

RANCANG BANGUN SISTEM PEMILAH SAMPAH PINTAR BERBASIS IOT DAN LOGIKA FUZZY SUGENO DENGAN FITUR NOTIFIKASI SUARA DAN MANAJEMEN DAYA

Ahmad Fahri Ramadhani¹, Aldi², Abdul Rahman³

^{1,2,3}Universitas Multi Data Palembang, Jl. Rajawali no.14, Palembang, Sumatera Selatan

Keywords:

Internet of Things; Logika Fuzzy; Pemilah Sampah; Mode Deep Sleep; Sensor Radar mmWave

Correspondent Email:

fahri.10ahmad@gmail.com

Abstrak. Permasalahan pengelolaan sampah di perkotaan sering kali terkendala oleh sistem pemilahan manual yang lambat dan pemantauan kapasitas yang tidak efisien. Penelitian ini bertujuan mengembangkan purwarupa sistem pemilah sampah cerdas berbasis mikrokontroler ESP32 yang mengintegrasikan *Internet of Things* (IoT) dan manajemen daya. Alat ini menggunakan sensor inframerah dan *proximity* (induktif dan kapasitif) untuk memilah material plastik, logam, dan kertas secara otomatis. Kapasitas wadah dihitung menggunakan Logika Fuzzy metode Sugeno Orde-Nol berdasarkan masukan ganda dari sensor ultrasonik untuk mengatasi galat pembacaan akibat tumpukan miring. Sistem juga dilengkapi sensor radar mmWave untuk mengelola transisi mode *Deep Sleep*, serta modul DFPlayer Mini untuk notifikasi suara preventif. Hasil pengujian menunjukkan akurasi pemilahan mekanis mencapai rata-rata 80,66%. Algoritma Fuzzy Sugeno berhasil menghitung kapasitas dengan tingkat galat 0,00% dan secara instan mengaktifkan pengunci aktuator (*System Lock*) saat wadah penuh. Data kapasitas berhasil dipantau secara *real-time* melalui antarmuka Blynk dengan waktu tunda transmisi rata-rata 3 detik. Implementasi mode hemat daya sukses menghasilkan tingkat efisiensi energi sebesar 28,12%. Sistem ini menawarkan solusi pengelolaan limbah yang andal, interaktif, dan hemat daya.



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika dan
Teknik Elektro Terapan. This is an
open-access article distributed under
the terms of the Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0
International License (CC BY-NC
4.0).

Abstract. Waste management in urban areas is often constrained by slow manual sorting and inefficient capacity monitoring. This study aims to develop an ESP32 microcontroller-based smart waste sorting prototype integrating the Internet of Things (IoT) and intelligent power management. The device uses infrared and proximity sensors (inductive and capacitive) to automatically sort plastic, metal, and paper materials. Bin capacity is calculated using the Zero-Order Sugeno Fuzzy Logic method based on dual inputs from ultrasonic sensors to overcome reading errors from asymmetrical piles. The system also features an mmWave radar sensor to manage Deep Sleep mode transitions, and a DFPlayer Mini module for preventive voice notifications. Test results showed a mechanical sorting accuracy of 80.66%. The Sugeno Fuzzy algorithm successfully calculated capacity with a 0.00% error rate and instantly activated the actuator lock (System Lock) when the bin was full. Capacity data was successfully monitored in real-time via the Blynk interface with an average delay of 3 seconds. The implementation of the power-saving mode successfully yielded an energy efficiency rate of 28.12%. This system offers a reliable, interactive, and power-efficient waste management solution.

1. PENDAHULUAN

Permasalahan sampah merupakan isu krusial yang membutuhkan penanganan komprehensif yang harus dimulai dari tahap pemilahan di sumbernya. Di perkotaan dengan kepadatan tinggi seperti Kota Palembang, volume sampah yang masuk ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dapat mencapai ratusan ton per hari [1]. Sistem pengelolaan yang didominasi metode pemilahan manual dinilai kurang efektif karena membutuhkan waktu lama, rentan kesalahan, serta berisiko bagi kesehatan petugas akibat kontak langsung dengan limbah [2]. Oleh karena itu, otomasi sistem pemilahan sampah menjadi solusi teknologi yang sangat dibutuhkan untuk mengklasifikasikan material bernilai daur ulang seperti logam, plastik, dan kertas secara cepat dan higienis [3].

Berbagai penelitian terdahulu telah berupaya mengembangkan purwarupa pemilah sampah otomatis. Namun, implementasinya masih dihadapkan pada sejumlah kelemahan operasional. Pertama, sistem pemantauan yang masih bersifat lokal sangat tidak efisien untuk diterapkan pada skala luas, karena petugas harus datang langsung ke lokasi untuk mengecek kapasitas setiap wadah [4]. Kedua, penggunaan sensor ultrasonik tunggal untuk memantau volume wadah sering menghasilkan data yang bias (galat) akibat tumpukan sampah yang asimetris atau miring [5]. Ketiga, arsitektur sistem cerdas saat ini umumnya mengonsumsi energi secara berlebihan karena mikrokontroler dan sensor dibiarkan beroperasi secara penuh selama 24 jam nonstop meskipun tidak ada pengguna di sekitar alat [6]. Lebih jauh, sistem peringatan yang hanya mengandalkan indikator visual atau bunyi *buzzer* sering kali tidak dipahami pengguna, yang berujung pada pembuangan sampah secara paksa dan memicu kemacetan mekanis (*jamming*) pada aktuatur pengarah [7].

Untuk menyempurnakan celah penelitian tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan purwarupa sistem pemilah sampah pintar terintegrasi menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem ini memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT) melalui antarmuka aplikasi Blynk untuk memungkinkan pemantauan status dan kapasitas tempat sampah secara *real-time* dari jarak jauh [8]. Untuk mengatasi ambiguitas

pembacaan volume, diimplementasikan algoritma kecerdasan buatan Logika Fuzzy metode Sugeno yang mengolah masukan ganda dari dua sensor ultrasonik pada setiap wadah, sehingga perhitungan persentase kapasitas menjadi sangat akurat dan stabil [9], [10].

Nilai kebaruan (*novelty*) tambahan pada penelitian ini terletak pada integrasi sensor radar *millimeter-wave* (mmWave) HLK-LD2410C sebagai pendeteksi kehadiran manusia. Sensor ini difungsikan sebagai saklar interupsi untuk membangunkan sistem dari mode hemat daya (*Deep Sleep*), sehingga efisiensi energi dapat dioptimalkan secara signifikan [11]. Sebagai media interaksi preventif, sistem ini juga dilengkapi dengan modul audio DFPlayer Mini untuk memberikan notifikasi instruksi suara yang edukatif, serta mekanisme aktuatur yang mengunci pintu masuk (*System Lock*) secara otomatis saat wadah telah penuh [7]. Melalui pendekatan komprehensif ini, purwarupa diharapkan tidak hanya andal secara fungsional, tetapi juga sangat hemat energi dan mampu mendukung konsep tata kelola kebersihan cerdas (*Smart City*).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Otomasi dan Identifikasi Material

Dalam otomasi pemilahan sampah, pengidentifikasian jenis material secara nirkontak (*contactless*) dilakukan menggunakan perpaduan beberapa sensor pada sistem kendali tertanam (*embedded system*) [12]. Sensor inframerah (IR) berfungsi sebagai pemancar dan penerima cahaya untuk mendeteksi keberadaan fisik objek yang melintas [13]. Setelah objek terdeteksi, klasifikasi material dilakukan menggunakan sensor *proximity*. Sensor *proximity* induktif bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang mendeteksi perubahan medan magnet ketika didekati oleh material logam [13]. Sebaliknya, sensor *proximity* kapasitif mendeteksi perubahan nilai dielektrik atau kapasitansi, sehingga efektif untuk mengidentifikasi keberadaan material non-logam yang padat, seperti plastik [13].

2.2. Sensor Ultrasonik dan Pengukuran Jarak

Pengukuran kapasitas pada setiap wadah penampungan memanfaatkan sensor ultrasonik (HY-SRF05). Sensor ini beroperasi dengan memancarkan gelombang suara berfrekuensi tinggi (sekitar 40 kHz) yang akan memantul ketika mengenai permukaan objek [14]. Secara matematis, jarak antara sensor dengan permukaan tumpukan sampah dihitung menggunakan persamaan kinematika pantulan gelombang pada persamaan 1:

$$S = \frac{t \times v}{2} \quad 1$$

di mana S adalah jarak objek, t adalah selisih waktu antara pemancaran dan penerimaan gelombang, dan v adalah kecepatan rambat suara di udara [14].

2.3. Logika Fuzzy Metode Sugeno Orde-Nol

Untuk meminimalisasi galat (*error*) pembacaan jarak yang diakibatkan oleh tumpukan sampah yang asimetris, data dari sensor ultrasonik ganda diolah menggunakan kecerdasan buatan Logika Fuzzy [10]. Pada sistem kendali tertanam yang memerlukan keluaran berupa nilai tegas (*crisp*), metode Sugeno orde-nol merupakan pendekatan yang paling efisien [15]. Proses penegasan (*defuzzifikasi*) pada metode Sugeno tidak menghitung titik berat kurva, melainkan menggunakan persamaan Rata-rata Terbobot (*Weighted Average*) 2:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad 2$$

di mana Z merupakan hasil keluaran tegas berupa persentase kapasitas wadah, w_i adalah nilai derajat keanggotaan (bobot) dari aturan ke- i , dan z_i adalah nilai konstanta dari aturan tersebut [15].

2.4. Internet of Things (IoT) pada Manajemen Limbah

Internet of Things (IoT) merupakan arsitektur yang memungkinkan perangkat fisik untuk saling bertukar data secara *real-time* melalui jaringan internet guna mendukung ekosistem kota cerdas (*Smart City*) [2], [16]. Mikrokontroler ESP32 memiliki keunggulan komputasi karena telah terintegrasi dengan modul Wi-Fi, sehingga data kapasitas hasil pengolahan Logika Fuzzy dapat langsung

dikirimkan ke peladen (*server*) [4]. Platform Blynk bertindak sebagai antarmuka pengguna (*dashboard*) yang menampilkan indikator numerik, grafik kapasitas, serta mengirimkan notifikasi jarak jauh apabila wadah penampungan telah penuh [4], [17].

2.5. Manajemen Daya Berbasis Radar mmWave

Konsumsi daya pada perangkat IoT umumnya tinggi akibat sistem yang terus menyala (*always-on*). Untuk mengatasinya, diimplementasikan sensor radar gelombang mikro (*millimeter-wave / mmWave*) HLK-LD2410C [11]. Sensor ini menggunakan prinsip *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW) yang sangat sensitif dalam mendeteksi pergerakan manusia. Saat tidak ada pengguna, mikrokontroler akan beralih ke mode *Deep Sleep* yang sangat hemat daya. Sistem hanya akan bangun (*Wake-up*) saat sensor radar mengirimkan sinyal interupsi perangkat keras (*hardware interrupt*) [11].

2.6. Modul Suara DFPlayer Mini

Sebagai bentuk edukasi dan tindakan preventif secara lokal, sistem menggunakan modul pemutar audio DFPlayer Mini [7]. Modul ini berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui jalur serial asinkron (UART) [7]. Ketika algoritma Fuzzy mendeteksi bahwa wadah telah mencapai batas maksimal, ESP32 akan mengirimkan instruksi heksadesimal ke modul untuk memutar *file* audio peringatan secara langsung, mencegah pengguna memaksakan pembuangan sampah yang dapat merusak mesin [7].

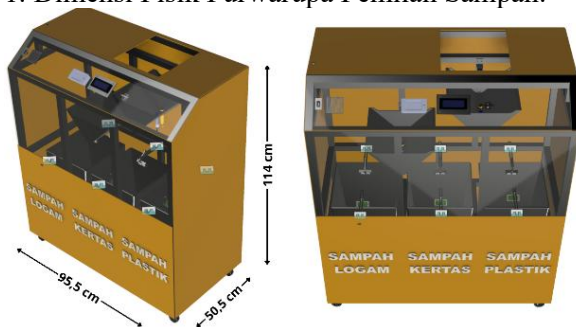
3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah *Prototyping* (Pembuatan Purwarupa), yang memungkinkan perancangan, integrasi, dan evaluasi sistem perangkat keras serta perangkat lunak dilakukan secara iteratif.

3.1. Arsitektur Perangkat Keras (Hardware)

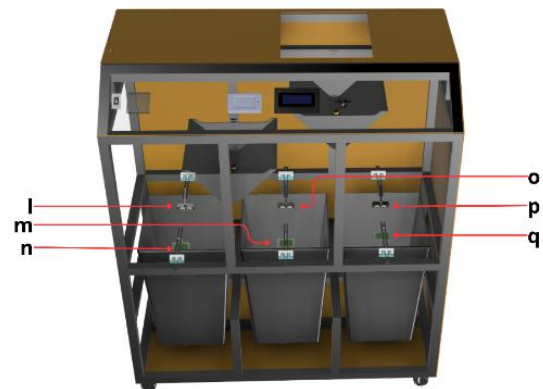
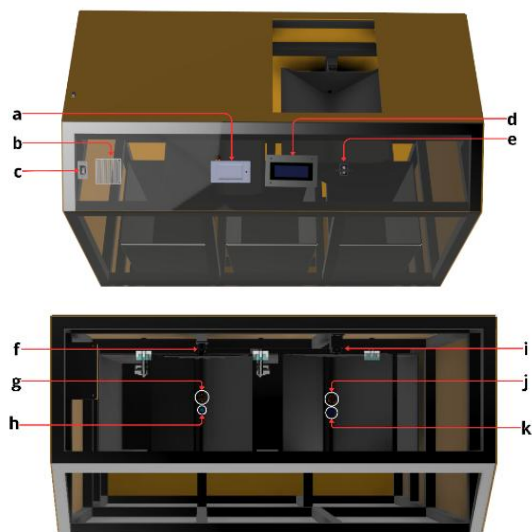
Sistem dirancang dengan arsitektur terintegrasi yang berpusat pada mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama. Purwarupa alat pemilah sampah ini dibangun menggunakan bentuk balok dengan dimensi fisik panjang 95,5 cm, lebar 50,5 cm, dan tinggi

114 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dimensi Fisik Purwarupa Pemilah Sampah.



Gambar 1. Dimensi Fisik Purwarupa Pemilah Sampah

Tata letak komponen pada purwarupa dipetakan secara spesifik ke dalam tiga bagian utama untuk mendukung efisiensi kerja mekanis, keandalan deteksi, serta kenyamanan antarmuka pengguna. Pemetaan kode huruf komponen elektronik, mekanisme pemilahan, dan peletakan sensor ultrasonik diilustrasikan pada Gambar 2. Tata Letak Komponen.



Gambar 2. Tata Letak Komponen

Rincian spesifik mengenai nama komponen dan fungsinya berdasarkan kode huruf pada rancangan alat dijabarkan pada Tabel 1. Rincian Tata Letak dan Fungsi Komponen Mekanik.

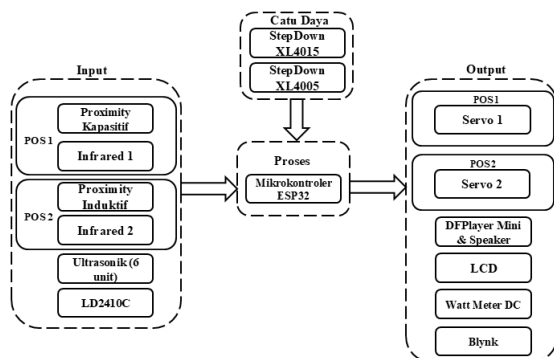
Tabel 1. Rincian Tata Letak dan Fungsi Komponen Mekanik

Label	Nama Komponen	Keterangan
a	Watt Meter DC	Memantau tegangan, arus, dan konsumsi daya secara <i>real-time</i> .
b	Speaker	Menyalurkan keluaran notifikasi suara edukatif dari modul DFPlayer.
c	Saklar	Pemutus dan penyambung aliran listrik utama dari catu daya.
d	LCD	Menampilkan status operasional dan persentase kapasitas secara visual.
e	Radar HLK-LD2410C	Mendeteksi pergerakan manusia sebagai pemicu interupsi <i>Wake-Up</i> .
f,i	Motor Servo (POS 1 & 2)	Aktuator penggerak sekat pemilah material sekaligus fitur <i>System Lock</i> .
g,j	Sensor Infrared (POS 1 & 2)	Pemicu (<i>trigger</i>) awal yang mendeteksi masuknya objek ke zona pindai.
h	Proximity Induktif (POS 2)	Mendeteksi karakteristik objek berbahan logam pada tahap kedua.

Label	Nama Komponen	Keterangan
k	Proximity Kapasitif (POS 1)	Mendeteksi objek material non-logam secara presisi di tahap pertama.
l-q	Sensor Ultrasonik (6 Unit)	Dipasang ganda (depan-belakang) tiap wadah untuk data input Logika Fuzzy.

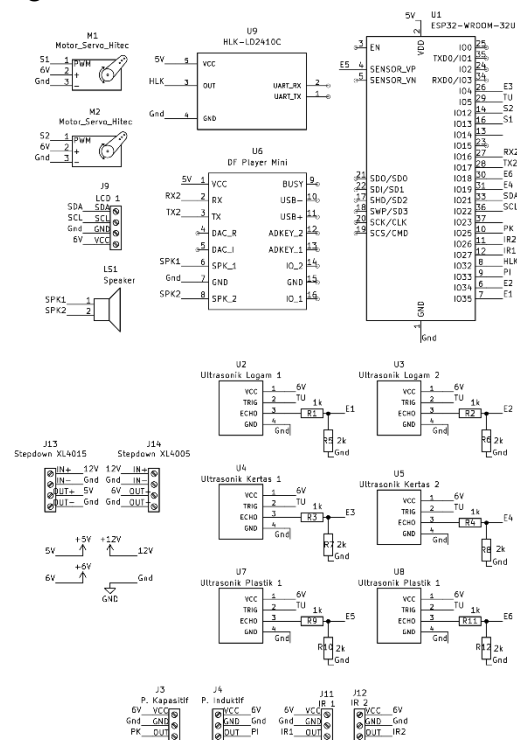
Secara fungsional, arsitektur perangkat keras ini dibagi menjadi tiga blok utama yang diilustrasikan pada Gambar 3. Blok Diagram Sistem Alat:

1. Blok Input: Terdiri dari sensor inframerah (IR) sebagai pemicu awal, sensor *proximity* kapasitif dan induktif pada dua pos pemilahan berurutan (POS 1 dan POS 2) untuk identifikasi material. Sistem juga menggunakan enam buah sensor ultrasonik HY-SRF05 (dua unit per wadah) untuk membaca jarak tumpukan sampah secara ganda, serta sensor radar mmWave HLK-LD2410C sebagai pendeteksi kehadiran manusia.
2. Blok Proses: ESP32 difungsikan untuk mengevaluasi data masukan, menjalankan algoritma Logika Fuzzy Sugeno, mengelola protokol koneksi *Wi-Fi* ke peladen IoT, dan mengatur transisi mode daya.
3. Blok Output: Terdiri dari dua unit motor servo sebagai aktuator pemilah dan pengunci pintu (*System Lock*), layar LCD I2C 20x4, modul DFPlayer Mini beserta *speaker* untuk notifikasi suara, dan antarmuka *dashboard* aplikasi Blynk.



Gambar 3. Blok Diagram Sistem Alat

Untuk mengintegrasikan seluruh perangkat keras tersebut, sistem kelistrikan dirancang dengan memisahkan jalur suplai daya menggunakan modul *step-down* XL4015 (untuk mikrokontroler dan sensor) dan XL4005 (khusus untuk aktuator motor servo). Pemisahan ini sangat krusial untuk mencegah terjadinya penurunan tegangan sesaat (*voltage drop*) atau gangguan stabilitas pada inti prosesor ESP32 ketika motor servo sedang menarik arus awal (*starting current*) yang besar. Pemetaan jalur komunikasi data, sensor, dan distribusi tegangan ke setiap pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) secara menyeluruh ditunjukkan pada skematik rangkaian di Gambar 4. Desain Skematik.

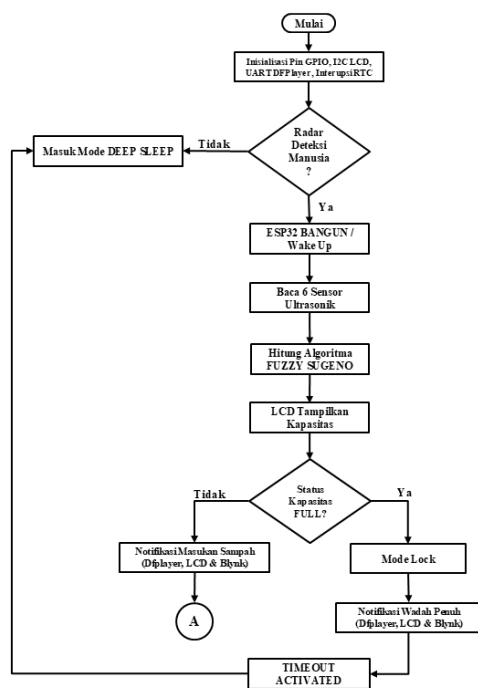


Gambar 4. Desain Skematik

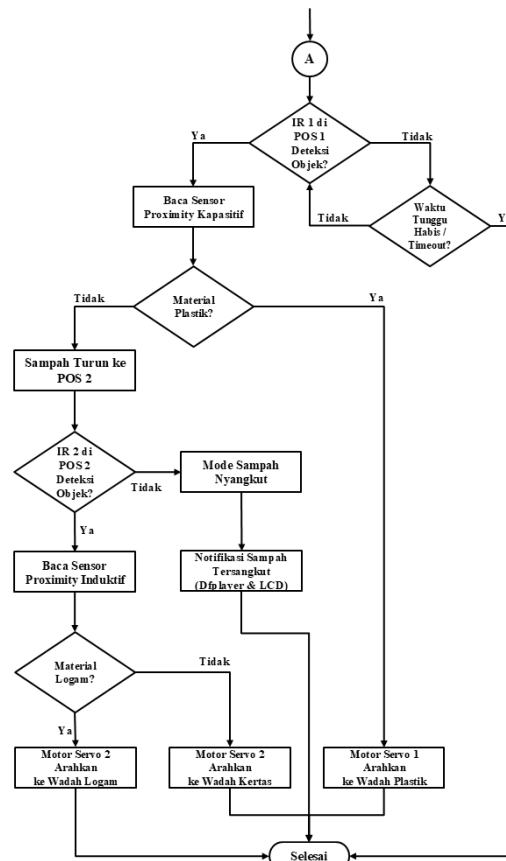
3.2. Perancangan Perangkat Lunak dan Manajemen Daya

Alur kerja perangkat lunak secara keseluruhan terbagi menjadi dua tahapan yang saling terhubung melalui simpul (A). Alur pemantauan utama diilustrasikan pada Gambar 5. Flowchart Sistem Utama, Integrasi IoT, dan Manajemen Daya, sedangkan alur pemilahan mekanis ditunjukkan pada Gambar 6. Subsistem Pemilahan Mekanis dan Eliminasi Material. Secara sekuensial, siklus utama dimulai dengan inisialisasi periferal. Jika radar

tidak mendeteksi pengguna, sistem akan bertahan pada mode hemat daya (*Deep Sleep*). Saat pengguna terdeteksi, sistem bangun (*Wake Up*), membaca data dari keenam sensor ultrasonik, dan mengkalkulasi persentase kapasitas menggunakan Logika Fuzzy Sugeno. Hasil komputasi ini langsung dikirimkan ke *dashboard* Blynk melalui koneksi *Wi-Fi*. Jika wadah terdeteksi penuh, mode pengunci (*System Lock*) dan notifikasi peringatan akan aktif. Namun, jika belum penuh, alat memutar audio edukasi dan alur program berlanjut ke subsistem pemilahan melalui simpul A.



Gambar 5. Flowchart Sistem Utama, Integrasi IoT, dan Manajemen Daya

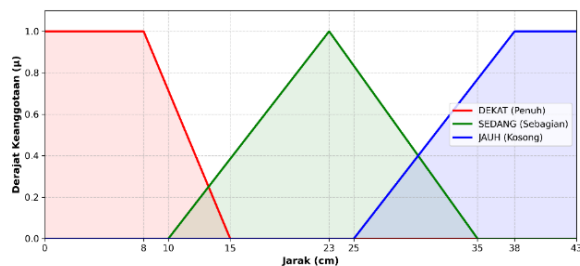


Gambar 6. Subsistem Pemilahan Mekanis dan Eliminasi Material

Melanjutkan dari simpul A, proses pemilahan bersiaga di POS 1. Jika sensor inframerah pertama (IR 1) mendeteksi objek, sensor *proximity* kapasitif akan memindai material tersebut. Material plastik akan langsung diarahkan ke wadahnya oleh motor servo 1, sedangkan material selain plastik dibiarkan turun ke POS 2. Di POS 2, sensor IR 2 bertugas memverifikasi jatuhnya objek. Apabila objek tersangkut (tidak terdeteksi), sistem memicu peringatan ke LCD, audio, dan mengirimkan notifikasi kendala ke aplikasi Blynk. Namun, jika objek masuk secara normal, sensor *proximity* induktif akan memindai material logam untuk diarahkan ke wadah logam oleh servo 2. Material sisa yang tidak teridentifikasi akan otomatis dieliminasi dan dijatuhkan ke wadah kertas. Setelah proses pemilahan selesai atau batas waktu (*timeout*) habis, sistem memutus koneksi internet dan kembali tertidur ke mode *Deep Sleep*.

3.3. Perancangan Logika Fuzzy Sugeno

Pemrosesan kapasitas wadah menggunakan algoritma Fuzzy Sugeno Orde-Nol dengan dua variabel masukan (*Jarak Depan* dan *Jarak Belakang*) untuk mengatasi ambiguitas tumpukan miring. Proses fuzzifikasi memetakan jarak (0-43 cm) ke dalam tiga himpunan: DEKAT (Penuh), SEDANG (Sebagian), dan JAUH (Kosong). Sebagaimana ditunjukkan pada kurva fungsi keanggotaan di Gambar 7. Kurva Fungsi Keanggotaan (Membership Function).



Gambar 7. Kurva Fungsi Keanggotaan (Membership Function)

Aturan evaluasi menggunakan operator AND (Fungsi MIN) untuk menghasilkan kekuatan aturan (*alpha-predicate*). Matriks keputusan yang menjadi acuan dalam sistem inferensi ini ditunjukkan secara lengkap pada Tabel 2. Basis Aturan (Rule Base) Sistem Fuzzy Sugeno Tahap akhir (*defuzzifikasi*) menggunakan rumus Rata-rata Terbobot untuk menghasilkan konstanta persentase (0-100%). Jika hasil akhir $\geq 75\%$, ESP32 akan mengunci aktuator dan membunyikan peringatan suara.

Tabel 2. Basis Aturan (Rule Base) Sistem Fuzzy Sugeno

Rule	Variabel Masukan (Jarak)	Variabel Keluaran (Kapasitas)	Nilai Konstanta (Z)
1	IF Jarak Depan JAUH AND Jarak Belakang JAUH	THEN Kapasitas KOSONG	0
2	IF Jarak Depan JAUH AND Jarak Belakang	THEN Kapasitas SETENGAH	50

Rule	Variabel Masukan (Jarak)	Variabel Keluaran (Kapasitas)	Nilai Konstanta (Z)
	SEDAN G		
3	IF Jarak Depan JAUH AND Jarak Belakang DEKAT	THEN Kapasitas PENUH	100
4	IF Jarak Depan SEDAN G AND Jarak Belakang JAUH	THEN Kapasitas SETENGAH	50
5	IF Jarak Depan SEDAN G AND Jarak Belakang SEDAN G	THEN Kapasitas SETENGAH	50
6	IF Jarak Depan SEDAN G AND Jarak Belakang DEKAT	THEN Kapasitas PENUH	100
7	IF Jarak Depan DEKAT AND Jarak Belakang JAUH	THEN Kapasitas PENUH	100
8	IF Jarak Depan DEKAT AND Jarak Belakang SEDAN G	THEN Kapasitas PENUH	100
9	IF Jarak Depan DEKAT AND	THEN Kapasitas PENUH	100

Rule	Variabel Masukan (Jarak)	Variabel Keluaran (Kapasitas)	Nilai Konstanta (Z)
	Jarak Belakang DEKAT		

3.4. Skenario Pengujian

Evaluasi sistem dilakukan melalui beberapa skenario pengujian, yaitu: 1) Pengujian akurasi pemilahan mekanis menggunakan 60 sampel acak (plastik, logam, kertas); 2) Validasi komputasi Fuzzy Sugeno terhadap respons *System Lock*; 3) Pengujian *delay* transmisi data ke *dashboard* Blynk; dan 4) Pengukuran daya aktif melawan daya *Deep Sleep* menggunakan instrumen Watt Meter DC untuk menghitung persentase efisiensi energi harian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

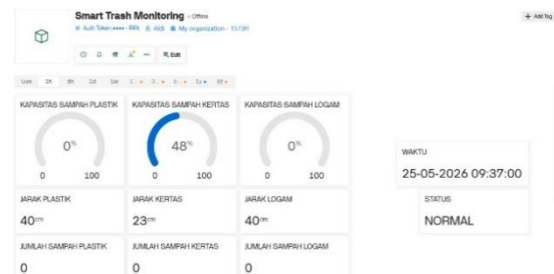
4.1. Implementasi Perangkat Keras dan Antarmuka

Tahap implementasi merupakan realisasi dari rancangan sistem menjadi sebuah purwarupa yang utuh dan fungsional secara mekanis maupun elektronis. Secara fisik, purwarupa ini memiliki satu lubang masuk utama (*inlet*) yang terhubung ke lorong pemilahan bersusun. Pada POS 1, terpasang sensor inframerah pertama dan sensor *proximity* kapasitif (tipe NPN NC *Closed* yang dikonfigurasi dengan logika Active HIGH) beserta aktuator motor servo untuk memilah material plastik. Pada POS 2 yang berada di bawahnya, terpasang sensor inframerah kedua, sensor *proximity* induktif, dan motor servo untuk memilah logam dan kertas. Pada panel depan, terpasang sensor radar mmWave, sedangkan di bagian dasar alat terdapat tiga kompartemen wadah yang masing-masing dilengkapi sepasang sensor ultrasonik di bagian atasnya. Wujud fisik alat yang telah selesai dirakit ditunjukkan pada Gambar 8. Wujud Fisik Purwarupa Pemilah Sampah Cerdas Terintegrasi.



Gambar 8. Wujud Fisik Purwarupa Pemilah Sampah Cerdas Terintegrasi

Sebagai antarmuka pengguna secara lokal, sistem menggunakan layar LCD I2C 20x4 yang menampilkan status kesiapan alat, instruksi operasional, dan persentase kapasitas wadah secara visual. Untuk pemantauan dari jarak jauh, antarmuka diimplementasikan menggunakan *dashboard* Blynk yang dapat diakses melalui web maupun aplikasi *smartphone*. *Dashboard* ini menampilkan indikator numerik (seperti jarak sisa dan jumlah objek terpilah) serta grafik *gauge* (persentase kapasitas wadah) yang tersinkronisasi langsung melalui modul *Wi-Fi* terintegrasi pada ESP32. Tampilan antarmuka sistem secara lokal dan nirkabel ditunjukkan pada Gambar 9. Tampilan *Dashboard* Monitoring IoT di Blynk.



Gambar 9. Tampilan Dashboard Monitoring IoT di Blynk

4.2. Pengujian Subsistem Pemilahan Mekanis

Evaluasi kinerja pemilahan mekanis dilakukan secara sekuensial pada POS 1 dan POS 2 dengan memasukkan 60 sampel sampah secara acak (20 plastik, 20 logam, 20 kertas). Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi keberhasilan sistem mencapai rata-rata 80,66%. Secara spesifik, tingkat keberhasilan pemilahan plastik mencapai 85%, logam 80%, dan kertas 75%. Kegagalan (galat) identifikasi tertinggi terjadi pada material kertas akibat karakteristik fisik kertas yang sering terlipat atau menggumpal. Kondisi ini menyebabkan objek

tergelincir saat dialihkan dari POS 1 ke POS 2, sehingga sensor *proximity* gagal memindai objek dengan presisi. Meskipun demikian, integrasi antara sensor *infrared* sebagai pemicu awal dan *proximity* (induktif/kapasitif) terbukti cukup andal untuk memilah sampah rumah tangga secara mandiri. Rincian hasil pengujian akurasi pemilahan untuk ketiga kategori material tersebut disajikan pada Tabel 3 Akurasi Pemilahan Sampah (Pengujian 60 Sampel)

Tabel 3 Akurasi Pemilahan Sampah (Pengujian 60 Sampel)

Jenis Sampah	Jumlah Percobaan	Berhasil Dipilah	Tingkat Keberhasilan (%)
Plastik	20x	17x	85%
Kertas	20x	15x	75%
Logam	20x	16x	80%
Total Akurasi Sistem	60x	48x	80,66%

4.3. Validasi Logika Fuzzy dan Respons Keamanan (System Lock)

Pengolahan data kapasitas dari dua sensor ultrasonik (depan dan belakang) menggunakan metode Fuzzy Sugeno Orde-Nol menunjukkan hasil komputasi yang sangat presisi. Perbandingan antara hasil perhitungan matematis teoritis dengan luaran persentase (0-100%) yang dieksekusi oleh mikrokontroler ESP32 menunjukkan persentase galat (*error*) komputasi sebesar 0,00%.

Sistem keamanan preventif (*System Lock*) terbukti bekerja dengan instan. Ketika algoritma Fuzzy menyimpulkan kapasitas wadah mencapai ambang kritis ($\geq 75\%$), mikrokontroler secara otomatis memblokir alur pemilahan baru dan menginstruksikan motor servo untuk menutup jalur secara fisik. Secara bersamaan, modul DFPlayer Mini sukses memutar trek audio peringatan ("Wadah Penuh") tanpa adanya *delay* yang berarti, sehingga efektif mencegah pengguna memaksakan pembuangan material. Ringkasan hasil validasi perhitungan Fuzzy dan respons sistem pada berbagai skenario pengujian dapat

dilihat pada Tabel 4 Hasil Validasi Logika Fuzzy Sugeno dan Respons Sistem

Tabel 4 Hasil Validasi Logika Fuzzy Sugeno dan Respons Sistem

Skenario Pengujian	Input Jarak (Depan/ Belakang)	Output Kapasitas	Respon Sistem (Aktuator & Audio)
Kosong	35,0 & 37,0 cm	0%	<i>Standby</i> (Tidak ada audio)
Setengah	29,0/24,0 cm	50%	<i>Standby</i> (Tidak ada Audio)
Penuh	10,0/17,0 cm	100%	<i>System Lock</i> (Audio Wadah Penuh)

4.4. Kinerja Pemantauan IoT melalui Aplikasi Blynk

Pemantauan *real-time* dievaluasi dengan menyinkronkan data status ESP32 menuju platform Blynk melalui konektivitas *Wi-Fi*. Hasil pengujian membuktikan bahwa data kapasitas persentase, estimasi jarak sisa, jumlah objek yang dipilah, serta status perangkat berhasil dikirim dan ditampilkan secara akurat di antarmuka *dashboard* (layar *smartphone* dan komputer). Rata-rata waktu tunda (*delay*) transmisi dari saat sensor membaca data hingga pembaruan visual muncul di layar pengguna adalah sekitar 3 detik. Keterlambatan minor ini sepenuhnya wajar dan bergantung pada stabilitas latensi internet serta proses sinkronisasi peladen Blynk. Saat wadah penuh, aplikasi Blynk sukses memberikan notifikasi visual (misalnya, "PLASTIK & KERTAS PENUH"), memungkinkan petugas kebersihan mengoptimalkan jadwal pengangkutan tanpa harus mengecek fisik secara konvensional. Sinkronisasi data antara tampilan LCD pada alat dan dashboard Blynk saat wadah penuh dapat dilihat pada Gambar 10. Sinkronisasi Data Tampilan LCD dan Dashboard Blynk Saat Wadah Penuh



Gambar 10. Sinkronisasi Data Tampilan LCD dan Dashboard Blynk Saat Wadah Penuh

4.5. Analisis Efisiensi Daya (Manajemen Deep Sleep)

Pengujian konsumsi daya listrik membuktikan tingkat efektivitas fitur manajemen daya berbasis interupsi sensor radar mmWave. Pada kondisi siaga normal (*Standby*), seluruh periferal yang terus menyala menarik beban daya sebesar 1,7 Watt. Melalui implementasi metode *Deep Sleep*, mikrokontroler dan *Wi-Fi* dimatikan secara internal setelah 5 detik sistem tidak mendeteksi pengguna, konsumsi daya berhasil ditekan turun menjadi 1,2 Watt. Berdasarkan simulasi perhitungan beban operasional harian yang diasumsikan menangani 46 siklus pembuangan, beban energi harian sistem konvensional (tanpa mode hemat daya) adalah 42,39 Wh. Penerapan interupsi radar sukses menurunkan kebutuhan energi tersebut menjadi 30,47 Wh per hari. Hal ini merepresentasikan tingkat efisiensi penghematan daya keseluruhan sebesar 28,12%. Pada simulasi menggunakan baterai berkapasitas 60 Wh (12V 5A), manajemen daya ini terbukti secara matematis mampu memperpanjang umur ketahanan alat dari 1,41 hari menjadi 1,97 hari operasional mandiri.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem pemilah sampah pintar terintegrasi, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama:

1. Sistem pemilahan mekanis menggunakan perpaduan sensor inframerah dan *proximity* berhasil mengklasifikasikan tiga jenis material dengan tingkat akurasi keseluruhan sebesar 80,66% (Plastik 85%, Logam 80%, Kertas 75%).
2. Implementasi algoritma Logika Fuzzy Sugeno Orde-Nol menggunakan masukan sensor ultrasonik ganda terbukti efektif mengatasi galat pembacaan dengan tingkat presisi yang sangat tinggi (galat 0,00%). Sistem sukses mengeksekusi fitur pengunci keamanan (*System Lock*) dan memberikan notifikasi audio peringatan secara instan saat kapasitas wadah terdeteksi penuh.
3. Integrasi teknologi IoT melalui mikrokontroler ESP32 memungkinkan pemantauan status dan kapasitas alat secara *real-time* jarak jauh melalui antarmuka *dashboard* Blynk, dengan rata-rata waktu tunda transmisi data sekitar 3 detik.
4. Pemanfaatan sensor radar mmWave HLK-LD2410C sebagai pemicu interupsi mode hemat daya (*Deep Sleep*) berhasil menekan konsumsi arus siaga dari 1,7 Watt menjadi 1,2 Watt, menghasilkan tingkat efisiensi energi harian sebesar 28,12% dan memperpanjang ketahanan operasional perangkat secara signifikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Ilmu Komputer dan Rekayasa, Universitas Multi Data Palembang atas dukungan fasilitas selama proses penelitian. Penghargaan khusus disampaikan kepada Bapak Zaidan Jauhari (Kepala UPTD TPA Sukawinatan Palembang) atas informasi komprehensif yang menjadi landasan operasional penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Jauhari, Interviewee, *Data Volume Sampah Harian TPA Sukawinatan Periode Januari-September 2025*. [Wawancara]. 7 November 2025.
- [2] A. A. S. D. Tao, "Rancang Bangun Alat Pemilah Sampah Berbasis IoT," *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains*

- (JINTEKS), vol. 7, no. 3, pp. 1483-1491, 2025.
- [3] William, K. Kristanto, T. T. Hartanto, F. Tham dan F. Azmi, "Rancang Bangun Tempat Sampah Pintar Menggunakan Algoritma Fuzzy Logic Berbasis Arduino," *JITE (Journal Informatics Telecommunication Engineering)*, vol. 3, no. 1, pp. 150-155, 2019.
- [4] G. Alvianingsih, T. W. O. Putri dan P. Maharani, "Perancangan Sistem Monitoring Pada Pemilah Sampah Otomatis Berbasis Internet of Things Menggunakan Aplikasi Blynk," dalam *Prosiding Seminar Nasional Energi, Kelistrikan, Teknik Dan Informatika*, 2022.
- [5] D. S. Nugroho, S. Rosad dan N. Agustin, "Real Time Smart Trash Bin Monitoring System Using Fuzzy Logic Method in Kuripan Village," *Journal of Informatics, Information System, Software Engineering and Applications*, vol. 8106, no. 2622, pp. 70-79, 2023.
- [6] H. Cui dan N. Dahnoun, "High precision human detection and tracking using millimeter-wave radars," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 1, pp. 22-32, 2021.
- [7] M. H. Al-Ghifary, A. R. Prasetyio, K. Purnama dan M. H. Fathurrizqi, "Tempat Sampah Pintar Berbasis Arduino Uno Untuk Madrasah Nurul Iman," *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Terapan*, vol. 10, no. 1, pp. 1-6, 2023.
- [8] E. Azhari, R. Suppa dan M., "Rancang Bangun Pemilah Sampah Logam Dan Non Logam Otomatis," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 12, no. 3, 2024.
- [9] Haviluddin, H. S. Pakpahan, N. Puspitasari, G. M. Putra, R. Y. Hasnida dan R. Alfred, "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Waste Prediction," *Knowledge Engineering and Data Science*, vol. 5, no. 2, p. 122, 2022.
- [10] N. Nurjannah, M. Muchtar, S. Sarimuddin, K. Sya'ban, R. Karim dan M. N. Al Jum'ah, "Perancangan Smart Trash Bin Menggunakan Logika Fuzzy Berbasis Arduino Di Sdn 5 Mawasangka, Buton Tengah," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 12, no. 3, 2024.
- [11] Q. H. Ramadhany, A. R. Ramadhan dan M. Fauziah, "Deteksi Pernapasan Manusia Menggunakan Radar Fmcw 24 Ghz Untuk Multitarget Dalam Linear Dan Non-Linear," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 13, no. 3, pp. 416-422, 2025.
- [12] B. H. Prasetyo, M. H. H. Ichsan, H. Fitriyah dan E. R. Widasari, *Teknologi Sistem Cerdas dan Penerapan pada Embedded System*, Malang: Universitas Brawijaya Press, 2022.
- [13] F. Wahyunita, H. M. Putra dan M. Nuzuluddin, "Rancang Bangun Pemilah Sampah Logam, Plastik dan Organik Secara Otomatis Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Pengembangan Rekayasa Informatika dan Komputer*, vol. 1, no. 3, pp. 142-153, 2023.
- [14] R. Assolihin, "Perbandingan Teknologi Sensor Ultrasonik Dengan Metode Lain Untuk Pengukuran Jarak," Sumatera Utara, 2025.
- [15] U. Athiyah dan dkk., "Sistem Inferensi Fuzzy: Pengertian, Penerapan, dan Manfaatnya," *Jurnal DINDA*, vol. 1, no. 2, pp. 73-76, 2021.
- [16] A. A. Kurniawan, H. dan S. Rahmawati, "Smart Tong Sampah Pendeteksi Otomatis Sampah Organik & Anorganik Berbasis IoT Smart City," *Jurnal KomtekInfo*, vol. 11, no. 3, pp. 163-172, 2024.
- [17] N. Suryaningsih dan D. Febrianto, "Monitoring dan Pengendali Sistem Pemilah Sampah Menggunakan Sensor Proximity Induktif dan Aplikasi Blynk," dalam *Prosiding Seminar Nasional SI & Teknik Informatika*, 2025.