

PEMANFAATAN PANEL SURYA PADA SISTEM MONITORING TEMPAT SAMPAH PINTAR MENGGUNAKAN METODE FUZZY LOGIC BERBASIS IOT

Nuraisyah, Heliawati Hamrul, Musawwir

Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat, Sulawesi Barat
Jl. Prof. Dr. Baharuddin Lopa, SH, Talumung, Banggae Timur, Kabupaten Majene, Sulawesi Barat 91412
nusyah.12@gmail.com

ABSTRAK

Pengelolaan sampah secara manual sering menimbulkan kendala dalam menjaga kebersihan lingkungan, seperti penumpukan sampah, keterlambatan pengosongan, dan munculnya bau tidak sedap akibat kurangnya pemantauan. Penelitian ini mengembangkan sistem tempat sampah pintar berbasis Internet of Things (IoT) dengan logika fuzzy berbasis interval serta dukungan panel surya agar dapat beroperasi secara mandiri. Sistem menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi volume sampah dan sensor MQ-135 untuk mengukur konsentrasi gas amonia sebagai indikator bau. Data dari kedua sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan algoritma logika fuzzy untuk mengklasifikasikan kondisi tempat sampah ke dalam kategori Kosong, Sedang, Penuh, atau Berbahaya. Informasi status kemudian dikirimkan secara otomatis kepada pengguna melalui aplikasi Telegram sebagai notifikasi waktu nyata. Hasil pengujian menunjukkan panel surya mampu menyuplai daya optimal saat cuaca cerah, dengan penurunan kinerja saat berawan atau hujan. Sensor ultrasonik memiliki rata-rata kesalahan 0,14 cm, sedangkan sistem fuzzy mencapai akurasi 80% dibandingkan pengukuran manual. Fitur notifikasi Telegram berhasil 100% dengan waktu kirim rata-rata 3–5 menit. Sistem ini meningkatkan efisiensi pemantauan limbah dan mendukung pengelolaan berbasis teknologi yang berkelanjutan.

Kata kunci : *IoT, Panel Surya, Sensor Ultrasonik, MQ-135, Telegram.*

1. PENDAHULUAN

Sampah merupakan sisa aktivitas manusia yang tidak lagi digunakan dan dapat menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Penumpukan sampah tidak hanya mengganggu estetika, tetapi juga berpotensi menjadi sumber penyakit dan pencemaran lingkungan [21]. Permasalahan pengelolaan sampah masih menjadi isu serius di berbagai wilayah Indonesia, terutama akibat rendahnya kesadaran masyarakat dalam memilah sampah, keterbatasan sarana penampungan, serta sistem pengangkutan yang belum terjadwal secara efisien [23].

Di wilayah perkotaan, peningkatan jumlah penduduk turut memperparah permasalahan ini. Sistem pemantauan tempat sampah yang masih dilakukan secara manual dinilai kurang efisien karena memerlukan waktu dan tenaga yang besar, serta tidak mampu memberikan informasi kapasitas secara real-time [24]. Kondisi tersebut menyebabkan tempat penampungan sementara (TPS) sering kali penuh sebelum jadwal pengangkutan tiba.

Penerapan Internet of Things (IoT) menjadi salah satu solusi strategis dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah. Teknologi IoT memungkinkan perangkat terhubung melalui jaringan internet untuk mengumpulkan dan mengirimkan data secara real-time [20]. Dalam konteks ini, sistem tempat sampah pintar dapat memantau volume sampah, mendeteksi waktu pengosongan yang optimal, serta mengurangi ketergantungan pada proses manual [22].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem tempat sampah pintar

berbasis IoT dengan berbagai pendekatan. [21][25]. menerapkan metode Fuzzy Logic untuk meningkatkan akurasi pengambilan keputusan. [24] juga mengembangkan sistem monitoring real-time berbasis IoT dengan tingkat akurasi yang tinggi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih bergantung pada sumber listrik konvensional dan belum mengintegrasikan aspek keberlanjutan energi secara optimal. Selain itu, sistem notifikasi kepada pengguna serta efisiensi komputasi pada perangkat dengan sumber daya terbatas masih menjadi tantangan.

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat kebutuhan akan sistem tempat sampah pintar yang mampu melakukan monitoring secara real-time, memiliki mekanisme pengambilan keputusan otomatis yang stabil, serta dapat beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional.

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan sistem tempat sampah pintar berbasis IoT yang dilengkapi sumber energi mandiri menggunakan panel surya serta metode pengambilan keputusan berbasis fuzzy interval yang disederhanakan. Pendekatan ini dirancang untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi komputasi pada mikrokontroler dengan sumber daya terbatas. Selain itu, sistem diintegrasikan dengan notifikasi real-time berbasis Telegram untuk memberikan informasi kondisi tempat sampah secara langsung kepada pengguna.

Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah, mendukung penerapan teknologi ramah lingkungan, serta memberikan solusi yang lebih berkelanjutan baik di wilayah perkotaan maupun pedesaan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sensor HC-SR04

Menurut ElecFreaks (2018), HC-SR04 merupakan sensor ultrasonik yang digunakan untuk mengukur jarak antara penghalang atau objek dengan sensornya. HC-SR04 terdiri dari 2 komponen utama sebagai penyusunan, yakni ultrasonik transmitter dan ultrasonik receiver. Waktu tempuh gelombang ultrasonik dari pemancar hingga sampai ke penerima sebanding dengan 2 kali jarak antara sensor dan bidang pantul. Sensor ultrasonik HC-SR04 bekerja dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk mengukur jarak objek dan banyak digunakan dalam sistem monitoring ketinggian sampah [16].



Gambar 1. Sensor HC-SR04

2.2. Sensor Gas MQ-135

Salah satu jenis sensor gas yang sering digunakan untuk mendeteksi kualitas udara dan gas berbahaya di lingkungan adalah sensor MQ-135. Pada sistem monitoring tempat sampah pintar, sensor MQ-135 digunakan untuk melihat deteksi tingkat konsumsi gas. Sensor MQ-135 mampu mendeteksi gas berbahaya dan kualitas udara sehingga sering dimanfaatkan dalam sistem monitoring lingkungan berbasis mikrokontroler [5].



Gambar 2. Sensor Gas MQ-135

2.3. Motor Servo

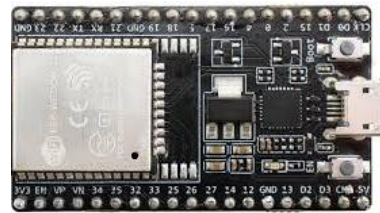
Motor servo merupakan aktuator elektromekanis yang dirancang untuk menghasilkan pengendalian posisi, kecepatan, dan sudut putar secara presisi melalui mekanisme umpan balik tertutup (*closed-loop control*). Motor servo digunakan sebagai aktuator karena kemampuannya dalam mengatur posisi sudut secara presisi, terutama pada sistem otomatis berbasis mikrokontroler [6].



Gambar 3. Motor Servo

2.4. Mikrokontroler ESP-32

Mikrokontroler ESP32, berbasis teknologi System on Chip (SoC), memiliki kemampuan Wi-Fi dan Bluetooth bawaan. Dilengkapi dengan prosesor dual-core, memori flash, ADC, PWM, dan komponen GPIO, ESP32 juga mendukung protokol komunikasi I²C, UART, dan SPI, yang memfasilitasi sinkronisasi berbagai sensor dan aktuator ke dalam sistem [14]. ESP32 banyak digunakan dalam pengembangan sistem IoT karena memiliki kemampuan pemrosesan yang baik, konektivitas WiFi, serta konsumsi daya yang relatif rendah [4].



Gambar 4. Mikrokontroler ESP-32

2.5. Panel Surya

Panel surya, juga dikenal sebagai fotovoltaik (PV), memainkan peran penting dalam mengubah sinar matahari menjadi listrik melalui efek fotovoltaik [15]. Dalam konteks penelitian ini, panel surya dipilih sebagai sumber energi utama untuk memberi daya pada mikrokontroler ESP32 dan komponen elektronik lainnya, sehingga sistem dapat berfungsi terus menerus tanpa bergantung pada jaringan listrik PLN. Panel surya dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung sistem IoT yang bersifat mandiri dan ramah lingkungan [11].



Gambar 5. Panel surya

2.6. Solar Charger Kontroller

Pengontrol pengisi daya surya adalah perangkat elektronik yang dirancang untuk mengontrol aliran energi dari panel surya ke baterai, memastikan pengisian daya yang aman dan efisien. Perangkat ini memainkan peran penting dalam mencegah berbagai masalah seperti pengisian daya berlebih, tegangan berlebih, tegangan kurang, dan arus balik, yang pada akhirnya membantu memperpanjang umur baterai [19].



Gambar 6. Solar charger

2.7. Fuzzy Logic Interval

Logika Fuzzy merupakan metode pengambilan keputusan yang dirancang untuk menangani data yang bersifat tidak pasti dan ambigu dengan menggunakan variabel linguistik. Proses pengambilan keputusan pada fuzzy berbasis interval dilakukan dengan membandingkan nilai input sensor terhadap batas interval yang telah ditentukan. Berbeda dengan fuzzy Mamdani yang memungkinkan satu nilai memiliki beberapa derajat keanggotaan, pendekatan ini hanya menetapkan satu kategori linguistik dominan untuk setiap nilai input. Pendekatan fuzzy berbasis interval ini dinilai efektif untuk sistem IoT berbasis mikrokontroler karena mampu mengurangi kompleksitas perhitungan, mempercepat waktu respon sistem, serta meminimalkan fluktuasi keputusan akibat noise pada data sensor. Pendekatan fuzzy logic digunakan untuk membantu pengambilan keputusan pada sistem dengan data yang bersifat tidak pasti, khususnya pada aplikasi real-time berbasis sensor [18].

2.8. Telegram

Telegram, sebagai platform pesan instan berbasis cloud, memfasilitasi komunikasi langsung dan dapat diintegrasikan dengan sistem otomatis melalui Internet of Things (IoT). Berkat bot Telegram, petugas kebersihan dapat secara otomatis menerima informasi tentang status seperti "Kosong," "Sedang," atau bahkan "Penuh atau Bahaya," yang pada akhirnya mempercepat pengosongan sampah dan meningkatkan efektivitas pemantauan secara keseluruhan. Penggunaan Telegram Bot API memungkinkan pengiriman notifikasi secara real-time pada sistem IoT dengan biaya rendah dan implementasi yang relatif [9].

2.9. Kajian Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem tempat sampah pintar berbasis Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan

efisiensi pengelolaan sampah. Herlambang et al. mengimplementasikan sensor ultrasonik dan metode Fuzzy Logic untuk mendeteksi kondisi tempat sampah secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan sistem mampu mendeteksi volume sampah dengan baik, namun masih bergantung pada sumber listrik konvensional.

Ma'arif et al. mengembangkan sistem monitoring tempat sampah berbasis IoT dengan metode fuzzy logic yang mampu meningkatkan akurasi penentuan status sampah. Meskipun demikian, sistem tersebut belum mengintegrasikan sumber energi mandiri serta belum melakukan monitoring kualitas udara.

Santika et al. menerapkan metode Fuzzy Logic yang terintegrasi dengan sistem cloud untuk meningkatkan akurasi pengambilan keputusan. Namun, pendekatan tersebut masih menggunakan metode fuzzy konvensional dengan kompleksitas komputasi yang relatif tinggi untuk perangkat mikrokontroler.

Dari beberapa penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar sistem telah memanfaatkan IoT dan metode fuzzy dalam monitoring tempat sampah. Namun, masih terdapat keterbatasan pada aspek keberlanjutan energi dan efisiensi komputasi pada perangkat berbasis mikrokontroler.

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini mengusulkan sistem tempat sampah pintar berbasis IoT dengan integrasi panel surya sebagai sumber energi mandiri serta pendekatan fuzzy berbasis interval yang lebih ringan dan sesuai untuk implementasi pada mikrokontroler ESP32.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan perancangan dan implementasi sistem tempat sampah pintar berbasis Internet of Things (IoT). Sistem dirancang untuk melakukan monitoring kondisi tempat sampah secara real-time berdasarkan parameter ketinggian sampah dan kualitas udara, serta dilengkapi mekanisme pembukaan tutup otomatis.

3.1. Arsitektur Sistem

Sistem terdiri dari empat bagian utama, yaitu input, proses, aktuator, dan output. Input System.

a. Input System

Input diperoleh dari:

- Sensor Ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur jarak antara permukaan sampah dan sensor. Nilai jarak dikonversi menjadi persentase volume sampah.
- Sensor Gas MQ-135 untuk mendeteksi kadar gas yang dihasilkan dari proses pembusukan sampah.

b. Processing System

Data dari sensor diproses menggunakan mikrokontroler ESP32 yang memiliki fitur WiFi terintegrasi. Pemrosesan data menggunakan

metode fuzzy berbasis interval dengan dua variabel input (tinggi sampah dan kadar gas).

Masing-masing variabel dibagi menjadi tiga himpunan keanggotaan:

- Rendah
- Sedang
- Tinggi

Hasil kombinasi rule menentukan status tempat sampah: Kosong, Sedang, atau Penuh.

c. Actuator System

Sistem dilengkapi motor servo sebagai aktuator untuk membuka dan menutup tutup tempat sampah secara otomatis. Mekanisme pembukaan tutup diaktifkan berdasarkan deteksi keberadaan objek pengguna menggunakan sensor ultrasonik.

Sensor ultrasonik mendeteksi objek dalam jarak tertentu ≤ 10 cm. Ketika objek terdeteksi dalam batas jarak tersebut, ESP32 mengirimkan sinyal PWM ke motor servo untuk memutar sudut tertentu 90° sehingga tutup terbuka. Setelah objek sudah berpindah maka, servo kembali ke posisi awal untuk menutup kembali tutup tempat sampah.

Logika ini dirancang untuk:

- Mengurangi kontak langsung dengan tutup tempat sampah
- Meningkatkan higienitas
- Menghemat energi karena servo hanya aktif saat diperlukan

Sistem deteksi objek ini bekerja independen dari sistem fuzzy, sehingga fungsi pembukaan tutup tetap berjalan meskipun status tempat sampah berada dalam kondisi kosong, sedang, maupun penuh.

d. Output System

Output sistem berupa:

- Notifikasi status tempat sampah melalui Telegram
- Indikator kondisi sistem

3.2. Sistem Catu Daya

Untuk mendukung konsep ramah lingkungan, sistem menggunakan panel surya sebagai sumber energi utama yang terhubung ke modul charging dan baterai. Energi yang tersimpan digunakan untuk menyuplai daya ke ESP32, sensor, dan motor servo.

3.3. Pengujian Sistem

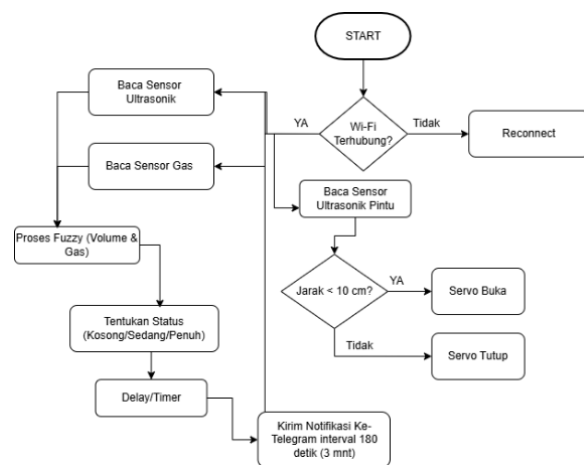
Pengujian dilakukan dengan beberapa skenario variasi volume sampah dan kadar gas. Parameter yang diuji meliputi:

- Akurasi pembacaan sensor
- Respons motor servo
- Konsistensi keputusan fuzzy
- Kecepatan pengiriman notifikasi
- Stabilitas daya berbasis panel surya

3.4. Flowchart System

Pada alur kerja sistem, proses diawali dengan inisialisasi perangkat serta koneksi WiFi. Setelah terhubung, mikrokontroler membaca dua sensor

ultrasonik, yaitu sensor pada tutup untuk mendeteksi keberadaan objek pengguna, serta sensor kedua yang mengukur jarak permukaan sampah untuk menghitung tinggi sampah menggunakan rumus tinggi tong dikurangi jarak sensor. Selanjutnya, sensor MQ-135 membaca nilai konsentrasi gas. Data tersebut dianalisis menggunakan logika fuzzy untuk menentukan status level sampah (kosong, sedang, penuh, atau sangat penuh) dan status gas (normal, waspada, atau bahaya). Sistem juga menggerakkan servo secara otomatis apabila jarak pengguna kurang dari 10 cm. Hasil akhir dikirimkan ke Telegram setiap interval waktu 180 detik/ 3 menit. Jika koneksi WiFi terputus, sistem akan melakukan reconnect secara otomatis.



Gambar 7. Flowchart system

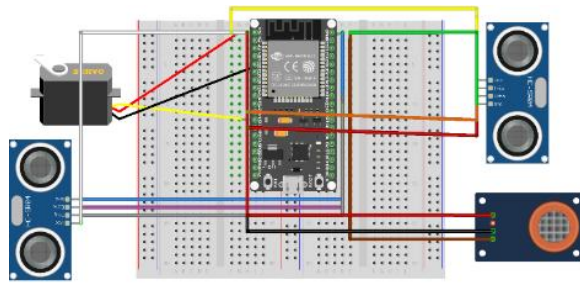
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini membahas hasil pengujian sistem tempat sampah pintar berbasis IoT menggunakan panel surya sebagai sumber energi utama dan metode Fuzzy Logic sebagai sistem pengambilan keputusan. Pengujian dilakukan untuk memastikan fungsi sensor, mikrokontroler, aktuator, sistem logika fuzzy, serta kemampuan sistem dalam mengirimkan notifikasi melalui Telegram.

4.1. Implementasi Sistem Perangkat

Implementasi sistem dilakukan dengan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32, sensor ultrasonik, sensor gas MQ-135, motor servo, serta modul komunikasi Wi-Fi. Seluruh komponen dirangkai sesuai dengan perancangan sistem yang telah dijelaskan pada bagian metode penelitian. ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama yang mengolah data sensor dan mengirimkan informasi kondisi tempat sampah ke pengguna melalui Telegram Bot secara real-time. Sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi jarak objek pada pintu tempat sampah dan ketinggian sampah di dalam tong. Motor servo berfungsi sebagai aktuator untuk membuka dan menutup tutup tempat sampah secara otomatis berdasarkan jarak objek yang terdeteksi. Sensor gas MQ-135 digunakan untuk mendeteksi tingkat gas yang

dihasilkan oleh sampah. Implementasi perangkat keras ini bertujuan untuk merealisasikan sistem monitoring tempat sampah pintar berbasis IoT.



Gambar 7. Skema Sistem Perangkat

4.2. Dokumentasi Prototipe Sistem

Dokumentasi prototipe sistem disajikan untuk menunjukkan realisasi fisik dari sistem tempat sampah pintar berbasis Internet of Things yang telah dirancang. Prototipe terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, sensor ultrasonik untuk mendeteksi jarak dan ketinggian sampah, sensor gas MQ-135 untuk mendeteksi kualitas udara, motor servo sebagai aktuator pembuka dan penutup tutup tempat sampah, serta modul komunikasi Wi-Fi untuk pengiriman data ke Telegram Bot.



Gambar 8. Prototipe Tempat Sampah Pintar

Pada gambar 8 menunjukkan tampilan keseluruhan prototipe sistem yang telah dirakit dan diuji. Seluruh komponen dipasang pada wadah tempat sampah dengan mempertimbangkan efisiensi ruang dan kemudahan perawatan. Sensor ultrasonik diposisikan pada bagian dalam penutup tempat sampah untuk mendeteksi ketinggian sampah, sedangkan sensor ultrasonik yang berada pada bagian depan tempat sampah digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek di depan tempat sampah, dan motor servo yang berada dibagian atas penutup tempat sampah dapat membuka secara otomatis ketika objek terdeteksi pada jarak tertentu.

4.3. Pengujian Sensor Ultrasonik

Pengujian sensor ultrasonik dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan keandalan sensor dalam mendeteksi jarak objek serta ketinggian sampah pada tempat sampah pintar. Sensor ultrasonik digunakan pada dua fungsi utama, yaitu sebagai pendeteksi keberadaan objek di depan pintu tempat sampah dan sebagai pengukur ketinggian sampah di dalam wadah. Data hasil pengujian sensor ultrasonik disajikan dalam Tabel 2.

Tabel.2 pengujian sensor Ultrasonik

No	Jarak Aktual (cm)	Pembacaan Sensor (cm)	Selisih (cm)
1	5	5.2	0.2
2	10	10.1	0.1
3	15	15.2	0.2
4	20	20.1	0.2
5	30	30.1	0.1
6	35	35.2	0.2
7	40	40.1	0.1

Berdasarkan Tabel 2, hasil pengujian sensor ultrasonik menunjukkan bahwa pembacaan jarak sensor mendekati nilai jarak aktual. Selisih pengukuran relatif kecil dan masih berada dalam batas toleransi pengukuran sensor. Hal ini menunjukkan bahwa sensor ultrasonik memiliki tingkat akurasi yang baik dan layak digunakan sebagai pendeteksi ketinggian sampah pada sistem tempat sampah pintar berbasis Internet of Things.

4.4. Pengujian Sensor MQ-135

Tabel 1. pengujian sensor MQ-135

No	Kondisi Udara	Nilai ADC MQ-135	Keterangan
1	Udara normal	820	Normal
2	Udara normal	860	Normal
3	Bau sampah ringan	1280	Waspada
4	Bau sampah menyengat	1650	Waspada
5	Asap	2150	Bahaya

Pengujian sensor gas MQ-135 dilakukan dengan mengamati nilai pembacaan sensor pada beberapa kondisi udara yang berbeda. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon sensor terhadap perubahan kualitas udara. Hasil pengujian sensor gas MQ-135 disajikan pada Tabel 1. menunjukkan peningkatan nilai pembacaan ketika terpapar udara yang mengandung bau atau asap. Pada kondisi udara normal, nilai pembacaan sensor relatif rendah, sedangkan pada kondisi udara tercemar nilai pembacaan sensor meningkat secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sensor MQ-135 mampu merespons perubahan kualitas udara dan layak digunakan sebagai pendeteksi gas pada sistem yang dikembangkan.

4.5. Analisis Metode Fuzzy Berbasis Interval

Pada implementasi perangkat, peneliti menggunakan bentuk fuzzy yang disederhanakan tanpa seluruh proses inferensi Mamdani. Sistem hanya memanfaatkan pembagian kategori (Kosong, Sedang, Penuh, dan Sangat Penuh untuk tinggi sampah serta Normal, Waspada, Bahaya untuk gas) dan kemudian menentukan status akhir berdasarkan interval nilai input. Model ini dipilih agar lebih ringan dijalankan pada mikrokontroler ESP32 dan tetap mampu menggambarkan kondisi tempat sampah secara akurat. Pada sistem ini terdapat dua variabel input fuzzy, yaitu Tinggi sampah dan Kadar Gas.

Tinggi sampah diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan persamaan: $\text{Tinggi Sampah} = \text{Tinggi Tong Sampah} - \text{Jarak Sensor}$

Kadar Gas, diperoleh dari nilai ADC sensor MQ-135 sebagai indikator bau. Setiap variabel input dibagi ke dalam beberapa kategori fuzzy sebagai berikut:

- Tinggi Sampah
 - Kosong (0-1 cm)
 - Sedang : 1-4 cm
 - Penuh : 4-7 cm
 - Sangat penuh : >7 cm
- Kadar Gas
 - Normal : $\text{ADC} \leq 1200$
 - Waspada : $1200 \leq \text{ADC} \leq 1800$
 - Bahaya : $\text{ADC} > 1800$

4.6. Pengujian Notifikasi Telegram

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu mengirimkan pesan notifikasi otomatis melalui Telegram secara real-time berdasarkan hasil pengolahan data sensor oleh sistem logika fuzzy. Hal ini bertujuan untuk memungkinkan pengguna atau petugas kebersihan menerima peringatan kondisi tempat sampah tanpa harus melakukan pengecekan manual. Sistem mengirimkan notifikasi secara periodik setiap ± 180 detik (3 menit), dengan rentang waktu aktual 3–5 menit tergantung pada stabilitas koneksi Wi-Fi dan beban jaringan Telegram. Notifikasi paling cepat terjadi pada kondisi Aman, karena tidak ada pemrosesan lanjutan dari fuzzy lainnya. Sementara itu, kondisi penuh atau bahaya menunjukkan sedikit peningkatan waktu pengiriman karena sistem melakukan verifikasi perubahan status berbasis interval fuzzy sebelum mengirimkan notifikasi. Dengan demikian, sistem messaging berbasis Telegram terbukti efektif dalam memberikan peringatan secara real-time sesuai perubahan kondisi yang terdeteksi oleh sensor. Untuk mendukung fungsi pemantauan jarak jauh, sistem mengirimkan notifikasi otomatis melalui aplikasi Telegram berdasarkan hasil olahan sensor oleh metode fuzzy logic. Hasil tampilan pesan notifikasi yang diterima pengguna selama proses pengujian ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 10. Notifikasi pada telegram

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pembagian interval fuzzy mampu mengurangi kesalahan klasifikasi akibat fluktuasi data sensor yang sering terjadi pada lingkungan tempat sampah. Pendekatan interval ini membuat sistem lebih stabil dibandingkan penggunaan batas tunggal, karena perubahan kecil pada data sensor tidak langsung mengubah status klasifikasi. Dengan demikian, sistem dapat memberikan keputusan yang lebih konsisten dalam kondisi operasional nyata.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem tempat sampah pintar berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan mampu melakukan pemantauan kondisi tempat sampah secara real-time. Sistem ini memanfaatkan sensor ultrasonik untuk mengukur ketinggian sampah, sensor gas MQ-135 untuk mendeteksi kualitas udara di sekitar tempat sampah, serta motor servo sebagai aktuator mekanisme buka-tutup tempat sampah yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32.

Penerapan metode fuzzy logic berbasis interval pada sistem ini terbukti efektif dalam menentukan status tempat sampah berdasarkan kombinasi nilai ketinggian sampah dan konsentrasi gas. Pendekatan ini mampu mengakomodasi ketidakpastian data sensor dengan kompleksitas komputasi yang rendah, sehingga sesuai diterapkan pada perangkat IoT dengan keterbatasan sumber daya. Selain itu, integrasi sistem notifikasi menggunakan Telegram Bot API memungkinkan penyampaian informasi kondisi tempat sampah secara cepat dan efisien kepada pengguna. Penggunaan panel surya sebagai sumber energi alternatif menjadikan sistem lebih mandiri dan ramah lingkungan, khususnya untuk diterapkan pada area yang memiliki keterbatasan akses listrik. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan dapat menjadi solusi pendukung dalam pengelolaan sampah

yang lebih efektif, efisien, dan berbasis teknologi cerdas.

Meskipun sistem yang dikembangkan telah berfungsi dengan baik, terdapat beberapa hal yang dapat dijadikan pengembangan pada penelitian selanjutnya. Pertama, sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan lebih banyak parameter sensor, seperti sensor kelembaban atau sensor suhu, untuk memperoleh informasi kondisi lingkungan yang lebih komprehensif. Kedua, metode pengambilan keputusan dapat dibandingkan dengan metode kecerdasan buatan lainnya, seperti fuzzy konvensional, decision tree, atau machine learning, guna mengevaluasi tingkat akurasi dan efisiensi sistem secara lebih mendalam.

Selain itu, sistem dapat dikembangkan dengan integrasi platform cloud atau dashboard berbasis web untuk visualisasi data historis dan analisis jangka panjang. Dari sisi implementasi lapangan, pengujian dalam skala lebih besar dan durasi waktu yang lebih lama sangat disarankan untuk mengetahui keandalan sistem terhadap kondisi lingkungan yang beragam. Dengan pengembangan tersebut, diharapkan sistem tempat sampah pintar ini dapat diimplementasikan secara lebih luas dalam mendukung pengelolaan sampah berbasis smart environment.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adiwijaya, A., & Putri, N. R. (2021). Implementasi Internet of Things pada sistem monitoring lingkungan berbasis mikrokontroler. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 8(3), 543–550.
- [2] Andriani, D., & Saputra, A. (2020). Rancang bangun tempat sampah pintar berbasis Internet of Things. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, 4(5), 812–819.
- [3] Fauzan, M., & Prabowo, A. (2022). Implementasi sistem monitoring ketinggian sampah menggunakan sensor ultrasonik berbasis mikrokontroler. *Jurnal Elektronika dan Instrumentasi*, 7(2), 65–73.
- [4] Hidayat, R., & Mahmud, F. (2022). Rancang bangun sistem monitoring berbasis ESP32 untuk aplikasi Internet of Things. *Jurnal Informatika dan Komputer*, 7(2), 88–96.
- [5] Kusuma, A., & Nugroho, Y. (2021). Analisis kinerja sensor MQ-135 dalam mendeteksi kualitas udara. *Jurnal Teknologi Sensor*, 9(1), 45–52.
- [6] Lesmana, K., & Sukarno, S. A. (2025). Prototipe penggunaan motor servo pada sistem otomatis berbasis mikrokontroler. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(2), 115–123.
- [7] Nugraha, A., & Setiawan, B. (2020). Sistem monitoring lingkungan berbasis Internet of Things menggunakan ESP32. *Jurnal Teknologi Informasi*, 12(1), 33–41.
- [8] Prasetyo, D., & Wijaya, R. (2021). Implementasi motor servo sebagai aktuator pada sistem otomatis berbasis mikrokontroler. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(2), 101–109.
- [9] Purnomo, A., Setiawan, D., & Hakim, R. (2023). Implementasi Telegram Bot API pada sistem notifikasi berbasis Internet of Things. *Journal of Embedded Systems and IoT*, 6(1), 55–63.
- [10] Putra, A. R., & Saputra, D. (2020). Desain sistem monitoring tempat sampah pintar berbasis Internet of Things. *Jurnal Teknologi Informasi*, 12(3), 210–218.
- [11] Rahman, A., & Kurniawan, T. (2021). Pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi mandiri pada perangkat Internet of Things. *Jurnal Energi Terbarukan*, 8(2), 101–109.
- [12] Santika, I. P., Dewi, K., & Pramana, G. (2024). Pengembangan tempat sampah pintar berbasis fuzzy logic dan Internet of Things. *Jurnal Informatika dan Sistem Informasi*, 10(2), 134–143.
- [13] Setiawan, B., & Prabowo, A. (2022). Implementasi fuzzy logic dalam sistem pengambilan keputusan berbasis sensor. *Jurnal Sistem Cerdas*, 5(1), 27–35.
- [14] Soleh, M., Anwar, H., & Pratama, R. (2023). Evaluasi performa ESP32 pada sistem monitoring berbasis Internet of Things. *Jurnal Teknologi Embedded*, 8(1), 41–49.
- [15] Sutisna, A., Wijanarko, R., & Putra, D. (2024). Pemanfaatan energi surya untuk perangkat Internet of Things mandiri. *Jurnal Energi Terbarukan*, 11(1), 19–27.
- [16] Triyono, D., & Wahyudi, S. (2020). Sistem monitoring ketinggian sampah menggunakan sensor ultrasonik. *Jurnal Elektronika dan Instrumentasi*, 6(2), 77–84.
- [17] Widodo, S., & Hartono, R. (2021). Pengujian performa motor servo pada sistem kontrol berbasis mikrokontroler. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(3), 155–162.
- [18] Yusuf, A., & Rahman, M. (2022). Penerapan fuzzy logic dalam pengambilan keputusan real-time berbasis sensor. *Jurnal Sistem Cerdas dan Kecerdasan Buatan*, 14(3), 178–186.
- [19] Firmansyah, A., Pratama, R., & Hidayat, T. (2023). Perancangan dan analisis kinerja solar charge controller pada sistem panel surya berbasis baterai Li-ion. *Jurnal Energi Terbarukan dan Sistem Cerdas*, 12(2), 85–94.
- [20] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2020). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.
- [21] Herlambang, A., Prasetyo, D., & Wibowo, R. (2024). Implementasi fuzzy logic pada sistem tempat sampah pintar berbasis Internet of Things. *Jurnal Teknologi Informasi dan Sistem Cerdas*, 12(1), 45–54.

- [22] Ikram, M., Syahputra, R., & Nugroho, A. (2023). Smart waste management system using IoT for real-time monitoring. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(5), 112–119.
- [23] Lestari, N., Hidayat, T., & Ramadhan, F. (2023). Analisis permasalahan pengelolaan sampah perkotaan di Indonesia dan strategi penanganannya. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(2), 87–96.
- [24] Ma'arif, S., Nugraha, A., & Setiawan, B. (2019). Rancang bangun sistem monitoring tempat sampah berbasis Internet of Things untuk pengelolaan sampah perkotaan. *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, 5(3), 301–310.
- [25] Santika, I. P., Putra, G. M., & Wijaya, K. (2024). Penerapan fuzzy logic untuk optimasi notifikasi pada smart trash bin berbasis IoT. *Jurnal Sistem Cerdas dan Rekayasa*, 9(1), 15–23.