



Pengembangan Aplikasi Web Smart Waste Management Berbasis IoT dan Dashboard Spasial Untuk Optimasi Rute Pengangkutan Sampah

Muhammad Ammar Fariz Baihaqi, Kurniawan Dwi Irianto*

Fakultas Teknologi Industri, Prodi Sarjana Informatika, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
Jl. Kaliurang No.Km. 14,5, Krawitan, Umbulmartani, Kec. Ngemplak, Kabupaten Sleman, Yogyakarta, Indonesia

Email: ¹ammarfriz7@gmail.com, ^{2,*}k.d.irianto@uii.ac.id

Email Penulis Korespondensi: k.d.irianto@uii.ac.id

Submitted: 24/06/2026; Accepted: 12/07/2026; Published: 14/07/2026

Abstrak—Peningkatan volume sampah perkotaan memunculkan kendala logistik bagi UPTD Pelayanan Persampahan Kabupaten Sleman. Pola pengangkutan statis tanpa data kapasitas aktual memicu inefisiensi operasional. Penelitian ini bertujuan merancang sistem Smart Waste Management berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dasbor pemantauan spasial. Metode pengembangan menggunakan Waterfall, mencakup perangkat keras (ESP32 dan HC-SR04) serta antarmuka web. Transmisi telemetri ke server cloud menggunakan REST API untuk visualisasi real-time. Hasil pengujian menunjukkan akurasi pembacaan sensor 97,2% dengan rata-rata latensi jaringan 7,46 detik. Penilaian User Acceptance Test (UAT) dan uji black-box mencatat tingkat keberhasilan di atas 95%. Secara operasional, implementasi rute cerdas berhasil memangkas jarak tempuh armada harian dari 25 km menjadi 12 km (efisiensi bahan bakar 52%). Kontribusi penelitian ini terbagi dua aspek. Secara keilmuan, diusulkan arsitektur sistem terpadu yang menggabungkan telemetri IoT dan algoritma rute cerdas spasial. Secara praktis, sistem terbukti memangkas jarak tempuh armada dan menghemat konsumsi BBM 52%, menjadi solusi efektif mencegah penumpukan sampah dan mewujudkan logistik sanitasi yang efisien.

Kata Kunci: Internet of Things; Dasbor Spasial; Pengelolaan Sampah Pintar; Optimasi Rute; Efisiensi Bahan Bakar

Abstract—Increasing urban waste creates logistical hurdles for the Sleman Waste Services (UPTD). Static collection schedules without actual capacity data lead to operational inefficiencies. This study designs an Internet of Things (IoT)-based Smart Waste Management system integrated with a spatial dashboard to optimize collection efficiency. System development adopted the Waterfall method, encompassing hardware (ESP32 and HC-SR04) and web interfaces. Telemetry transmission utilizes a REST API for real-time visualization. Test results indicated a sensor accuracy of 97.2% with an average network latency of 7.46 seconds. User Acceptance Test (UAT) and black-box tests recorded success rates exceeding 95%. Operationally, the smart routing implementation successfully reduced the daily fleet travel distance from 25 km to 12 km (52% fuel efficiency). The main contribution is twofold. Scientifically, it proposes an integrated architecture combining IoT telemetry and spatial smart routing within a single platform. Practically, the system is proven to reduce fleet travel distance and achieve 52% fuel savings, providing an effective solution to prevent waste overload and realize efficient urban sanitation logistics.

Keywords: Internet of Things; Spatial Dashboard; Smart Waste Management; Route Optimization; Fuel Efficiency

1. PENDAHULUAN

Peningkatan volume limbah padat di kawasan perkotaan yang sejalan dengan laju urbanisasi memunculkan tantangan logistik dan sanitasi yang sangat kompleks bagi institusi pengelola kebersihan daerah. Permasalahan ini secara nyata dihadapi oleh Unit Pelaksana Teknis Daerah (UPTD) Pelayanan Persampahan Kabupaten Sleman yang hingga saat ini masih didominasi oleh penerapan metode pengangkutan sampah yang bersifat konvensional. Penjadwalan keberangkatan armada truk pengangkut berjalan secara statis dan terikat pada rute baku tanpa didasarkan pada data volume persampahan aktual yang ada di lapangan. Akibat dari ketiadaan visibilitas data secara real-time ini, armada seringkali harus mengeluarkan biaya bahan bakar dan membuang waktu operasional untuk mengunjungi titik-titik penampungan yang kapasitasnya ternyata belum penuh atau bahkan masih kosong. Di sisi lain, pada waktu yang bersamaan, seringkali terjadi penumpukan sampah hingga melebihi kapasitas wadah di wilayah lain yang kebetulan tidak masuk dalam jadwal prioritas hari itu. Apabila ketidakakuratan informasi logistik dan inefisiensi rute ini tidak segera diselesaikan melalui intervensi teknologi yang tepat guna, alokasi anggaran operasional daerah akan terus mengalami pemborosan yang signifikan, siklus pemeliharaan kendaraan akan semakin pendek, sekaligus secara langsung menurunkan kualitas standar sanitasi publik yang dirasakan oleh masyarakat.

Dalam konteks penelitian akademis dan rekayasa teknologi, gagasan mengenai digitalisasi sistem persampahan kota sesungguhnya telah banyak dikaji. Penelitian Hendradi dan Wahyono pada tahun 2025 [1] telah berhasil mengembangkan sistem informasi berbasis Internet of Things (IoT) untuk meminimalkan frekuensi pengangkutan, namun sistem tersebut masih berfokus pada pencatatan level sampah dan belum mengimplementasikan algoritma penjadwalan cerdas. Studi lain yang dilakukan Ishlakhuddin dkk. pada tahun 2025 [2] berfokus pada perancangan sistem peringatan dini sampah rumah tangga, akan tetapi pendekatan tersebut hanya menggunakan indikator kapasitas lokal berupa notifikasi buzzer tanpa melibatkan integrasi pemetaan geografis. Dari perspektif perangkat lunak, penelitian Syakira dkk. pada tahun 2025 [3] tercatat telah menggunakan dasbor visual untuk memetakan distribusi komposisi sampah di TPA. Sejalan dengan hal tersebut, Pratiwi dan Irianto pada tahun 2026 [4] juga telah mengembangkan aplikasi monitoring cerdas berbasis IoT yang mengevaluasi kapasitas wadah sampah secara real-time, namun proses input datanya masih manual. Sementara itu, penelitian Priyansah dkk. pada tahun 2025 [5] mengembangkan sentralisasi notifikasi kapasitas web, namun

fungsionalitasnya terbatas pada peringatan ambang batas tanpa kecerdasan buatan untuk rekomendasi rute. Tinjauan literatur komprehensif oleh Manik pada tahun 2024 [6] dan implementasi analisis spasial oleh Arsanti dkk. pada tahun 2024 [8] menegaskan bahwa pelacakan geospasial merupakan pilar penting, namun masih berfokus pada tataran teoritis.

Berdasarkan tinjauan dari berbagai penelitian terdahulu tersebut, terdapat kesenjangan penelitian yang sangat jelas. Penelitian Hendradi dan Wahyono pada tahun 2025 [1] serta Ishlahuddin dkk. pada tahun 2025 [2] masing-masing hanya berfokus pada instrumen sensor fisik tanpa mengintegrasikan dasbor spasial berbasis web. Sementara itu, penelitian Syakira dkk. pada tahun 2025 [3] dan Pratiwi dan Irianto pada tahun 2026 [4] telah memanfaatkan dasbor visual, namun belum mengimplementasikan otomasi rute dinamis. Belum ada sistem terintegrasi penuh antara perangkat IoT otonom, basis data cloud, dan visualisasi spasial web yang dilengkapi algoritma penentuan rute cerdas dalam satu kesatuan. Untuk menjawab research gap tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem Smart Waste Management berbasis IoT guna mengoptimalkan rute pengangkutan sampah.

Secara eksplisit, kontribusi utama dari penelitian ini terbagi menjadi dua aspek, yakni kontribusi keilmuan dan kontribusi praktis. Secara keilmuan, penelitian ini mengusulkan arsitektur sistem terpadu yang secara langsung menjawab celah penelitian sebelumnya, yakni dengan menggabungkan telemetri IoT real-time dan algoritma penentuan rute cerdas spasial yang otonom ke dalam satu platform kesatuan. Secara praktis, sistem yang dikembangkan memberikan solusi logistik konkret bagi instansi kebersihan daerah (UPTD), di mana penerapan rute cerdasnya terbukti secara empiris mampu memangkas jarak tempuh armada dan menghemat konsumsi bahan bakar minyak (BBM) hingga 52% [7], sekaligus berkontribusi dalam mitigasi emisi gas karbon perkotaan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Kerangka dan Tahapan Penelitian

Proses pengembangan sistem cerdas ini mengadopsi metode rekayasa perangkat lunak Waterfall yang berbasis pada kerangka Generic Process Framework [9]. Pemilihan metode linier ini didasarkan pada kebutuhan pengawasan ketat di setiap fase perancangan perangkat keras yang tidak mentolerir perubahan spesifikasi di pertengahan jalan. Pengujian sistem ini melibatkan variabel bebas berupa penerapan arsitektur Smart Waste Management, penggunaan sensor HC-SR04, modul ESP32, dan integrasi dasbor spasial, sedangkan variabel terikatnya adalah tingkat efisiensi operasional armada kebersihan UPTD. Tahapan penelitian diawali dengan analisis masalah terkait pemborosan bahan bakar armada melalui observasi lapangan di UPTD Pelayanan Persampahan Kabupaten Sleman. Observasi ini esensial untuk merumuskan indikator keberhasilan proyek, yang meliputi akurasi pembacaan jarak sensor, penentuan ambang batas latency, serta validasi sinkronisasi antarmuka aplikasi.

Infrastruktur fisik perangkat Internet of Things (IoT) dirakit, dikalibrasi, dan dikemas sehingga mampu membangkitkan paket muatan dalam format JSON menuju server basis data backend melalui saluran REST API. Pada sisi antarmuka klien, aplikasi diimplementasikan berupa web dashboard fungsional yang memiliki kapabilitas pemetaan geolokasi secara real-time. Evaluasi kelayakan produk akhir divalidasi secara komprehensif menggunakan pendekatan standar rekayasa perangkat lunak modern [9]. Sesi User Acceptance Test (UAT) dilakukan dengan pelibatan 10 partisipan yang diseleksi melalui metode purposive sampling. Sampel ini secara spesifik terdiri dari unsur manajerial UPTD, administrator pemantau sistem, dan elemen pengemudi truk logistik. Pengujian ini menggabungkan dua matriks evaluasi, yakni pengujian fungsional interaksi black-box menggunakan parameter matriks test case, dan observasi kualitatif User Acceptance Test (UAT) menggunakan instrumen kuesioner berskala Likert 1 hingga 5.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.2 Arsitektur dan Desain Sistem

Arsitektur perancangan sistem persampahan ini secara hierarkis dibagi ke dalam tiga lapisan operasional utama: Perception Layer, Network Layer, dan Application Layer [6]. Pada tingkatan terbawah yakni Perception Layer,

modul sensor ultrasonik HC-SR04 dipasang dengan orientasi menghadap lurus ke dasar penampungan (top-down) untuk meminimalkan hambatan rambat gelombang suara. Sensor ini secara elektronis diintegrasikan dengan mikrokontroler NodeMCU ESP32 [10] sebagai penyempurnaan teknologi dari purwarupa sebelumnya yang masih menggunakan Arduino [13]. Waktu jeda pantulan gelombang akustik (echo) dikonversi secara matematis menjadi persentase volume ruang kapasitas skala 0 hingga 100%.

Pada tingkatan Network Layer, transmisi pengiriman data dieksekusi secara nirkabel via modul Wi-Fi internal ESP32 melalui skenario HTTP POST menuju layanan REST API [10] yang disediakan oleh BaaS Supabase berbasis PostgreSQL [11]. Pemilihan infrastruktur cloud ini bertujuan mengeliminasi beban pemeliharaan infrastruktur server on-premise di instansi pemerintahan daerah. Pada tingkatan Application Layer, dasbor pemantauan spasial dikembangkan secara murni menggunakan pustaka antarmuka pengguna React.js. Guna mencegah potensi terjadinya lonjakan beban jaringan server akibat rutinitas polling tradisional secara berulang, skema komunikasi layar klien secara cerdas mengadopsi protokol komunikasi WebSockets (Supabase Realtime). Keputusan arsitektural ini memastikan bahwa perubahan status indikator kapasitas persentase sampah dan pergeseran penanda warna geografis pada layar peramban operator akan senantiasa diperbarui secara seketika selaras dengan detik pancaran telemetri dari sensor lapangan.

2.3 Skenario Pengujian Sistem

Evaluasi fungsional disusun ketat mengikuti standar hierarki pengujian perangkat lunak [12] melalui tiga skenario utama. Skenario eksperimen pertama berfokus pada instrumen fisik dengan mengkalibrasi akurasi sensor HC-SR04 terhadap penggaris fisik untuk menemukan tingkat error rate. Skenario kedua bertujuan mengukur keandalan jaringan transmisi dengan mencatat rentang waktu tunda sejak sensor mendeteksi perubahan elevasi sampah fisik hingga terjadinya pembaruan antarmuka di layar dasbor, di mana target toleransi maksimal yang ditolerir adalah 30 detik. Skenario eksekusi ketiga mengevaluasi fungsionalitas murni melalui Black-Box Testing pada fitur autentikasi dan logika algoritma pemetaan. Algoritma smart routing pada dasbor dirancang dengan logika filterisasi threshold, di mana sistem secara otonom akan mengeliminasi titik koordinat TPS berstatus aman (<50%) dan siaga (50-70%), lalu hanya menarik garis jarak spasial terpendek yang menghubungkan titik-titik TPS berstatus kritis (>70%). Tahapan ini dilanjutkan dengan validasi User Acceptance Test (UAT) kepada staf UPTD Sleman.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

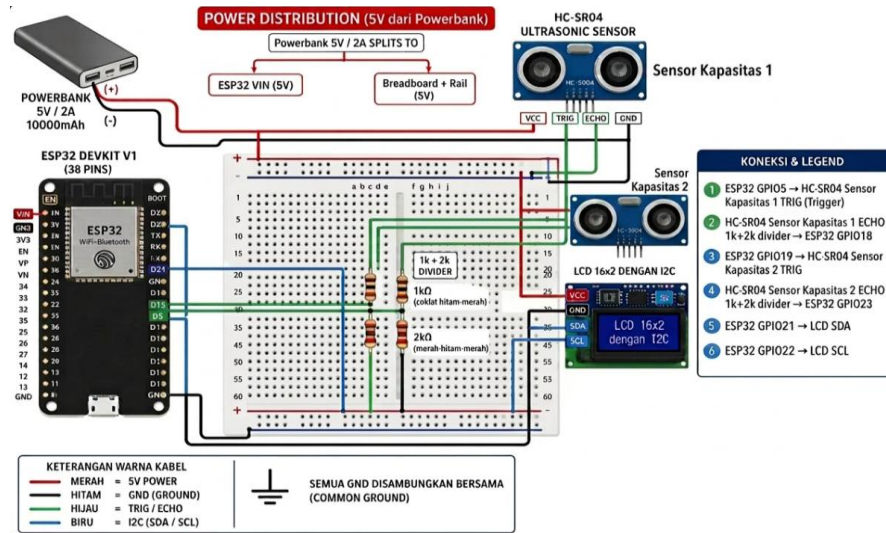
Pengembangan purwarupa sistem inovatif ini berfokus pada dua domain arsitektur fungsional utama, yakni perakitan modul instrumen deteksi lingkungan fisik pada wadah sampah dan penggelaran portal pemantauan manajemen logistik berbasis komputasi web [13]. Keseluruhan hasil integrasi kemudian dievaluasi secara holistik untuk memvalidasi tingkat reliabilitas mekanikal, stabilitas jaringan, serta dampak operasional logistik bagi instansi UPTD Pelayanan Persampahan Sleman [14].

3.1 Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

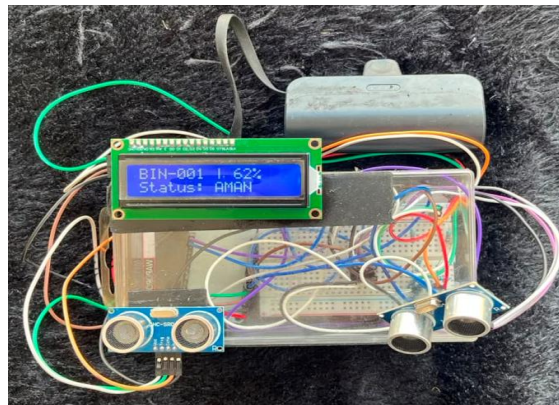
Modul sensor ultrasonik HC-SR04 ditempatkan secara vertikal di bagian penutup wadah sampah. Posisi ini krusial untuk mencegah pantulan gelombang suara asimetris yang kerap diakibatkan oleh gundukan limbah yang tidak merata [15]. Mikrokontroler ESP32 diprogram dengan firmware yang menghitung durasi pantulan echo ultrasonik dan mengonversinya menjadi persentase ruang tersisa secara proporsional [1]. Integrasi antara mikrokontroler ini dengan sensor ultrasonik untuk kalkulasi kapasitas wadah secara otonom telah terbukti efisien pada perancangan purwarupa sistem persampahan cerdas terkini yang dilakukan oleh Pratama dan Irianto pada tahun 2026 [16]. Perangkat ini juga dilengkapi dengan antarmuka layar Liquid Crystal Display (LCD) fisik untuk mempermudah inspeksi visual teknisi lapangan. Mengingat komponen sensor HC-SR04 mengonsumsi daya operasi pada 5 Volt sedangkan port logika internal ESP32 hanya mampu menerima sinyal maksimal 3,3 Volt, maka sebuah sirkuit penurun tegangan menggunakan resistor 1 kOhm dan 2 kOhm dirangkai secara seri. Modifikasi tegangan ini wajib dilakukan untuk mereduksi level sinyal echo menjadi tingkat aman 3,33 Volt guna mencegah kerusakan pada pin GPIO mikrokontroler, sebagaimana juga diterapkan pada penelitian Zakhir dan Maulana pada tahun 2024 [17].

Seluruh komponen elektronik tersebut kemudian dikemas dalam kotak pelindung berbahan insulasi kedap air untuk melindunginya dari paparan cuaca eksternal dan kelembapan gas metana pada limbah organik. Pemasangan kotak pelindung ini direkatkan secara mekanis pada penutup wadah menggunakan baut penahan agar posisi sensor tidak bergeser atau lepas saat penutup dibuka dan ditutup dengan intensitas tinggi oleh pengguna maupun petugas pengangkut harian. Pemilihan tata letak dan pengemasan yang ringkas ini memastikan bahwa purwarupa perangkat keras IoT memiliki durabilitas fisik yang tinggi dan siap untuk dioperasikan dalam jangka waktu panjang di lingkungan luar ruangan.

Pendekatan desain mekanis ini juga secara langsung dirancang untuk mempermudah proses pemeliharaan atau penggantian komponen oleh teknisi di kemudian hari tanpa perlu membongkar modul kerangka utama secara keseluruhan.



Gambar 2. Perangkaian Antar Komponen



Gambar 3. Penempatan Prototipe Perangkat Keras pada Penutup Wadah Sampah

3.2 Arsitektur Basis Data dan Pengamanan Jaringan

Pada lapisan backend, platform Supabase yang dibangun di atas fondasi relasional PostgreSQL [18] digunakan untuk mengatur skema arsitektur data secara robust [19]. Struktur penyimpanan terpusatnya dioptimasi dengan sangat ketat ke dalam tiga bentuk tabel: tabel bins untuk mendata profil dimensi fisik wadah dan koordinat geografis, tabel readings yang berfungsi menyimpan arsip deret waktu pergerakan metrik sampah, dan tabel alerts untuk menyimpan log historis peringatan batas kapasitas kritis. Format pengiriman telemetry mikrokontroler dikonversi menggunakan struktur JSON untuk memastikan konsumsi paket data internet yang minimalis. Seluruh lajur transmisi data dilindungi melalui lapisan autentikasi API Keys dan implementasi otorisasi Row Level Security (RLS) PostgreSQL untuk menggagalkan upaya eksploitasi man-in-the-middle attacks [20]. Protokol keamanan ganda ini secara efektif menjaga kerahasiaan data lokasi operasional logistik dari akses pihak asing yang tidak berwenang.

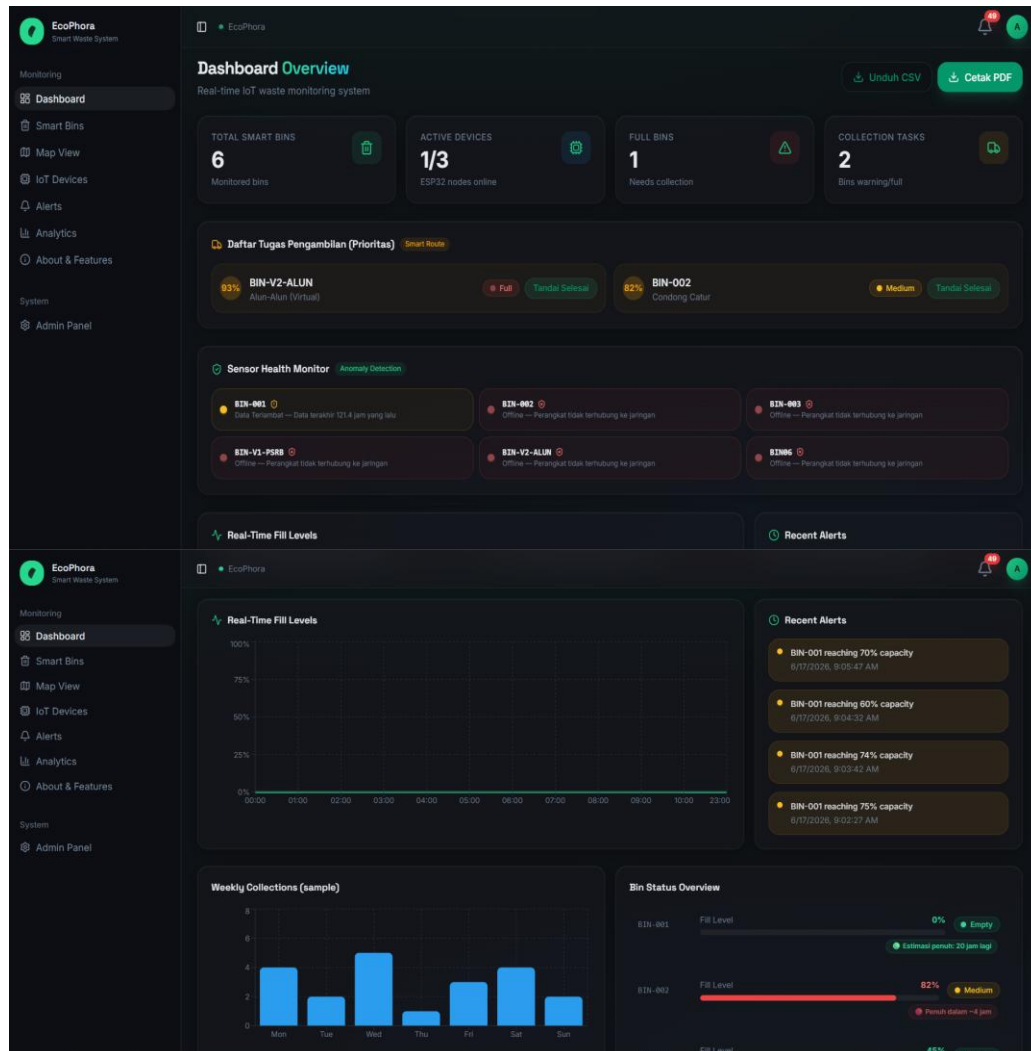
3.3 Pengembangan Web Antarmuka Interaktif

Pada lapisan client-side, antarmuka web dikompilasi secara utuh menggunakan pustaka React.js. Pendekatan Virtual DOM dari kerangka kerja React memberikan keuntungan fundamental dalam optimasi rendering antarmuka, di mana indikator persentase level sampah dapat berubah secara seketika tanpa mengharuskan sistem memuat ulang halaman [21]. Pemetaan topologi kota memanfaatkan pustaka open-source Leaflet, di mana warna titik koordinat diubah wujudnya secara otomatis melalui aliran intervensi protokol WebSockets Supabase Realtime [22]. Portal dashboard ini didesain dengan hierarki navigasi estetik, dimulai dengan Halaman Auth sebagai gerbang keamanan kredensial internal [23].

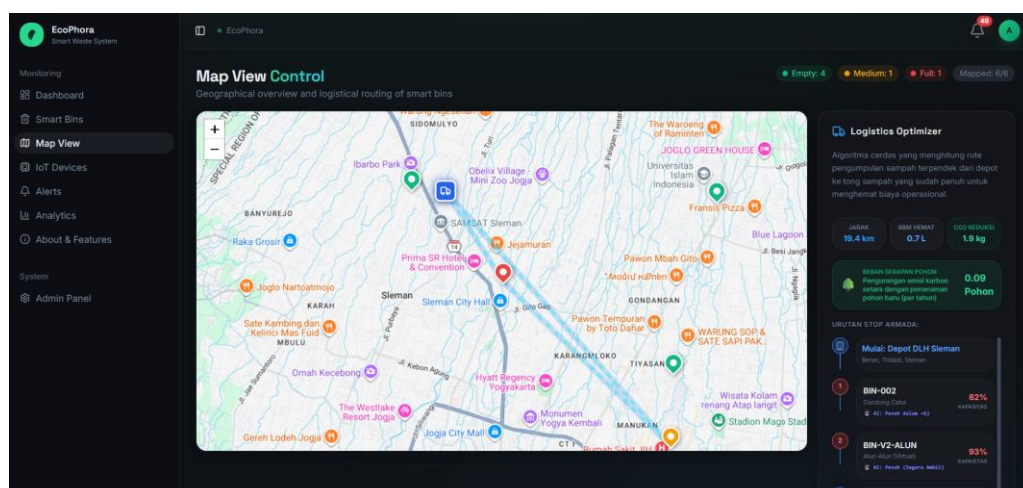
Fitur pembeda sistem ini terletak pada halaman Map View interaktif. Halaman ini memvisualisasikan seluruh titik wadah yang beroperasi di lapangan menggunakan indikator warna visual intuitif, hijau untuk status aman di bawah 50%, kuning untuk peringatan siaga 50-70%, dan warna merah untuk representasi muatan kritis di atas batas 70%. Secara eksklusif, peta interaktif ini memuat fungsionalitas optimasi rute otomatis yang secara algoritmik akan menarik garis rute terpendek menyusuri jalan raya khusus untuk menjangkau titik-titik persinggahan berstatus kritis saja [7]. Terakhir, modul Admin Panel menyediakan antarmuka form interaktif bagi

manajerial UPTD untuk meregistrasi modul sensor baru atau mereposisi koordinat TPS tanpa bersinggungan sedikitpun dengan kode pemrograman mentah [21].

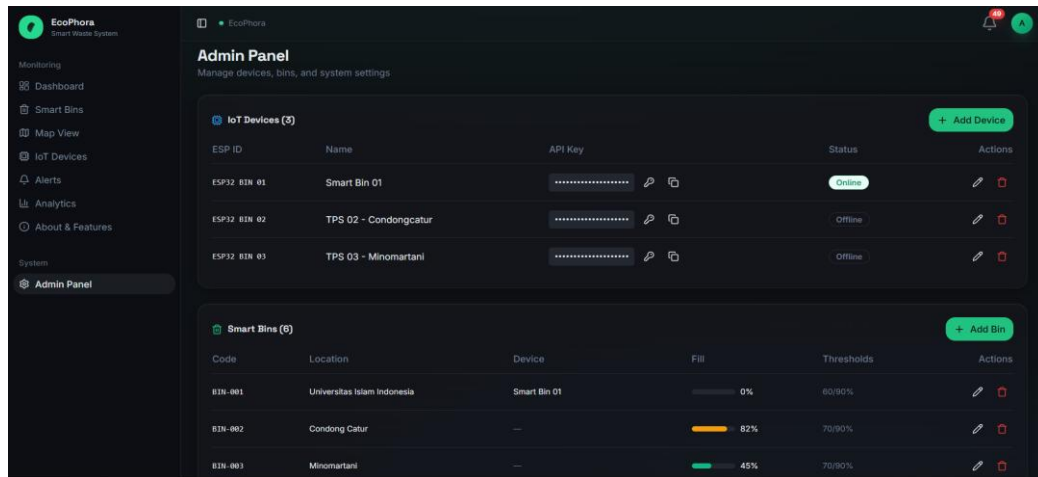
Seluruh antarmuka grafis ini dikembangkan menggunakan kerangka kerja Tailwind CSS untuk memastikan tampilan visual yang konsisten, modern, dan sangat responsif ketika diakses melalui berbagai ukuran layar perangkat, mulai dari monitor ruang kontrol UPTD hingga perangkat seluler petugas di lapangan. Pendekatan desain web modern ini secara efektif memperkecil ukuran bundel aplikasi sehingga waktu muat halaman menjadi jauh lebih cepat dan ringan saat diakses.



Gambar 4. Halaman Dashboard Overview



Gambar 5. Halaman Map View dan Optimasi Rute



Gambar 6. Halaman Admin Panel

3.4 Skenario Kalibrasi dan Akurasi Sensor

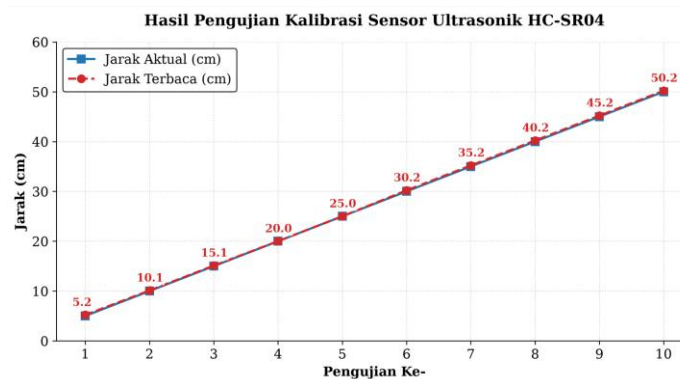
Pengujian validasi kalibrasi komponen sensor HC-SR04 dijalankan dengan mencatat selisih pengukuran jarak penghalang benda fisik yang divariasikan dari 5 cm hingga membentang ke batas 50 cm. Nilai kalkulasi komputasi ini dibandingkan korelasi presisinya terhadap pembacaan alat ukur manual. Berdasarkan rekapitulasi pengujian pada Grafik Pengujian Sensor, tingkat fluktuasi perbedaan pembacaan mikrokontroler menunjukkan konsistensi margin pada kisaran resolusi milimeter, persisnya di rentang deviasi 0,0 cm hingga maksimal 0,2 cm. Pengukuran tingkat galat (error) dan akurasi sensor dihitung berdasarkan persamaan (1), (2), dan (3).

$$\text{Kapasitas (\%)} = ((\text{Tinggi Total} - \text{Jarak Ukur}) / \text{Tinggi Total}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Error (\%)} = |(\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Aktual}) / \text{Nilai Aktual}| \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Akurasi (\%)} = 100\% - \text{Error (\%)} \quad (3)$$

Ditarik secara statistik komputasi, ekuivalensi rata-rata tingkat akurasi kinerja sensor berhasil dipertahankan pada angka 97,2%. Sejalan dengan hal tersebut, persentase error rate terekam di angka minimalis sebesar 2,8%. Stabilitas margin kesalahan yang luar biasa kecil ini menjadi pembuktian autentik bahwa kapabilitas instrumen penginderaan jarak jauh tersebut telah mencapai presisi level operasional yang stabil. Validitas keakuratan pembacaan inilah yang akan berfungsi mencegah anomali data kapasitas false alarm yang berpotensi membingungkan pengambilan keputusan navigasi sopir truk logistik harian [15].



Gambar 7. Hasil Pengujian Sensor

3.5 Analisis Latensi Sinkronisasi Jaringan

Pengujian latensi jaringan bertujuan untuk memastikan bahwa pembaruan data dari sensor ke antarmuka web berlangsung dalam batas waktu real-time. Waktu latensi diukur menggunakan stopwatch, dihitung sejak sensor mendeteksi perubahan volume sampah di dalam wadah hingga tercatatnya pembaruan persentase dan perubahan warna marker koordinat di halaman peramban web administrator pusat.

Dari serangkaian percobaan pengiriman berulang, rata-rata latensi transmisi dari mikrokontroler ke layar web tercatat sebesar 7,46 detik. Angka ini berada jauh di bawah ambang batas toleransi maksimal 30 detik yang ditetapkan sebagai standar kelayakan sinkronisasi jaringan sistem komunikasi peringatan dini IoT [24]. Kecepatan respons latensi ini sangat mendasar bagi responsivitas pengambilan keputusan operasional oleh operator UPTD secara real-time.

3.6 Pengujian Fungsional Sistem Perangkat Lunak

Validitas kode aplikasi web administratif dieksekusi melalui pendekatan Black-Box Testing guna memastikan integritas interaksi pengguna terbebas dari celah interupsi error. Spektrum pengujian menyelidiki lima skenario skrip operasional pokok: (1) validitas enkripsi mekanisme perlindungan autentikasi halaman login, (2) simulasi operasional CRUD dan pergeseran pin pemetaan koordinat (Map Picker tool), (3) tes stabilitas komunikasi transmisi data dua arah protokol aliran WebSockets, (4) sistem aktuasi peringatan visual berstatus siaga kritis (di atas ambang pemicuan kapasitas 90%), dan terakhir (5) uji komputasi pemrosesan penggambaran poligon garis rute logistik cerdas. Merangkum pelaporan matriks pengujian pengembang, instrumen antarmuka React JS mencatatkan indeks kelulusan sempurna 100% execution success rate pada keseluruhan parameter skenario tersebut tanpa ditemukannya satu pun kebocoran memori.

Tabel 1. Hasil Pengujian Black-Box

No	Skenario Pengujian	Parameter Uji	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Kesimpulan
A	Fungsionalitas Autentikasi				
1	Login kredensial divalidasi	Input: Username & Password admin	Akses diterima ke dasbor utama	Sesuai	Berhasil
B	Pemetaan dan Optimasi Rute				
2	Pergeseran pin koordinat TPS	Tindakan: Drag & Drop pin TPS	Posisi marker berubah di peta	Sesuai	Berhasil
3	Eksekusi fitur Smart routing	Syarat: TPS berkapasitas >70%	Garis rute memetakan TPS merah	Sesuai	Berhasil
C	Sinkronisasi Data Real-Time				
4	Perubahan jarak sensor di wadah	Variasi benda penghalang fisik	Indikator % di web ikut berubah	Sesuai	Berhasil
5	Pemicuan peringatan batas >70%	Status level sampah menyentuh 71%	TPS berubah merah & picu log	Sesuai	Berhasil

3.7 Evaluasi Pengalaman Pengguna

Sistem dihadapkan pada indeks uji validasi penerimaan staf operasional nyata melalui perhelatan survei User Acceptance Test (UAT). Pengambilan data opini kualitatif difasilitasi dengan menggunakan alat instrumen kuesioner berskala Likert 1 hingga 5. Survei lapangan ini melibatkan 10 partisipan perwakilan dari hierarki internal instansi UPTD Pelayanan Persampahan Sleman, mencakup elemen pimpinan unit, administrator komando sistem, dan barisan pengemudi armada.

Tabulasi respons data kuesioner berhasil menjaring dominasi mayoritas persetujuan tingkat kepuasan yang absolut. Sistem memanen perolehan skor agregat sebesar 95% untuk predikat nilai Excellent. Metrik pencapaian tingkat survei penerimaan teknologi tinggi ini mendemonstrasikan opini bulat staf UPTD bahwa interaktivitas desain antarmuka dasbor sistem sangat ramah pemula. Di sisi fungsionalitas strategis, pengguna menyepakati bahwa integrasi peta dinamisnya secara substansial sangat membantu institusi dalam merumuskan penyusunan efisiensi strategi modifikasi jadwal operasional harian pengiriman armada truk yang lebih taktis [25].

3.8 Dampak Operasional dan Efisiensi Logistik

Keandalan transmisi data IoT secara real-time memberikan dampak yang signifikan terhadap efisiensi logistik melalui implementasi skenario optimasi rute armada yang dinamis. Berdasarkan rekam jejak manajemen konvensional UPTD Pelayanan Persampahan Kabupaten Sleman sebelum penerapan sistem cerdas ini, institusi menjalankan pola pengangkutan statis yang mengharuskan armada truk mengunjungi seluruh titik lokasi Tempat Pembuangan Sementara (TPS). Rutinitas konvensional ini membebani operasional fisik, memaksa armada untuk menelusuri seluruh radius titik lokasi dengan jarak tempuh harian rata-rata yang konstan mencapai 25 kilometer [1]. Jarak tempuh yang jauh ini dilakukan secara pasif tanpa mempertimbangkan data aktual mengenai persentase kekosongan atau kepadatan volume sampah di masing-masing wadah.

Kondisi tersebut berubah secara terukur setelah dilakukannya aktivasi fitur filter ambang batas kapasitas kritis pada level 70% melalui dasbor aplikasi. Sistem otomatisasi peta digital secara algoritmik mendeduksi dan mengeliminasi titik-titik koordinat TPS yang masih berada pada volume rendah, yakni yang berstatus aman (indikator hijau) dan siaga (indikator kuning). Dalam pengujian observasi rute lapangan, komponen spasial Leaflet memprioritaskan rekomendasi kunjungan armada hanya pada empat lokasi TPS yang telah mencapai ambang batas kritis (indikator merah). Penarikan garis rute prioritas berbasis data ini mencatatkan keberhasilan yang terukur

dalam mereduksi jarak operasional armada. Secara komparatif, jarak tempuh yang sebelumnya selalu berada di angka 25 kilometer per sesi pengangkutan berhasil direduksi secara substansial menjadi hanya 12 kilometer.

Lebih lanjut, penyusutan jarak tempuh operasional armada truk ini berkontribusi langsung pada peningkatan efisiensi ekonomi operasional UPTD. Analisis data konsumsi bahan bakar menunjukkan bahwa pemangkasan rasio jarak tempuh berjalan proporsional dengan penurunan kebutuhan logistik armada. Sebelum implementasi sistem, proyeksi konsumsi bahan bakar solar mencapai 150 liter per bulan untuk mengakomodasi jarak tempuh 25 kilometer harian. Dengan adanya pemangkasan rute menjadi 12 kilometer, sistem terkonfirmasi mampu menekan tingkat konsumsi bahan bakar solar hingga mencapai 72 liter per siklus operasional 30 hari.

Secara kalkulasi matematis, sistem perutean cerdas otonom ini berhasil menekan beban transportasi institusi dengan tingkat efisiensi penghematan bahan bakar mencapai 52% [25]. Selain memberikan perbaikan pada neraca anggaran operasional UPTD terkait alokasi bahan bakar, berkurangnya frekuensi dan jarak tempuh truk pengangkut sampah ini juga berperan sebagai solusi konkret dalam mendukung tata kota yang ramah lingkungan. Pengurangan aktivitas operasional mesin pembakaran internal dari armada logistik ini berkontribusi langsung dalam menekan emisi gas buang, sehingga turut meminimalkan jejak karbon dioksida di wilayah operasional Kabupaten Sleman [6][7].

3.9 Pembahasan

Temuan pada penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi sensor ultrasonik HC-SR04 dan mikrokontroler ESP32 mampu mencapai tingkat akurasi 97,2% dengan error 2,8%. Hasil ini lebih presisi dibandingkan temuan pada penelitian Ishlahuddin dkk. pada tahun 2025 [2] yang masih mengandalkan indikator lampu lokal tanpa pembacaan persentase numerik. Selain itu, kecepatan transmisi data pada sistem ini mencatatkan rata-rata latensi sebesar 7,46 detik. Kecepatan ini terbukti lebih responsif dibandingkan sistem pelaporan berbasis notifikasi web yang dikembangkan dalam penelitian Priyansah dkk. pada tahun 2025 [5].

Keunggulan paling krusial dari penelitian ini terletak pada implementasi algoritma smart routing di dalam dasbor pemantauan spasial, sebuah fitur yang berhasil menutupi kesenjangan pada penelitian Syakira dkk. pada tahun 2025 [3] dan Pratiwi dan Irianto pada tahun 2026 [4] yang belum memiliki kecerdasan perutean otonom. Melalui pemetaan rute prioritas yang hanya menyasar TPS berstatus kritis (>70%), penelitian ini secara empiris membuktikan bahwa jarak tempuh harian armada dapat direduksi dari 25 km menjadi 12 km, setara dengan efisiensi BBM solar sebesar 52%. Pencapaian ini sekaligus memvalidasi teori efisiensi logistik geospasial yang sebelumnya hanya dikaji pada tataran konseptual oleh Manik pada tahun 2024 [6] dan Arsanti dkk. pada tahun 2024 [8].

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem Smart Waste Management terpadu yang mengintegrasikan penginderaan IoT (ESP32 dan HC-SR04) dengan aplikasi dasbor monitoring spasial berbasis web. Sistem ini terbukti sukses menjawab permasalahan inefisiensi pengangkutan sampah di UPTD Pelayanan Persampahan Kabupaten Sleman melalui komunikasi data secara real-time. Hasil pengujian teknis menunjukkan bahwa implementasi sensor berjalan sangat baik dengan akurasi pembacaan sebesar 97,2% (error 2,8%) dan rata-rata latensi transmisi nirkabel secepat 7,46 detik. Dari sisi antarmuka, dasbor pemantauan terbukti informatif dan mudah dipahami, dibuktikan dengan kelulusan uji black-box secara menyeluruh dan capaian indeks kepuasan User Acceptance Test (UAT) sebesar 95%. Secara operasional, implementasi fungsionalitas algoritma optimasi rute cerdas mampu mereduksi jarak tempuh harian armada truk secara signifikan dari 25 kilometer menjadi 12 kilometer. Optimalisasi ini berimplikasi langsung pada penghematan pengeluaran bahan bakar solar operasional sebesar 52%, sekaligus berkontribusi dalam memitigasi emisi gas buang perkotaan. Sebagai rekomendasi pengembangan di masa depan, sistem perangkat keras dapat dikembangkan dengan mengadopsi modul transmisi seluler mandiri agar penyebaran sensor IoT di luar ruangan tidak bergantung pada ketersediaan jaringan Wi-Fi. Kontribusi keilmuan penelitian ini terletak pada keberhasilannya mengusulkan arsitektur sistem terpadu yang mengintegrasikan telemetri IoT real-time dengan algoritma penentuan rute cerdas spasial dalam satu platform kesatuan, sehingga menutupi kesenjangan penelitian pada studi persampahan terdahulu yang hanya berfokus pada satu aspek saja. Kontribusi praktis penelitian ini dibuktikan melalui hasil empiris berupa reduksi jarak tempuh armada dari 25 km menjadi 12 km, penghematan konsumsi bahan bakar solar sebesar 52%, serta berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon operasional harian di wilayah Kabupaten Sleman.

REFERENCES

- [1] P. Hendradi and A. Wahyono, "Pemodelan Sistem Informasi Berbasis IoT untuk Optimasi Pengelolaan Sampah Perkotaan (Studi Kasus: Pemantauan Level Tempat Sampah Pintar)," *Jurnal TechLINK*, vol. 9, no. 1, pp. 16–30, 2025.
- [2] F. Ishlahuddin, E. Mulyani, and E. Ismantohadi, "Penerapan Smart Trash Monitoring System untuk Memantau Sampah Rumah Tangga di Perumahan Graha Panyindangan Estate Indramayu," *Karya Nyata: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, vol. 2, no. 4, pp. 224–239, Dec. 2025, doi: 10.62951/karyanyata.v2i4.2600.



- [3] R. Syakira, B. Beny, and A. Husaein, “Pengembangan Dashboard Pengelolaan Sampah Berbasis Komposisi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA),” *Jurnal Informatika Dan Rekayasa Komputer (JAKAKOM)*, vol. 5, no. 1, pp. 1455–1464, 2025, doi: 10.33998/jakakom.2025.5.1.2277.
- [4] A. N. Pratiwi and K. D. Irianto, “Pengembangan Aplikasi Monitoring Tempat Sampah Cerdas Berbasis Internet of Things,” *Technologia: Jurnal Ilmiah*, vol. 17, no. 2, p. 501, Apr. 2026, doi: 10.31602/tji.v17i2.23202.
- [5] A. Priyansah, M. Adam, T. Arrahman, and N. A. I. Sakdiyah, “Kotak Sampah Pintar berbasis IoT Menggunakan ESP 32 dan Sensor Ultrasonik,” *Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE)*, vol. 7, no. 2, pp. 176–187, Aug. 2025, doi: 10.20895/jtece.v7i2.1844.
- [6] S. L. C. Manik, “Smart Waste Management System for Smart & Sustainable City of Indonesia’s New State Capital: A Literature Review,” *E3S Web of Conferences*, vol. 500, p. 02015, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202450002015.
- [7] A. D. Zahira, E. B. Setyawan, and Y. Prambudia, “Optimalisasi Rute Distribusi Produk Frozen Untuk Meminimasi Biaya Transportasi dan Gas Emisi Pada PT. Sukanda Djaya Dengan Metode Algoritma Genetika,” *Journal of Production, Enterprise, and Industrial Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 1–12, Jan. 2025, doi: 10.25124/jpeia.v2i2.8719.
- [8] V. Arsanti et al., “Spatial Analysis of Waste Management Facility Distribution Using GIS,” *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology (ASSET)*, vol. 6, no. 4, 2024, doi: 10.26877/asset.v6i4.996.
- [9] A. Purnomo, *Buku Ajar Rekayasa Perangkat Lunak*. Sonpedia Publishing Indonesia, 2024.
- [10] M. M. Raju, P. S. Dilip, S. Sonali Bandopant, K. A. Annaso, and A. R. K. Patole, “Smart Waste Management System Using ESP32,” *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology (IRJIET)*, vol. 8, no. 4, pp. 280–284, 2024, doi: 10.47001/IRJIET/2024.804043.
- [11] R. Simbulan and J. Aryanto, “Implementasi REST API Web Services pada Aplikasi Sumber Daya Manusia,” *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi (JIMIK)*, vol. 5, no. 1, pp. 552–560, 2024, doi: 10.35870/jimik.v5i1.511.
- [12] C. Coronel and S. Morris, *Database Systems: Design, Implementation, & Management*. Cengage Learning, 2023.
- [13] R. Trisudarmo, M. I. Syabani, D. Triyadi, F. P. Pratama, and D. F. Sulistiani, “Tempat Sampah Pintar Berbasis IoT Dengan Menggunakan Arduino Uno R3,” *Jurnal Borneo Informatika dan Teknik Komputer*, vol. 4, no. 2, pp. 44–50, 2024, doi: 10.35334/jbit.v4i2.
- [14] R. Agustino, M. I. Saputro, H. Gustiawan, M. A. Sakaria, and F. Widyahastuti, “Inovasi Pengelolaan Sampah: Tempat Sampah Pintar Berbasis IoT di Museum MH. Thamrin Jakarta,” *Jurnal Teknologi Informatika dan Komputer*, vol. 10, no. 1, pp. 309–325, Mar. 2024, doi: 10.37012/jtik.v10i1.2129.
- [15] A. Adhamatika, B. A. Salsabilah, D. Triardianto, D. A. Putri, and S. C. Yuansah, “Pengujian Akurasi Sensor Ultrasonik HC-SR04 dalam Mengukur Jarak Suatu Benda,” *Prosiding National Conference on Innovative Agriculture (NaCIA)*, vol. 2, no. 1, 2024, doi: 10.25047/nacia.v2i1.236.
- [16] T. N. Pratama and K. D. Irianto, “Integrasi Sensor Ultrasonik dan ESP32 pada Sistem Tempat Sampah Cerdas,” *Technologia: Jurnal Ilmiah*, vol. 17, no. 2, p. 570, Apr. 2026, doi: 10.31602/tji.v17i2.23255.
- [17] Z. Zakhrir and H. Maulana, “Smart Blind Stick Design Using HC-SR04 Sensor and ESP32 Based Water Level Sensor to Improve the Mobility of Blind Persons,” *Tsabit Journal of Computer Science*, vol. 1, no. 2, pp. 60–67, 2024, doi: 10.56211/tsabit32.
- [18] F. Rasyaad and S. A. Wibowo, “Developing a Scalable Next.js Platform for IoT Monitoring Using Backend-as-a-Service with a Comparison of Supabase and Firebase,” in *2025 International Conference on Computer Sciences, Engineering, and Technology Innovation (ICoCSETI)*, 2025, pp. 421–426. doi: 10.1109/ICoCSETI63724.2025.11018944.
- [19] L. S. Khaerunnisa, M. R. S. Al Qodr, J. W. D. Putri, J. R. Firdaus, and C. Rozikin, “Optimasi Proses Data Warehouse Menggunakan Partisi dan Indexing pada PostgreSQL untuk Meningkatkan Performa Query,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, Oct. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.8012.
- [20] H. Fereidouni, O. Fadeitseva, and M. Zalai, “IoT and Man-in-the-Middle Attacks,” *Security and Privacy*, vol. 8, no. 2, Mar. 2025, doi: 10.1002/spy2.70016.
- [21] M. D. Dermawan, H. Suroyo, A. Wijaya, and Jemakmun, “Pengembangan Web Admin Aplikasi Pulsa Dengan ReactJS Menggunakan Metode Rapid Application Development,” *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis (JTEKSIS)*, vol. 6, no. 2, pp. 388–396, 2024, doi: 10.47233/jteksis.v6i2.1337.
- [22] K. A. Mariyama, N. Rachmaningrum, and W. M. Hadiansyah, “Sistem Monitoring Kualitas Udara di Dalam Ruangan Berbasis IoT,” in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika (SNESTIK)*, 2024, doi: 10.31284/p.snestik.2024.5647.
- [23] A. Hafsari and H. Harjono, “Analisis Keamanan Website Menggunakan Metode Vulnerability Assessment,” *TIN: Terapan Informatika Nusantara*, vol. 4, no. 11, pp. 698–708, 2024.
- [24] V. D. Saputri and R. A. Febriani, “Study on the Effect of Edge Computing on Latency in IoT Applications,” *Jurnal Komputer Indonesia*, vol. 3, no. 1, pp. 33–36, 2024, doi: 10.37676/jki.v3i1.572.
- [25] A. K. Afkarien, I. G. P. Astawa, and F. Nadziroh, “Development of IoT-Based Smart Waste Management Systems for Organic and Non-Organic Waste in Smart Cities,” *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 14, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.33022/ijcs.v14i2.4606.