuat, dan menguji suatu sistem. Pendekatan eksperimental diterapkan

melalui empat tahapan utama: (1) Analisis Kebutuhan, (2) Perancangan Cepat & Pemodelan, (3) Pembangunan Prototipe, dan (4) Evaluasi & Perbaikan.

Kebutuhan Perangkat Keras dan Lunak

Unit pemrosesan utama menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 karena memiliki prosesor dual-core 32-bit Xtensa LX6 (240 MHz) yang sangat memadai untuk menjalankan sistem multi-sensor secara multitasking. Sensor Line Follower yang digunakan adalah modul BFD-1000 yang berisi lima kanal pemancar dan penerima inframerah (IR). Pengukuran volume sampah mengandalkan sensor ultrasonik HC-SR04. Untuk pergerakan, digunakan driver motor L298N guna mengendalikan dua unit motor DC gearbox (rasio 1:48). Sistem ini ditenagai oleh baterai Li-Ion 18650 (7.4V) yang distabilkan oleh buck converter DC-to-DC LM2596. Perangkat lunak dikembangkan melalui Arduino IDE dengan pustaka penunjang seperti WiFi.h dan PubSubClient.h.

Table 1 Kebutuhan Komponen Perangkat Keras Utama

Komponen	Spesifikasi Teknis	Fungsi Utama
ESP32 DevKit V1	Dual-core 240 MHz, WiFi/BT	Mikrokontroler utama sistem
Modul BFD-1000	3.3V-5V DC, IR 940 nm	Melacak garis hitam/putih
HC-SR04	5V DC, Range 2-450cm, 40kHz	Mengukur kapasitas sampah
Driver L298N	Dual H-Bridge, 5V-35V DC	Mengendalikan motor DC
Motor DC Gearbox	3V-6V, Rasio 1:48	Menggerakkan roda sasis

Perancangan Sistem dan Algoritma

Perancangan arsitektur berfokus pada sistem kendali tertutup (*closed-loop control*). Deteksi kapasitas dikalkulasi menggunakan rumus kecepatan gelombang suara di udara (340 m/s):

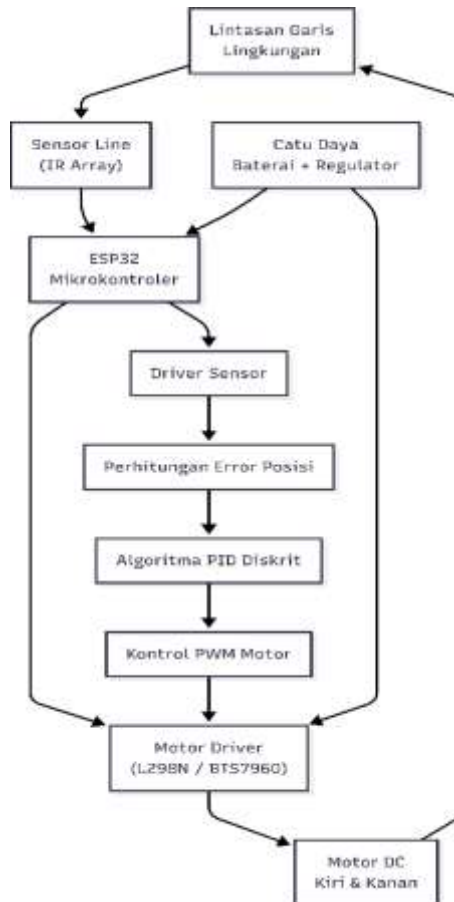
$$\text{Jarak (cm)} = \frac{\text{Waktu } (\mu\text{S}) * 0.034}{2}$$

Untuk pergerakan otonom, algoritma PID diimplementasikan menggunakan pendekatan diskrit di dalam ESP32. Pembacaan error sensor dihitung berdasarkan seberapa jauh sasis melenceng dari garis hitam, lalu diproses menjadi sinyal koreksi Pulse Width Modulation (PWM) dengan persamaan:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \sum e(k) \cdot T_s + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s}$$

Dimana K_p merespons error saat ini, K_i mengoreksi error yang terakumulasi, dan K_d memprediksi dan meredam laju perubahan error.

Gambar 1 Diagram Blok Arsitektur Sistem Robot Line Follower Berbasis



IoT - Ilustrasi yang menggambarkan aliran sensor IR dan Catu Daya menuju ESP32, diproses melalui PID ke driver motor, dan komunikasi nirkabel ke Dashboard)

Desain Komunikasi Data Telemetri

Data kapasitas dan status robot dikirimkan secara nirkabel menggunakan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Protokol ini sangat ringan dengan arsitektur publish-subscribe, menggunakan Quality of Service (QoS) Level 1 untuk menjamin data hasil pengukuran dari ESP32 terkirim ke platform dashboard Next.js tanpa kegagalan di tengah fluktuasi jaringan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Perangkat Keras dan Lunak

Prototipe fisik dibangun di atas sasis mobile robot differential drive yang membawa wadah tempat sampah berukuran tinggi 18 cm dan diameter 17,5 cm. Mikrokontroler ESP32 membagi beban komputasi di mana Core 1 difokuskan untuk mengeksekusi perhitungan matematis PID pada frekuensi 50 Hz (interval 20 ms), sedangkan Core 0 menangani protokol jaringan Wi-Fi dan komunikasi MQTT. Sensor ultrasonik dipasang di bawah tutup wadah. Untuk mencegah kerusakan pin ESP32 akibat tegangan 5V dari echo HC-SR04, dipasang rangkaian pembagi tegangan (kombinasi resistor 1 k Ω dan 2 k Ω) untuk menurunkannya menjadi 3,3V. Arsitektur program menggunakan

fungsi non-blocking millis() agar manuver roda tidak terhenti saat ESP32 sedang mentransmisikan data ke cloud.



Gambar 1 Implementasi Fisik Prototipe Robot Line Follower –

Gambar diatas Menampilkan sasis mekanik, baterai di bagian punggung, ESP32, penempatan sensor BFD-1000 dengan clearance 1,5 cm, dan HC-SR04 di dalam tutup.

Hasil Kalibrasi dan Pengujian Sensor Ultrasonik

Pengujian keandalan klasifikasi volume dilakukan menggunakan sampel sampah nyata. Algoritma median filter disematkan untuk menyaring anomali pembacaan akibat pantulan gelombang specular dari sampah bersudut miring.

Table 2 Hasil Kalibrasi Pengukuran Sensor HC-SR04

Jarak Aktual (cm)	Pembacaan Sensor (cm)	Error Selisih (cm)	Keterangan Status
16,0	15,9	0,1	Kosong
12,0	11,8	0,2	Setengah
8,0	7,9	0,1	Setengah
4,0	3,9	0,1	Penuh
2,0	2,1	0,1	Penuh

Dari pengujian di atas, selisih eror pembacaan sensor sangat kecil, yakni rata-rata 0,11 cm, menghasilkan persentase akurasi hingga 98,27%. Transisi status kapasitas diklasifikasikan dengan akurat 100%: Jarak >12 cm (Kosong), 5-12 cm (Setengah), dan ≤ 4 cm (Penuh).

Hasil Pengujian Navigasi Algoritma PID

Pengujian pergerakan (Line Follower) dilakukan di lintasan sepanjang 5 meter dengan berbagai variasi tikungan. Pencarian konstanta PID yang optimal ditunjukkan pada Tabel 3.

Table 3 Pengujian Kinerja Navigasi Berdasarkan Parameter PID

Parameter PID (Kp, Ki, Kd)	Waktu Tempuh (detik)	Jumlah Terlepas	Akurasi Navigasi
----------------------------	----------------------	-----------------	------------------

Kp=2,0; Ki=0,0; Kd=0,0	18,4	4 kali	60,0%
Kp=5,0; Ki=0,1; Kd=1,0	14,1	1 kali	90,0%
Kp=8,0; Ki=0,0; Kd=3,0	12,6	0 kali	100,0%
Kp=12,0; Ki=0,5; Kd=5,0	11,8	3 kali	70,0%

Hasil eksperimen membuktikan bahwa parameter Kp=8,0; Ki=0,0; Kd=3,0 adalah konfigurasi paling stabil. Kp sebesar 8,0 memberi respons kemudi cepat. Penambahan Kd sebesar 3,0 bertindak sebagai peredam dinamis (dynamic damper) yang mencegah overshoot ketika sasis melintasi belokan 90 derajat. Penggunaan Ki yang besar justru menyebabkan akumulasi eror masa lalu yang memicu fenomena bergetar (hunting phenomenon).

Hasil Pengujian Sistem IoT dan Dashboard

Transmisi data diukur berdasarkan latensi (waktu tempuh) antara pemecuan data di ESP32 hingga tampil di Web Dashboard Next.js.

Table 4 Latensi Transmisi Telemetry Berdasarkan Kuat Sinyal Wi-Fi

Jarak Wi-Fi / Sinyal (RSSI)	Latensi Dashboard (ms)	Packet Loss (%)	Pembaruan Visual
Sinyal Kuat (-48 dBm)	240 ms	0,00%	Real-Time / Lancar
Sinyal Sedang (-68 dBm)	410 ms	0,00%	Real-Time / Lancar
Sinyal Lemah (-82 dBm)	980 ms	0,69%	Stabil

Dashboard web terbukti mampu memvisualisasikan data kapasitas dan status koneksi secara interaktif menggunakan WebSockets. Rata-rata latensi tercatat 325 ms pada kondisi normal tanpa packet loss.



Gambar 4 Tampilan Dashboard Monitoring Next.js – Menampilkan gauge chart jarak HC-SR04, indikator status Kosong/Setengah/Penuh, grafik PID error, dan status online IoT)

Analisis Kinerja Keseluruhan (Black Box Testing)

Pengujian fungsional sistem secara keseluruhan (Black Box) mencatatkan keberhasilan 100%. Ketika kapasitas terdeteksi penuh (≤ 4 cm), sistem berhasil mengirim data ke dashboard, merubah antarmuka visual menjadi indikator merah, dan secara otomatis mengubah status navigasi robot untuk berhenti mencari sampah dan berbelok mengikuti jalur pulang menuju stasiun (docking). Sistem juga memperlihatkan self-healing yang baik, di mana pemutusan sinyal internet tidak membuat robot crash, melainkan tetap bernavigasi dan mengirim antrean data saat sinyal pulih.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pengangkutan sampah otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) berhasil dikembangkan dengan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32, sensor inframerah BFD-1000, sensor ultrasonik HC-SR04, algoritma kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID), serta protokol komunikasi MQTT. Pada aspek navigasi, penerapan algoritma PID diskrit dengan parameter $K_p = 8,0$, $K_i = 0,0$, dan $K_d = 3,0$ mampu menjaga kestabilan pergerakan robot dalam mengikuti garis pandu dan menyelesaikan lintasan sepanjang 5 meter dengan tingkat keberhasilan 100%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi perangkat keras dan algoritma kendali yang diterapkan mampu mendukung navigasi robot secara otonom sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan.

Pada aspek deteksi volume sampah, penggunaan sensor ultrasonik HC-SR04 yang dikombinasikan dengan algoritma *median filter* menghasilkan tingkat ketepatan pengukuran jarak sebesar 98,27% dengan margin kesalahan sebesar 0,11 cm. Sistem juga mampu mengklasifikasikan kondisi tempat sampah ke dalam kategori kosong, setengah penuh, dan penuh dengan tingkat akurasi 100% berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan. Sementara itu, integrasi sistem telemetri menggunakan protokol MQTT dengan QoS Level 1 dan *web dashboard* berbasis Next.js menghasilkan latensi komunikasi rata-rata sebesar 325 ms tanpa kehilangan paket selama pengujian. Integrasi tersebut memungkinkan sistem mengirimkan notifikasi ketika tempat sampah mencapai kapasitas penuh dan menginstruksikan robot untuk kembali secara mandiri ke area *docking*. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan berpotensi meningkatkan efisiensi pemantauan dan pengangkutan sampah serta mengurangi ketergantungan pada pemeriksaan secara manual.

Meskipun demikian, pengembangan lebih lanjut masih diperlukan untuk meningkatkan kemampuan adaptasi robot terhadap kondisi lingkungan yang dinamis. Penelitian selanjutnya dapat mengintegrasikan sensor LiDAR atau sensor ultrasonik pada bagian depan robot untuk mendukung mekanisme *obstacle avoidance*, sehingga robot mampu mendeteksi dan menghindari hambatan di luar garis pandu. Selain itu, penambahan mekanisme pembuangan sampah otomatis (*auto-dumping*) dapat dipertimbangkan untuk menyempurnakan proses pengangkutan, mulai dari deteksi kapasitas tempat sampah, navigasi menuju lokasi tujuan, hingga pengosongan sampah secara otomatis. Pengembangan tersebut

diharapkan dapat meningkatkan kemandirian operasional dan keandalan sistem dalam penerapan di lingkungan nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar Ismail, M., Abdullah, R. K., & Abdussamad, S. (2021). [Judul artikel belum tersedia]. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3, 7.
- Damayanti, S., & Noer, Z. M. (2025). Smart dustbin berbasis *Internet of Things* (IoT) sistem informasi menggunakan Telegram. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 5(1), 451–462. <https://doi.org/10.57152/malcom.v5i1.1754>
- Febriantono, M. A., Pramono, A., & Maulana, F. I. (2023). Developing smart trash management system using IoT and machine learning. In *2023 International Conference on Information Technology Research and Innovation (ICITRI 2023)*. <https://doi.org/10.1109/ICITRI59340.2023.10250025>
- Jawaz, I., Primasuri Anbiya, M., Aiman Fathin, M., Nugroho Wicaksono, H. A., Veriska, V., & Hidayat, R. (2025). Desain integrasi IoT pada robot line follower sebagai konsep awal efisiensi pemindahan barang. *Jurnal Komputer dan Elektro Sains*, 3(2), 18–23. <https://doi.org/10.58291/komets.v3i2.157>
- Kalbuadi, F. A., & Djatmiko, M. D. (n.d.). *Tempat sampah Eco dengan konsep Internet of Things untuk workspace dalam kondisi lockdown*.
- M. A. (2025). Design & implementation of ESP32-CAM based line follower robot with fuzzy logic for intelligent navigation. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3.6874>
- Prasetyo, P., Maulana, R., & Setiawan, E. (2022). *Sistem kontrol PID pada purwarupa robot pembawa barang berbasis line follower menggunakan algoritma path planning* (Vol. 6, No. 8). <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Setiawan, A., Pernando, Y., & Verdian, I. (2025). Smart trash can berbasis IoT dan mikrokontroler: Solusi cerdas untuk pengelolaan sampah. *Journal of Digital Ecosystem for Natural Sustainability*, 5(1), 22–28. <https://doi.org/10.63643/jodens.v5i1.295>