

RANCANG BANGUN SISTEM INFORMASI BANK SAMPAH BERBASIS IOT DENGAN MEKANISME VALIDASI BERLAPIS SECARA REAL-TIME

Irmayani¹⁾, *Riadi Marta Dinata²⁾, Fivit Marwita³⁾, Ariman⁴⁾, Marhaeni⁵⁾

^{1) 3) 4)} Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi Informasi, ISTN

²⁾ Teknik Informatika, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, ISTN

⁵⁾ Sistem Informasi, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, ISTN

riadimrt@gmail.com

ABSTRAK

Pengelolaan bank sampah berbasis komunitas di Indonesia masih menghadapi tantangan mendasar berupa ketergantungan pada pencatatan manual yang rawan kesalahan dan tidak terhubung dengan perangkat sensor di lapangan. Penelitian ini merancang dan membangun sistem informasi bank sampah yang mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan platform web berbasis PHP dan MySQL melalui arsitektur alur data berlapis tiga tingkat. Tingkat pertama adalah akuisisi data sensor, di mana ESP32 mengirimkan data berat dan jarak ke server melalui HTTP POST dan menyimpannya sementara pada tabel buffer *tb_temp*. Tingkat kedua adalah validasi, di mana operator menggunakan antarmuka berbasis AJAX yang membaca data sensor secara real-time tanpa *refresh* halaman, melengkapi informasi kategori dan jenis sampah, serta menyimpan rekaman ke *tb_validasi* dengan subtotal yang dihitung otomatis. Tingkat ketiga adalah pencairan digital, di mana Admin menyeleksi rekaman validasi yang belum dicairkan dan memproses pembayaran yang tercatat di *tb_pencairan*. Sistem menerapkan kendali akses berbasis peran untuk dua tingkat pengguna, yaitu Admin dengan kewenangan pengelolaan data penuh, dan Pengguna yang dapat memantau riwayat transaksi akun sendiri. Pengujian fungsional *black-box* terhadap 23 kasus uji pada tujuh modul menunjukkan tingkat keberhasilan 100%. Kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi alur dari pembacaan sensor langsung ke transaksi bernilai ekonomi dalam satu platform terpadu berbasis web, sebuah pendekatan yang belum ditemukan secara komprehensif pada sistem-sistem bank sampah sejenis yang telah dipublikasikan sebelumnya.

Kata Kunci: bank sampah; ESP32; IoT; sistem informasi; validasi berlapis; pencairan digital; real-time

ABSTRACT

Physics Community-based waste bank management in Indonesia continues to face fundamental challenges in the form of manual recording practices that are error-prone and disconnected from physical sensors in the field. This study designs and develops a waste bank information system that integrates an ESP32 microcontroller with a PHP and MySQL web platform through a three-tier layered data flow architecture. The first tier is sensor data acquisition, in which the ESP32 transmits weight and distance data to the server via HTTP POST and stores it temporarily in a buffer table (*tb_temp*). The second tier is validation, in which an operator uses an AJAX-based interface that reads sensor data in real-time without page refresh, supplements it with waste category and type information, and saves the record to *tb_validasi* with an automatically calculated subtotal. The third tier is digital disbursement, in which the Admin selects undisbursed validation records and processes payments recorded in *tb_pencairan*. The system implements role-based access control for two user levels: Admin with full data management authority, and User who can monitor their own transaction history. Black-box functional testing of 23 test cases across seven modules yielded a 100% pass rate. The primary contribution of this study is the integration of a workflow from direct sensor readings to economically valued transactions within a single unified web platform, an approach not found comprehensively in previously published similar waste bank systems.

Keywords: waste bank; ESP32; IoT; information system; layered validation; digital disbursement; real-time

I. PENDAHULUAN

Produksi sampah global mencapai 2,01 miliar ton pada tahun 2016 dan diproyeksikan meningkat hingga 3,40 miliar ton per tahun pada 2050 (Kaza et al., 2018). Negara-negara berkembang menanggung beban terbesar dari krisis ini, bukan semata karena volume timbunan yang tinggi, tetapi karena sistem pengelolaan yang tidak memadai secara struktural (Maalouf & Agamuthu, 2023). Indonesia menjadi salah satu contoh paling nyata: timbunan sampah nasional pada 2021 mencapai sekitar 68,5 juta ton, dan angka ini terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang pesat. Respons kebijakan melalui regulasi pengelolaan sampah berbasis komunitas memang sudah ada, namun implementasinya di lapangan masih jauh dari optimal.

Bank sampah sebagai instrumen pengelolaan berbasis masyarakat telah terbukti relevan. Wijayanti dan Suryani (2015) menunjukkan bahwa pendekatan ini berhasil membangun tata kelola lingkungan yang partisipatif di Surabaya, sekaligus menciptakan nilai ekonomi langsung bagi warga. Kontribusi konseptual tersebut meletakkan dasar bagi pengembangan sistem yang lebih modern. Masalahnya bukan pada validitas konsep bank sampah, melainkan pada kesenjangan antara potensi institusional yang besar dengan kapasitas manajerial yang masih bersifat manual dan tidak terstandar.

Upaya digitalisasi telah dilakukan oleh sejumlah peneliti. Afuan et al. (2021) mengembangkan sistem informasi bank sampah berbasis web untuk komunitas desa, sementara Muhandono et al. (2023) membangun platform serupa dengan cakupan fitur manajemen data yang lebih lengkap. Pada skala yang lebih ambisius, Tundjungsari et al. (2025) mengusulkan model *Circonomy* yang mengintegrasikan IoT, semantic web, dan gamifikasi sebagai solusi terpadu pengelolaan sampah sirkular berbasis komunitas di Indonesia. Rimantho et al. (2022) secara khusus mengkaji model bank sampah elektronik untuk konteks DKI Jakarta dengan orientasi ekonomi sirkular. Kurniawan et al. (2022) menegaskan bahwa transformasi digital di sektor daur ulang Indonesia adalah keniscayaan di era Industri 4.0, dan temuan ini diperkuat oleh kajian lanjutan mereka di

Malang (Kurniawan et al., 2023).

Pada sisi teknologi sensor dan konektivitas, riset tentang IoT untuk pengelolaan sampah berkembang pesat. Vishnu et al. (2021) memperkenalkan arsitektur IoT untuk pengelolaan sampah padat di kota pintar, yang kemudian menjadi kerangka acuan banyak penelitian lanjutan. Al-Turjman et al. (2023) mengembangkan sistem manajemen sampah cerdas berbasis IoT dengan komponen kecerdasan buatan, sedangkan Hussain et al. (2024) membandingkan berbagai model manajemen sampah berbasis IoT melalui simulasi multiagen. Jingura et al. (2024) membuktikan bahwa kombinasi sensor ultrasonik, LoRaWAN, dan platform cloud mampu meningkatkan efisiensi rute pengumpulan sampah secara signifikan. Pada konteks komunikasi perangkat IoT, Dinata et al. (2025) mendemonstrasikan sistem notifikasi real-time berbasis ESP32, dan Yamin et al. (2026) mengkaji perbandingan performa protokol MQTT, WebSocket, serta Firebase pada ESP32-C3, yang memberikan landasan teknis penting bagi pemilihan arsitektur komunikasi dalam sistem serupa.

Pola yang muncul dari kajian literatur ini cukup konsisten. Sistem informasi bank sampah yang telah dikembangkan umumnya berfokus pada pencatatan transaksi tanpa integrasi sensor IoT secara langsung. Sebaliknya, sistem IoT untuk monitoring sampah cenderung berhenti pada tahap deteksi dan notifikasi, tanpa menyentuh alur manajemen transaksional seperti validasi kategori, kalkulasi nilai ekonomi sampah, dan distribusi pembayaran kepada pengguna. Celah ini bukan persoalan teknis semata. Ia mencerminkan absennya rancangan sistem yang mempertimbangkan kebutuhan operasional bank sampah secara menyeluruh, mulai dari pembacaan sensor di lapangan hingga pencairan nilai sampah ke rekening warga.

Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut. Kontribusi utamanya adalah perancangan dan implementasi sistem informasi bank sampah yang memadukan pembacaan data sensor ESP32 secara real-time melalui mekanisme polling AJAX, dengan alur validasi berlapis tiga tingkat: penyimpanan buffer sementara (*tb_temp*), validasi operator beserta penentuan kategori dan kalkulasi nilai

(tb_validasi), serta pencat

atan dan distribusi pembayaran digital (tb_pencairan). Pendekatan ini berbeda dari sistem-sistem yang telah ada karena mengintegrasikan seluruh siklus operasional bank sampah, dari sensor hingga pencairan, dalam satu platform terpadu yang dapat diakses oleh dua kelompok pengguna dengan hak akses yang berbeda. Novelty terletak pada mekanisme validasi berlapis yang menjembatani data IoT mentah dengan transaksi bernilai ekonomi di sisi manajerial.

Artikel ini disusun sebagai berikut. Bagian II menyajikan tinjauan pustaka yang mensintesis literatur tentang IoT untuk pengelolaan sampah, sistem informasi bank sampah, dan komunikasi perangkat ESP32. Bagian III menjelaskan metode penelitian mencakup perancangan arsitektur, skema basis data, dan implementasi sistem. Bagian IV menyajikan hasil pengujian fungsional beserta pembahasan komparatif terhadap literatur. Bagian V menutup dengan kesimpulan dan rekomendasi untuk pengembangan lanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bank Sampah sebagai Instrumen Tata Kelola Sampah Berbasis Komunitas

Krisis sampah di negara berkembang tidak dapat dipahami hanya dari dimensi volume. Kaza et al. (2018) menegaskan bahwa setidaknya sepertiga dari 2,01 miliar ton sampah yang dihasilkan dunia setiap tahunnya tidak dikelola secara ramah lingkungan, dan proyeksi pertumbuhan hingga 3,40 miliar ton pada 2050 menempatkan negara-negara berpendapatan rendah dan menengah sebagai penyumbang terbesar pertumbuhan itu. Yang lebih substantif dari sekadar angka tersebut adalah ketidaksesuaian struktural antara laju produksi sampah dengan kapasitas institusional untuk mengelolanya.

Bank sampah muncul sebagai salah satu respons institusional yang paling relevan di konteks ini. Wijayanti dan Suryani (2015) mendokumentasikan bagaimana model bank sampah di Surabaya berhasil mentransformasi sampah dari beban lingkungan menjadi sumber nilai ekonomi yang dapat diakses langsung oleh warga. Kuncinya bukan pada teknologi, melainkan pada mekanisme partisipasi yang

terstruktur. Penelitian mereka meletakkan fondasi konseptual penting: bank sampah bekerja bukan karena warga dipaksa, melainkan karena ada insentif yang konkret dan sistem pencatatan yang transparan. Absennya salah satu elemen itu melemahkan keseluruhan sistem.

Maalouf dan Agamuthu (2023) memperkuat argumen ini melalui tinjauan komprehensif evolusi pengelolaan sampah di negara berkembang selama lima dekade terakhir. Temuan mereka menunjukkan pola yang konsisten: negara-negara yang berhasil meningkatkan tingkat daur ulang adalah mereka yang mampu membangun sistem insentif berbasis komunitas yang didukung oleh infrastruktur pencatatan yang andal. Indonesia, dalam konteks ini, memiliki modal sosial yang memadai melalui keberadaan ribuan unit bank sampah, namun infrastruktur digital yang menyertainya masih sangat terbatas.

Tundjungsari et al. (2025) mencatat kondisi yang sama dalam konteks Jakarta dan Yogyakarta: meski regulasi tentang bank sampah sudah ada, integrasi teknologi yang benar-benar mengakomodasi kebutuhan operasional komunitas masih menjadi pekerjaan rumah yang belum tuntas. Modelo Circonomy yang mereka usulkan mengkombinasikan IoT dengan semantic web dan gamifikasi, namun pengakuan mereka sendiri bahwa akurasi penempatan sensor masih menjadi tantangan utama membuka ruang bagi pendekatan yang lebih pragmatis dan terfokus pada alur transaksi.

2.2 Transformasi Digital Pengelolaan Sampah di Era Industri 4.0

Kurniawan et al. (2022) berpendapat bahwa kunci transformasi sektor daur ulang Indonesia di era Industri 4.0 terletak pada kemampuan untuk membuka kunci teknologi digital, mulai dari IoT hingga platform berbasis data, sebagai penggerak ekonomi sirkular. Argumen mereka bukan sekadar normatif. Mereka menunjukkan bahwa industri daur ulang yang terfragmentasi secara digital justru memperburuk ketidaktransparanan rantai nilai, yang pada akhirnya merugikan pengumpul dan pengelola di tingkat komunitas. Digitalisasi bukan kemewahan, melainkan prasyarat efisiensi.

Kajian lanjutan di Malang (Kurniawan et al., 2023) memberikan gambaran yang lebih

operasional. Penguatan industri daur ulang di sana bergantung pada kemampuan para aktor di tingkat komunitas untuk mengakses, memverifikasi, dan mendistribusikan data transaksi secara cepat dan akurat. Temuan ini secara tidak langsung mengartikulasikan kebutuhan akan sistem yang tidak hanya mencatat data, tetapi juga mengelola alur persetujuan dan pembayaran secara terstruktur.

Rimantho et al. (2022) menambahkan perspektif yang lebih spesifik melalui kajian model bank sampah elektronik di DKI Jakarta. Mereka menemukan bahwa ketiadaan sistem digital yang terintegrasi antara pengumpulan, verifikasi, dan distribusi nilai menjadi hambatan utama dalam mewujudkan prinsip ekonomi sirkular di tingkat komunitas. Jakarta, sebagai ibu kota dengan kepadatan sampah tertinggi di Indonesia, menjadi cermin dari persoalan yang sesungguhnya bersifat nasional.

Jonek-Kowalska dan Wolniak (2023) menempatkan isu ini dalam konteks yang lebih luas melalui tinjauan bibliometrik berbasis Scopus dan Web of Science. Mereka mengidentifikasi bahwa pengelolaan sampah di smart city saat ini bergerak ke arah sistem yang semakin terintegrasi, real-time, dan berbasis data, namun penelitian yang secara khusus menangani alur manajerial dari sensor ke transaksi masih relatif langka. Persoalannya bukan pada kekurangan inovasi teknologi, melainkan pada keterputusan antara inovasi tersebut dengan realitas operasional institusi pengelola sampah di lapangan.

2.3 Arsitektur IoT untuk Monitoring dan Pengelolaan Sampah

Vishnu et al. (2021) menawarkan kerangka arsitektur IoT untuk pengelolaan sampah padat di kota pintar yang menjadi salah satu rujukan paling banyak dikutip dalam literatur bidang ini. Sistem mereka mendemonstrasikan bagaimana sensor pada tempat sampah dapat berkomunikasi dengan server pusat untuk memicu notifikasi pengumpulan secara otomatis. Kontribusi teknis mereka signifikan, namun sistemnya dirancang untuk skenario pengumpulan oleh entitas kota, bukan untuk skenario bank sampah berbasis komunitas di mana pengguna adalah individu yang menyetorkan sampah dan berhak atas kompensasi finansial.

Al-Turjman et al. (2023) mengembangkan

sistem manajemen sampah cerdas dengan lapisan kecerdasan buatan di atasnya. Kecanggihan sistem mereka tidak diragukan, namun kompleksitas yang ditawarkan justru menjadi hambatan adopsi di lingkungan dengan infrastruktur terbatas. Ini bukan kritik terhadap kualitas penelitian, melainkan pengakuan bahwa ada spektrum kebutuhan yang tidak dapat dipenuhi oleh satu pendekatan tunggal.

Pendekatan yang lebih seimbang antara fungsionalitas dan keterjangkauan ditawarkan oleh Jingura et al. (2024). Kombinasi sensor ultrasonik, jaringan LoRaWAN, dan platform cloud yang mereka kembangkan berhasil mencapai peningkatan efisiensi rute pengumpulan sebesar 32% dan penurunan konsumsi bahan bakar sebesar 29%. Angka-angka ini menarik, namun kerangka LoRaWAN yang mereka gunakan memerlukan infrastruktur tambahan yang tidak selalu tersedia di lingkungan perkotaan padat Indonesia.

Hussain et al. (2024) memberikan perspektif komparatif yang berharga melalui simulasi multiagen terhadap berbagai model pengelolaan sampah berbasis IoT. Mereka menemukan bahwa tidak ada model universal yang optimal untuk semua konteks; efektivitas sebuah sistem sangat bergantung pada karakteristik komunitas dan kapasitas manajerial lokal. Temuan ini secara implisit mendukung argumen bahwa sistem yang dirancang untuk komunitas Indonesia perlu mempertimbangkan konteks operasional yang spesifik, bukan sekadar mengadopsi arsitektur yang berhasil di tempat lain.

Makinde et al. (2022) menunjukkan penerapan konkret IoT untuk manajemen sampah di area publik Mekah, di mana sensor kapasitas dan konektivitas nirkabel digunakan untuk mengoptimalkan jadwal pengumpulan. Yang relevan dari studi mereka bukan spesifikasi teknisnya, melainkan temuan bahwa keberhasilan sistem sangat ditentukan oleh kualitas integrasi antara lapisan sensor dan sistem manajemen di sisi operator. Lotfi et al. (2025) memperkuat pandangan ini dengan menunjukkan bahwa integrasi rekayasa perangkat lunak yang terstruktur adalah faktor pembeda antara sistem IoT yang berfungsi hanya sebagai prototipe dan yang benar-benar beroperasi di lingkungan nyata secara berkelanjutan.

2.4 ESP32 dan Komunikasi Real-Time dalam Ekosistem IoT

Pemilihan platform mikrokontroler bukan keputusan teknis yang netral. Dalam konteks sistem bank sampah, kecepatan transmisi data, konsumsi daya, dan keandalan konektivitas nirkabel secara langsung menentukan kualitas pengalaman operator di lapangan. Ismail et al. (2021) mendemonstrasikan implementasi tempat sampah pintar berbasis IoT di Indonesia menggunakan sensor HC-SR04 dan Raspberry Pi yang terhubung ke platform web, membuktikan keterjangkauan dan keterlaksanaan pendekatan ini di konteks lokal.

Dinata et al. (2025) menggunakan ESP32 dalam sistem deteksi gempa dengan visualisasi real-time dan notifikasi cerdas. Meskipun domain aplikasinya berbeda, arsitektur yang mereka kembangkan menunjukkan bahwa ESP32 mampu menangani transmisi data sensor dengan latensi rendah sekaligus mendukung antarmuka visualisasi yang responsif. Pola ini langsung relevan dengan kebutuhan sistem bank sampah yang memerlukan pembacaan data sensor secara instan saat proses validasi berlangsung.

Yamin et al. (2026) memberikan landasan komparatif yang penting. Evaluasi mereka terhadap MQTT, WebSocket, dan Firebase pada ESP32-C3 menunjukkan bahwa setiap protokol memiliki profil performa yang berbeda tergantung pada karakteristik beban kerja. Untuk skenario polling data yang periodik dan tidak memerlukan persistensi koneksi jangka panjang seperti pada sistem validasi bank sampah, pendekatan berbasis HTTP yang ringan dan stateless terbukti memadai dan lebih mudah diimplementasikan tanpa infrastruktur broker tambahan. Temuan ini menjadi justifikasi teknis bagi pemilihan HTTP POST dalam arsitektur komunikasi sistem yang dibangun pada penelitian ini.

2.5 Web Sistem Informasi Bank Sampah

Afuan et al. (2021) adalah salah satu yang paling awal mendokumentasikan pengembangan sistem informasi bank sampah berbasis web untuk komunitas desa di Indonesia. Sistem mereka mencakup fitur pencatatan transaksi, manajemen anggota, dan pelaporan dasar. Keterbatasan yang mereka akui sendiri adalah absennya integrasi dengan perangkat keras apapun; seluruh masukan data

bersifat manual melalui antarmuka web. Ini adalah titik awal yang valid, namun sudah tidak mencukupi untuk konteks operasional yang menuntut kecepatan dan akurasi tinggi.

Muhardono et al. (2023) melangkah lebih jauh dengan membangun sistem yang lebih lengkap untuk bank sampah di Kabupaten Pekalongan. Fitur manajemen data mereka lebih kaya dan antarmukanya lebih terstruktur. Namun, sistem mereka juga masih beroperasi sepenuhnya secara manual tanpa koneksi ke sensor fisik apapun. Jarak antara sistem pencatatan di komputer operator dan timbangan fisik di lapangan tetap harus dijembatani oleh tenaga manusia, yang membuka peluang kesalahan input dan memperlambat proses layanan.

Voskergian dan Ishaq (2023) menawarkan perspektif berbeda melalui sistem manajemen sampah elektronik yang mengintegrasikan IoT dengan deep learning. Kompleksitas pendekatan mereka memang jauh di atas kebutuhan bank sampah komunitas, namun prinsip desain mereka tentang alur data dari sensor ke sistem manajerial memberikan referensi arsitektur yang relevan. Yang dapat dipelajari bukan implementasinya, melainkan logika pemisahan antara lapisan akuisisi data, lapisan validasi, dan lapisan manajemen transaksi.

2.6 Posisi Penelitian dalam Lanskap Literatur

Kajian terhadap literatur yang ada mengungkapkan sebuah pola yang cukup jelas. Sebagaimana disajikan pada Tabel 1, sistem-sistem yang ada dapat dibagi ke dalam dua klaster besar yang saling melengkapi namun jarang bertemu dalam satu implementasi: klaster pertama adalah sistem IoT untuk monitoring sampah yang kuat secara teknis namun tidak menyentuh alur transaksional, dan klaster kedua adalah sistem informasi bank sampah yang lengkap secara manajerial namun bergantung sepenuhnya pada input manual.

Tabel 1. Posisi Penelitian terhadap Studi Terkait

Penelitian	IoT/Sensor	Web-Basis	Validasi Berbasis API	Pencatatan Digital	Konteks Indonesia
Vishnu et al. (2021)	✓	X	X	X	X

Afuan et al. (2021)	X	✓	X	X	✓
Ismail et al. (2021)	✓	✓	X	X	✓
Riman tho et al. (2022)	X	✓	X	X	✓
Vosker gian & Ishaq (2023)	✓	✓	X	X	X
Muhardono et al. (2023)	X	✓	X	X	✓
Jingura et al. (2024)	✓	✓	X	X	X
Tundjungsari et al. (2025)	✓	✓	X	X	✓
Lotfi et al. (2025)	✓	✓	X	X	X
Penelitian Ini	✓	✓	✓	✓	✓

Keterangan: ✓ = fitur tersedia; X = tidak tersedia atau tidak dibahas

Tabel 1 mempertegas bahwa celah yang hendak diisi bukan sekadar penambahan fitur, melainkan perancangan alur yang menghubungkan secara logis dan teknis antara data sensor mentah di lapangan dengan transaksi bernilai ekonomi di sisi manajerial. Tidak ada satu pun dari penelitian yang ditinjau yang secara sekaligus mengimplementasikan keempat dimensi tersebut dalam konteks komunitas Indonesia. Di sinilah kontribusi penelitian ini berdiri.

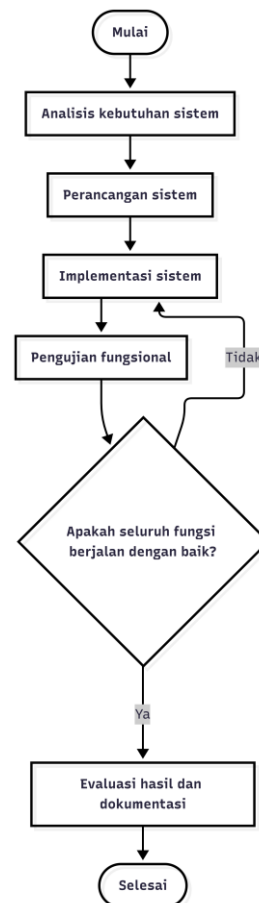
III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian dan pengembangan (*Research and Development*) dengan metode *prototyping*. Pendekatan ini dipilih karena sistem yang dibangun melibatkan dua komponen yang perlu

divalidasi secara bersamaan: perangkat keras IoT dan aplikasi web. Pengembangan dilakukan secara bertahap mulai dari analisis kebutuhan, perancangan, implementasi, hingga pengujian fungsional dengan metode *black-box testing*.

Tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Tahapan Pengembangan dan Evaluasi Sistem

Flowchart Gambar 1. menggambarkan tahapan pengembangan sistem yang dimulai dari analisis kebutuhan, perancangan, implementasi, dan pengujian fungsional. Apabila hasil pengujian menunjukkan adanya fungsi yang belum berjalan sesuai kebutuhan, proses kembali ke tahap implementasi untuk dilakukan perbaikan. Setelah seluruh fungsi tervalidasi, sistem memasuki tahap evaluasi dan dokumentasi sebelum dinyatakan selesai.

3.2 Analisis Kebutuhan

Kebutuhan sistem diidentifikasi berdasarkan permasalahan operasional bank sampah komunitas yang selama ini berjalan secara manual. Terdapat dua kelompok kebutuhan

yang dirumuskan: kebutuhan fungsional dan kebutuhan non-fungsional.

Kebutuhan fungsional utama sistem disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kebutuhan Fungsional Sistem

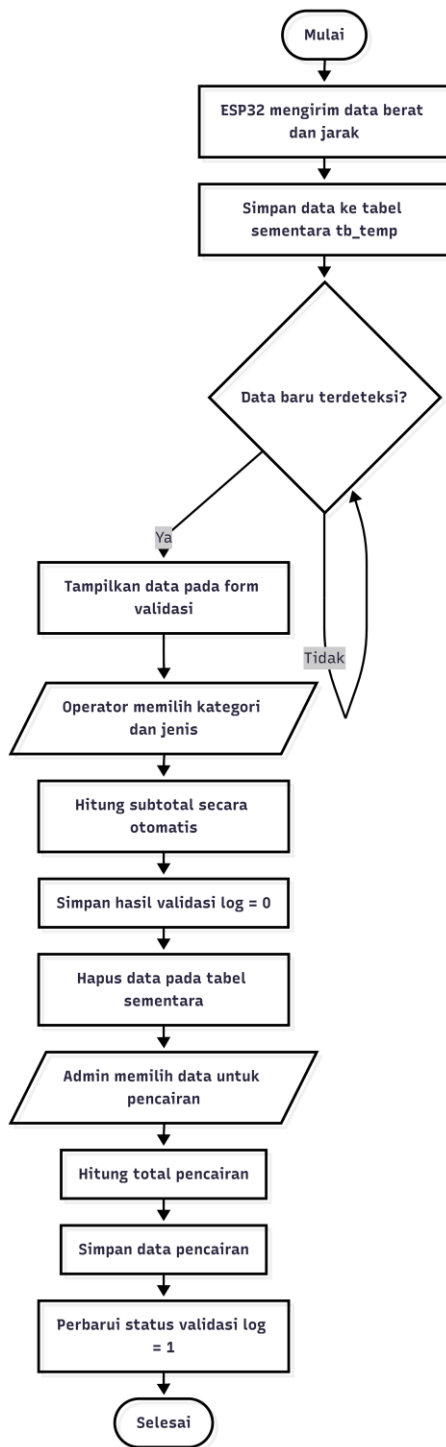
Kode	Kebutuhan	Aktor
KF-01	ESP32 mengirim data berat dan jarak ke server secara otomatis	Sistem
KF-02	Antarmuka validasi membaca data sensor secara real-time tanpa <i>refresh</i>	Admin
KF-03	Operator memilih kategori sampah dan jenis (Logam/Non Logam) saat validasi	Admin
KF-04	Sistem menghitung subtotal otomatis dari harga per kg dan berat	Sistem
KF-05	Data validasi tersimpan ke <i>tb_validasi</i> dan buffer sensor dikosongkan	Admin
KF-06	Admin menyeleksi data validasi untuk diproses sebagai pencairan	Admin
KF-07	Sistem mencatat transaksi pencairan ke <i>tb_pencairan</i>	Admin
KF-08	Pengguna memantau riwayat validasi dan pencairan akun sendiri	Pengguna
KF-09	Sistem menerapkan kendali akses berbasis peran (Admin dan Pengguna)	Sistem
KF-10	Data dapat diekspor ke Excel dan dicetak sebagai PDF	Admin/Pengguna

Kebutuhan non-fungsional meliputi: kompatibilitas dengan *shared hosting* PHP 8 dan MySQL 8, antarmuka berbasis web tanpa instalasi aplikasi tambahan, transmisi data ESP32 ke server dalam waktu kurang dari tiga detik pada koneksi WiFi stabil, dan interval *polling* AJAX tidak kurang dari dua detik.

3.3 Perancangan Sistem

3.3.1 Arsitektur Sistem

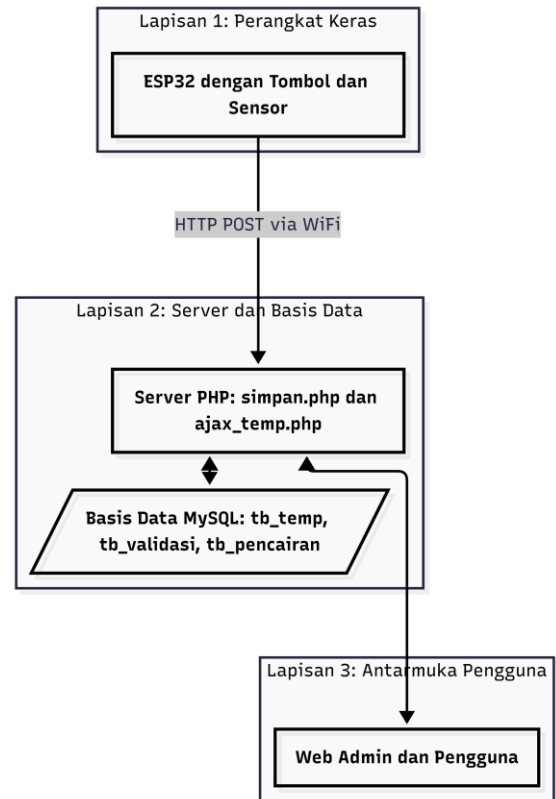
Sistem dirancang dalam tiga lapisan yang terhubung secara hierarkis. Lapisan pertama adalah perangkat keras, yaitu ESP32 yang dilengkapi sensor dan tombol fisik. Lapisan kedua adalah server yang menjalankan aplikasi PHP dan basis data MySQL. Lapisan ketiga adalah antarmuka web yang diakses oleh Admin dan Pengguna melalui peramban.



Gambar 1. Flowchart Proses Validasi Data IoT dan Pencairan Berbasis Web

Flowchart Gambar 1. menggambarkan alur pengolahan data berbasis IoT yang dimulai dari pengiriman data sensor oleh perangkat ESP32, penyimpanan sementara, validasi data oleh operator, hingga proses pencairan oleh administrator. Sistem melakukan deteksi data baru secara otomatis, menghitung subtotal dan total pencairan, serta memperbarui status data

untuk memastikan setiap transaksi diproses secara terstruktur.



Gambar 2. Diagram layer arsitektur IoT

Gambar 2. adalah Diagram arsitektur sistem tiga lapisan. Lapisan 1: ESP32 dengan tombol dan sensor, terhubung melalui WiFi dengan panah bertuliskan HTTP POST. Lapisan 2: Server berisi simpan.php, ajax_temp.php, dan basis data MySQL (tb_temp, tb_validasi, tb_pencairan). Lapisan 3: Antarmuka web Admin dan Pengguna. Setiap lapisan diberi warna berbeda.

Inti dari arsitektur ini adalah alur data berlapis tiga tingkat yang menjadi pembeda utama sistem ini dari sistem sejenis. Alur tersebut digambarkan pada Gambar 3 dan dijelaskan sebagai berikut.

Tingkat pertama adalah akuisisi data: ESP32 mengirim data berat dan jarak ke simpan.php melalui HTTP POST, lalu server menyimpannya sementara di tb_temp. Tingkat kedua adalah validasi: antarmuka validasi_data.php secara periodik memanggil ajax_temp.php setiap dua detik untuk mendeteksi data baru di tb_temp. Ketika data baru ditemukan, nilai berat dan jarak langsung diperbarui pada formulir tanpa *refresh*. Operator melengkapi formulir dengan kategori,

jenis, dan catatan, lalu menekan simpan. Sistem menghitung subtotal, menyimpan rekaman ke tb_validasi, dan mengosongkan tb_temp. Tingkat ketiga adalah pencairan: Admin menyeleksi rekaman validasi yang belum dicairkan ($\log = 0$) melalui *checkbox*, sistem menghitung total nilai, menyimpan transaksi ke tb_pencairan, dan memperbarui status rekaman menjadi $\log = 1$.

3.3.2 Perancangan Basis Data

Basis data terdiri dari lima tabel dengan relasi satu-ke-banyak (*one-to-many*) antara tb_pengguna ke tb_validasi dan tb_pencairan. Struktur tabel disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Struktur Basis Data Sistem

Tabel	Fungsi	Kolom Utama
tb_temp	Buffer sementara data sensor	id, tanggal, jam, jarak, berat
tb_kategori	Referensi kategori dan harga sampah	id_kategori, kategori, harga (per kg)
tb_pengguna	Data akun dan autentikasi	id_pengguna, nama_pengguna, level, username, password, status
tb_validasi	Rekaman transaksi setoran sampah	id, id_pengguna, jenis, berat, id_kategori, harga, subtotal, log, catatan
tb_pencairan	Rekaman transaksi pembayaran ke pengguna	idp, id_pengguna, total, id_admin, catatan, keterangan

tb_temp tidak memiliki relasi langsung ke tb_pengguna karena data sensor bersifat anonim sebelum divalidasi. Pengaitan ke pengguna terjadi pada saat operator memilih pengguna yang bersangkutan dalam proses validasi.

3.3.3 Kalkulasi dan Total Pencairan

Nilai ekonomi setiap setoran dihitung secara otomatis saat rekaman disimpan ke tb_validasi. Rumus yang digunakan adalah:

$$S = H \times \frac{B}{1000}$$

di mana S adalah subtotal dalam rupiah,

H adalah harga per kilogram dari tb_kategori (Rp/kg), dan B adalah berat sampah dalam gram dari sensor ESP32. Pembagian 1000 mengkonversi gram ke kilogram. Total nilai untuk satu transaksi pencairan yang mencakup n rekaman dihitung sebagai:

$$T = \sum_{i=1}^n S_i$$

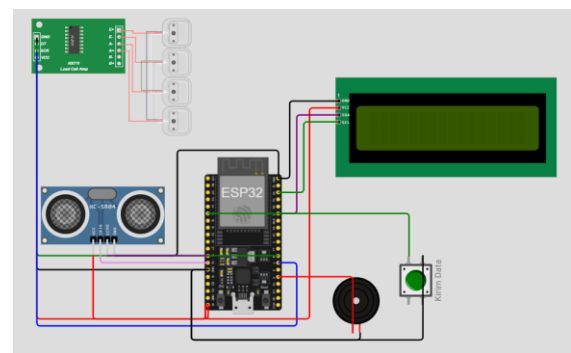
di mana T adalah total pencairan dalam rupiah dan S_i adalah subtotal rekaman validasi ke- i yang diseleksi Admin.

3.4 Implementasi

3.4.1 Firmware ESP32

ESP32 dikonfigurasi dengan tombol pada GPIO0 menggunakan INPUT_PULLUP dan LED indikator pada GPIO2. Penekanan tombol memicu pembangkitan dua nilai acak yang mensimulasikan pembacaan sensor: berat dalam rentang 1,0 hingga 200,0 gram menggunakan $\text{random}(10, 2001) / 10.0$, dan jarak dalam rentang 0,5 hingga 10,0 cm menggunakan $\text{random}(5, 101) / 10.0$. Mekanisme *debounce* 600 milidetik diterapkan untuk mencegah pembacaan ganda.

Kedua nilai dikirim ke simpan.php melalui HTTP POST menggunakan pustaka HTTPClient.h dengan *timeout* delapan detik. LED menyala selama proses transmisi dan berkedip lima kali sebagai konfirmasi pengiriman berhasil, atau tiga kali lambat jika gagal.



Gambar 3. GPIO Komponen yang digunakan

Pada alat ini, LCD 16x2 digunakan dalam mode I2C dengan alamat baku 0x27, sensor ultrasonik menggunakan pin TRIG dan ECHO terpisah, sedangkan HX711 dibaca melalui jalur DT dan SCK. Sistem Alat juga mendukung pemuatan firmware kustom untuk ESP32 melalui menu perintah (F1) pada editor

kode.

3.4.2 Endpoint Server

simpan.php menerima parameter berat dan jarak, memvalidasi keduanya, menyimpan ke tb_temp, dan mengembalikan respons JSON berisi status dan ID rekaman. Pola respons JSON ini memungkinkan firmware ESP32 memverifikasi keberhasilan penyimpanan secara programatik.

ajax_temp.php menerima parameter last berisi ID rekaman terakhir yang diketahui klien, lalu mengembalikan data rekaman terbaru hanya jika ID-nya lebih besar dari last. Pola ini memastikan transfer data hanya terjadi saat ada rekaman baru, mengurangi beban server dibanding polling naif.

3.4.3 Antarmuka Validasi Real-Time

Halaman validasi_data.php menjalankan polling AJAX dengan setInterval berinterval dua detik. Ketika respons mengandung ID baru, nilai berat dan jarak diperbarui pada elemen DOM formulir secara langsung, dan kotak sensor diberi animasi pulse sebagai sinyal visual. Saat tb_temp kosong setelah proses simpan berhasil, pesan berkedip ditampilkan sebagai panduan kepada operator.

Pencarian kategori sampah diimplementasikan menggunakan filter real-time JavaScript pada elemen <select>. Estimasi subtotal ditampilkan langsung setiap kali operator mengubah pilihan kategori, menggunakan data harga yang telah diembed ke variabel JavaScript saat halaman dirender.

3.4.4 Kendali Akses Berbasis Peran

Sistem menerapkan role-based access control melalui sesi PHP. Nilai level pengguna yang tersimpan di \$_SESSION['level'] menjadi penentu hak akses setiap halaman. Fungsi requireAdmin() dan requireLogin() dipanggil di awal setiap halaman yang dilindungi. Matriks hak akses antar peran disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Matriks Hak Akses Sistem

Fitur		Admin	Pengguna
Dashboard global	statistik	✓	✗
Dashboard pribadi	statistik	✓	✓
Manajemen	data	✓	✗

pengguna			
Input dan kelola data validasi	✓	✗	
Proses pencairan	✓	✗	
Lihat validasi semua pengguna	✓	✗	
Lihat validasi akun sendiri	✓	✓	
Lihat pencairan semua pengguna	✓	✗	
Lihat pencairan akun sendiri	✓	✓	
Update profil pribadi	✓	✓	
Ekspor Excel dan cetak PDF	✓	✓	
Grafik deskriptif global	✓	✗	
Grafik deskriptif pribadi	✓	✓	

3.5 Lingkungan Implementasi

Sistem dibangun di atas tumpukan teknologi PHP 8, MySQL 8, dan JavaScript tanpa framework tambahan. Pemilihan tumpukan ini mempertimbangkan ketersediaan luas di layanan hosting Indonesia dengan biaya rendah dan kemudahan pengelolaan oleh tenaga teknis non-spesialis, selaras dengan prinsip yang dikemukakan Lotfi et al. (2025) bahwa keberlanjutan sistem IoT sangat ditentukan oleh keterjangkauan infrastruktur pendukungnya.

Dataset uji dikembangkan secara sintesis untuk merepresentasikan pola operasional bank sampah komunitas yang mencakup delapan akun pengguna (satu Admin, enam Pengguna aktif, satu Pengguna tidak aktif), sepuluh kategori sampah dari kelompok Logam dan Non Logam dengan rentang harga Rp 200 hingga Rp 3.200 per kilogram, tiga puluh rekaman validasi, dan tujuh rekaman pencairan yang mencakup periode Januari hingga Maret 2026.

3.6 Pengujian Fungsional

Pengujian dilakukan dengan metode black-box testing, berfokus pada kesesuaian antara keluaran aktual dan keluaran yang diharapkan tanpa mempertimbangkan struktur internal kode. Setiap kasus uji didefinisikan dengan tiga komponen: skenario masukan, tindakan, dan keluaran yang diharapkan. Kasus uji

dikelompokkan ke dalam tujuh modul sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Modul Pengujian Fungsional

Kode	Modul	Jumlah Kasus Uji	Fokus Pengujian
M-01	Transmisi Data ESP32	3	HTTP POST, penyimpanan tb_temp, respons JSON
M-02	Polling AJAX Real-Time	3	Deteksi data baru, pembaruan DOM, pesan kosong
M-03	Validasi dan Kalkulasi	4	Pilih kategori, hitung subtotal, simpan, kosongkan buffer
M-04	Pencairan	3	Seleksi checkbox, hitung total, simpan, update log
M-05	Autentikasi dan Akses	4	Login valid, login gagal, akses terlindungi, logout
M-06	Manajemen Data CRUDS	4	Tambah, baca, ubah, hapus, pencarian
M-07	Ekspor Data	2	Ekspor Excel, cetak PDF

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

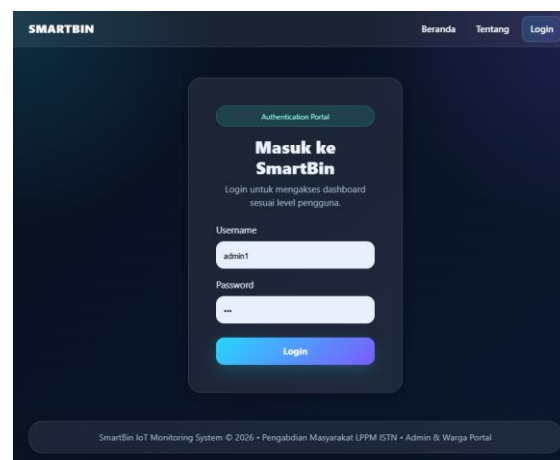
4.1 Hasil Implementasi Sistem

Sistem berhasil dibangun dan dijalankan pada lingkungan server lokal XAMPP dengan PHP 8 dan MySQL 8. Seluruh komponen sistem, mulai dari firmware ESP32 hingga antarmuka web, berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang dirancang. Sistem terdiri dari dua panel utama yang dapat diakses setelah proses autentikasi: panel Admin untuk pengelolaan data secara penuh dan panel Pengguna untuk pemantauan

riwayat transaksi pribadi.

4.1.1 Halaman Login dan Dashboard

Akses ke sistem diawali melalui halaman login yang memverifikasi kredensial pengguna dan menentukan peran yang relevan. Pengguna dengan status tidak aktif di tb_pengguna tidak dapat masuk meskipun kredensialnya benar, sehingga kendali akses dimulai sejak tahap autentikasi.

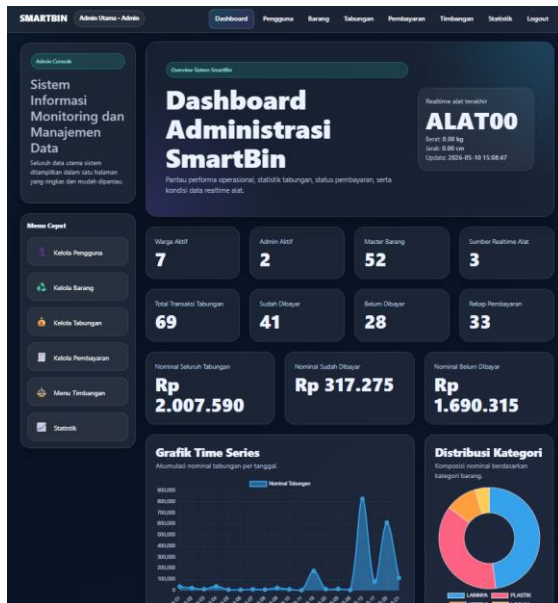


Gambar 4. Menu Login Sistem

Gambar 4. adalah Tangkapan layar halaman login sistem, menampilkan kolom username, password, dan tombol masuk. Sertakan tampilan pesan kesalahan saat login gagal di bagian bawah form.

Setelah login berhasil, Admin diarahkan ke dashboard yang menampilkan delapan kartu statistik deskriptif: total pengguna, pengguna aktif, total validasi, total nilai sampah, jumlah data belum dicairkan, nilai belum cair, jumlah sudah dicairkan, dan total nilai pencairan. Di bawah kartu statistik, tersedia dua grafik: grafik batang tren validasi bulanan dan grafik donat distribusi jenis sampah. Pengguna biasa melihat dashboard yang sama namun statistiknya terbatas pada data akun sendiri.

Gambar 5. Merupakan tangkapan layar halaman dashboard Admin, menampilkan delapan kartu statistik di bagian atas, diikuti dua grafik (tren bulanan dan distribusi jenis) di bagian bawah.

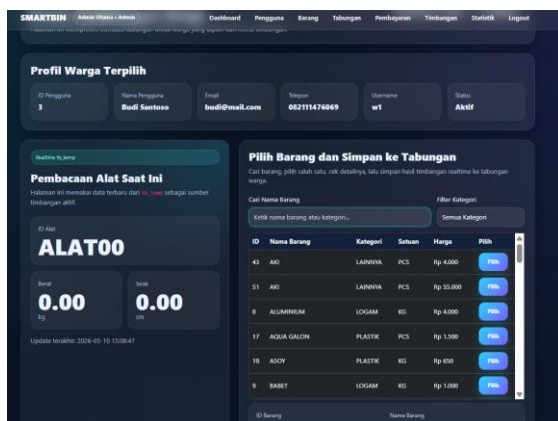


Gambar 5. Menu Dashboard Pengguna Admin

Dashboard Admin menampilkan statistik umum sistem, misalnya: jumlah warga, jumlah transaksi, total nominal tabungan, dan ringkasan performa data.

Kegunaannya adalah untuk memberikan gambaran cepat mengenai kondisi operasional sistem secara keseluruhan.

4.1.2 Antarmuka Validasi Real-Time



Gambar 6. Menu Standby Sensor Berat dari IOT

Halaman standby diposisikan dengan daftar pengguna aktif yang dilengkapi fitur pencarian. Admin memilih satu pengguna, kemudian sistem menampilkan halaman validasi_data yang menampilkan kotak sensor di bagian atas dan tabel data validasi di bagian bawah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.

Tangkapan layar halaman validasi_data pada Gambar 6 adalah dengan dua area utama: (1) kotak sensor di bagian atas yang menampilkan nilai berat dan jarak dalam angka besar,

lengkap dengan animasi pulse dan pesan berkedip saat buffer kosong; (2) formulir input di bawah kotak sensor yang menampilkan dropdown kategori dengan kotak pencarian, dua tombol radio Logam/Non Logam, dan kolom catatan.

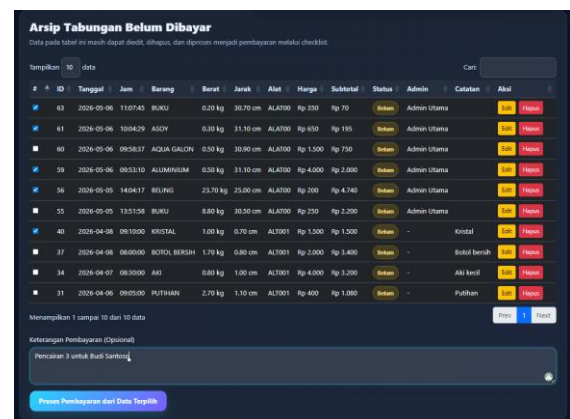
Kotak sensor memperbarui nilai berat dan jarak secara otomatis setiap dua detik tanpa *refresh* halaman. Ketika *tb_temp* kosong, pesan "Silakan tekan tombol ESP32 untuk menambah berat/jenis sampah" ditampilkan berkedip sebagai panduan operator. Segera setelah tombol pada ESP32 ditekan dan data berhasil dikirim, nilai baru muncul pada kotak sensor dengan efek animasi, dan estimasi subtotal dihitung secara langsung berdasarkan kategori yang dipilih.



Gambar 7. Pembacaan Data Sensor dari IOT

Gambar 7. adalah tangkapan layar kotak sensor saat data baru tiba dari ESP32, menampilkan nilai berat (contoh: 13.1 Kg) dan jarak (contoh: 112.0 cm) dalam ukuran teks besar dengan efek highlight/pulse.

4.1.3 Proses Pencairan Digital



Gambar 8. Menu Pencairan Deposit Sampah

Setelah data validasi tersimpan, Admin dapat memilih satu atau lebih rekaman yang belum dicairkan (*log* = 0) melalui *checkbox* pada kolom paling kanan tabel validasi. Panel pencairan muncul secara otomatis di bawah tabel menampilkan total nilai dan jumlah data

yang dipilih. Admin mengisi catatan pencairan dan menekan tombol konfirmasi untuk menyelesaikan transaksi.

Gambar 8. Menampilkan tangkapan layar tabel validasi_data dengan beberapa baris dicentang pada kolom checkbox paling kanan. Tampilkan panel pencairan yang muncul di bagian bawah tabel, berisi total nilai (dalam format rupiah), jumlah data dipilih, kolom catatan, dan tombol "Proses Pencairan".

4.1.4 Panel Pengguna

Pengguna dengan level Pengguna mengakses antarmuka yang lebih terbatas. Mereka dapat memantau riwayat validasi dan pencairan milik akun sendiri, melihat grafik distribusi jenis sampah dan tren bulanan pribadi, serta memperbarui informasi profil termasuk kata sandi.



Gambar 9. Menu Dashboard Warga

Gambar 9. Merupakan layar halaman dashboard pengguna, yaitu untuk menampilkan empat kartu statistik pribadi di bagian atas (total kiriman, total berat, total nilai, menunggu cair) dan tabel riwayat validasi di bawahnya; Menu ini hanya Menampilkan data Statistik atas profil dirinya sendiri.

4.2 Hasil Pengujian Fungsional

Pengujian *black-box* dilakukan terhadap tujuh

modul yang telah ditetapkan pada Bab III. Hasil pengujian secara keseluruhan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Pengujian Fungsional

Ko de	Modul	Kas us Uji	Berh asil	Gag al	Stat us
M-01	Transmi si Data ESP32	3	3	0	✓ Lulu s
M-02	Polling AJAX Real-Time	3	3	0	✓ Lulu s
M-03	Validasi dan Kalkula si	4	4	0	✓ Lulu s
M-04	Pencair an	3	3	0	✓ Lulu s
M-05	Autenti kasi dan Akses	4	4	0	✓ Lulu s
M-06	Manaje men Data CRUDS	4	4	0	✓ Lulu s
M-07	Ekspor Data	2	2	0	✓ Lulu s
Tot al		23	23	0	100 %

Seluruh 23 kasus uji menghasilkan keluaran yang sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Tidak ditemukan kegagalan fungsional pada kondisi masukan normal maupun kondisi batas yang diuji, seperti login dengan akun tidak aktif, penekanan tombol ESP32 berulang dalam interval cepat, dan seleksi *checkbox* saat tidak ada data dengan log = 0.

Tabel 7 menyajikan tiga contoh kasus uji representatif dari modul yang berbeda untuk menggambarkan pola pengujian yang diterapkan.

Tabel 7. Contoh Kasus Uji Terpilih

Mo dul	Skenar io	Keluara n Diharap	Keluara n Aktual	Statu s
--------	-----------	-------------------	------------------	---------

kan				
M-01	ESP32 kirim berat 125.5 gram dan jarak 3.8 cm via HTTP POST	Respons JSON status: ok, data tersimpan di tb_temp	Respons JSON diterima , rekaman baru muncul di tb_temp	✓ Berhasil
M-03	Operator pilih kategori Aluminium (Rp 1.500/kg), berat sensor 800 gram	Subtotal tampil Rp 1.200, tersimpan ke tb_validasi, tb_temp kosong	Subtotal Rp 1.200 ditampilkan, tb_temp dikosongkan	✓ Berhasil
M-05	Login dengan akun berstatus Tidak Aktif	Sistem menolak login dengan pesan kesalahan	Login ditolak, pesan kesalahan ditampilkan	✓ Berhasil

4.3 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi antara perangkat IoT ESP32 dan aplikasi web berbasis PHP/MySQL dapat berjalan andal dalam skenario operasional bank sampah komunitas. Yang lebih penting dari angka kelulusan pengujian adalah bukti bahwa alur tiga tingkat yang dirancang, dari akuisisi sensor ke validasi hingga pencairan, dapat dieksekusi secara mulus dalam satu sesi kerja operator tanpa perpindahan antarmuka yang menyulitkan.

Dibandingkan dengan sistem yang dikembangkan Afuan et al. (2021) dan Muhardono et al. (2023), sistem ini menambahkan lapisan integrasi IoT yang menghilangkan ketergantungan pada input manual data berat. Operator tidak perlu lagi membaca timbangan dan mengetik angka secara terpisah; data tiba otomatis di formulir dan operator hanya perlu memverifikasi kategori serta menekan simpan. Pengurangan langkah ini secara langsung memperkecil

peluang kesalahan input, yang merupakan salah satu titik lemah paling umum pada sistem pencatatan manual sebagaimana dicatat Maalouf dan Agamuthu (2023) dalam tinjauan mereka terhadap sistem pengelolaan sampah di negara berkembang.

Mekanisme *polling* AJAX yang diterapkan mengikuti prinsip yang dikemukakan Dinata et al. (2025) dalam sistem deteksi berbasis ESP32 mereka, yakni bahwa pembaruan data real-time tidak harus bergantung pada protokol *persistent connection* seperti WebSocket untuk skenario dengan frekuensi data yang rendah. Yamin et al. (2026) memperkuat argumen ini: untuk skenario transmisi data periodik yang tidak memerlukan latensi di bawah satu detik, HTTP yang ringan dan stateless memberikan keseimbangan terbaik antara kesederhanaan implementasi dan keandalan layanan. Sistem ini mengimplementasikan prinsip tersebut dengan interval *polling* dua detik yang terbukti memadai untuk konteks validasi bank sampah.

Dari perspektif ekosistem yang lebih luas, sistem ini merespons secara konkret temuan Tundjungsari et al. (2025) bahwa bank sampah di Indonesia membutuhkan integrasi teknologi yang tidak hanya canggih secara konseptual tetapi juga dapat dioperasikan oleh komunitas dengan kapasitas teknis terbatas. Pilihan tumpukan PHP/MySQL tanpa *framework* eksternal, antarmuka berbasis peramban tanpa aplikasi tambahan, dan alur kerja yang dapat dipelajari dalam waktu singkat adalah respons teknis terhadap tantangan adopsi tersebut. Kurniawan et al. (2022) menegaskan bahwa digitalisasi yang efektif di sektor daur ulang Indonesia justru dimulai dari solusi yang mudah diadopsi, bukan dari solusi yang paling canggih.

Satu keterbatasan yang perlu dicatat adalah bahwa nilai berat dan jarak pada tahap pengujian dibangkitkan secara acak oleh firmware untuk mensimulasikan sensor fisik. Pada implementasi produksi, nilai tersebut perlu digantikan oleh pembacaan sensor riil seperti *load cell* dengan modul HX711 untuk berat dan sensor ultrasonik HC-SR04 atau sensor ToF VL53L1X untuk jarak, sebagaimana digunakan pada sistem serupa yang dikaji Ismail et al. (2021) dan Jingura et al. (2024). Integrasi sensor fisik ini menjadi prioritas pengembangan lanjutan yang paling mendesak sebelum sistem dapat dioperasikan

di lingkungan bank sampah nyata.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem informasi bank sampah berbasis IoT yang mengintegrasikan perangkat ESP32 dengan aplikasi web PHP/MySQL melalui arsitektur alur data berlapis tiga tingkat. Tiga kesimpulan utama dapat ditarik dari hasil penelitian ini.

Pertama, mekanisme validasi berlapis yang dirancang, mencakup buffer sensor di `tb_temp`, proses validasi operator dengan pembacaan real-time berbasis AJAX di `tb_validasi`, dan pencatatan pencairan digital di `tb_pencairan`, terbukti berfungsi secara penuh dan berurutan sebagaimana diharapkan. Seluruh 23 kasus uji pada tujuh modul pengujian fungsional memberikan keluaran yang sesuai spesifikasi, tanpa kegagalan pada kondisi normal maupun kondisi batas.

Kedua, integrasi pembacaan data sensor secara real-time ke dalam formulir validasi melalui *polling* AJAX berinterval dua detik berhasil menghilangkan kebutuhan input manual data berat oleh operator. Pendekatan ini secara langsung mengurangi peluang kesalahan pencatatan yang selama ini menjadi titik lemah sistem bank sampah berbasis manual, sekaligus mempercepat proses layanan kepada nasabah.

Ketiga, penerapan kendali akses berbasis peran dengan dua tingkat, Admin dan Pengguna, memastikan bahwa setiap aktor hanya dapat mengakses dan memodifikasi data yang relevan dengan fungsinya. Pembatasan ini penting untuk menjaga integritas data transaksi bank sampah yang berimplikasi finansial langsung bagi pengguna.

5.2 Rekomendasi

Berdasarkan keterbatasan yang ditemukan selama penelitian, tiga rekomendasi berikut diusulkan untuk pengembangan lanjutan.

Prioritas pertama adalah menggantikan pembangkitan nilai acak pada firmware ESP32 dengan pembacaan sensor fisik riil, yaitu modul *load cell* HX711 untuk pengukuran berat dan sensor ultrasonik HC-SR04 atau sensor ToF untuk pengukuran jarak. Tanpa integrasi sensor fisik ini, sistem belum dapat dioperasikan secara langsung di lingkungan

bank sampah nyata.

Prioritas kedua adalah penambahan notifikasi berbasis *push notification* atau pesan instan kepada pengguna ketika status pencairan mereka diperbarui oleh Admin. Fitur ini akan meningkatkan transparansi dan kepercayaan pengguna terhadap sistem, yang merupakan faktor kunci keberhasilan program bank sampah berbasis komunitas.

Prioritas ketiga adalah pengembangan laporan statistik yang dapat diekspor secara otomatis secara berkala, misalnya rekapitulasi bulanan per pengguna, sebagai bahan pelaporan kepada instansi terkait seperti Dinas Lingkungan Hidup. Fitur ini akan meningkatkan nilai guna sistem dari sekadar alat operasional menjadi alat manajemen dan pelaporan yang lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- Afuan, L., Nofiyati, N., & Umayah, N. (2021). Rancang bangun sistem informasi bank sampah di Desa Paguyangan. *Edumatic: Jurnal Pendidikan Informatika*, 5(1), 21–30. <https://doi.org/10.29408/edumatic.v5i1.3238>
- Al-Turjman, F., Nawaz, M. H., & Ulusar, U. D. (2023). IoT-based intelligent waste management system. *Neural Computing and Applications*, 35, 19481–19499. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08970-7>
- Dinata, R. M., Ariman, A., & Yamin, M. I. (2025). Sistem deteksi gempa berbasis IoT dengan visualisasi real-time dan notifikasi cerdas. *INTI Nusa Mandiri*, 19(2), 288–294.
- Hussain, I., Elomri, A., Kerbach, L., & El Omri, A. (2024). Smart city solutions: Comparative analysis of waste management models in IoT-enabled environments using multiagent simulation. *Sustainable Cities and Society*, 103, 105247. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105247>
- Ismail, M., Abdullah, R. K., & Abdussamad, S. (2021). Tempat sampah pintar berbasis Internet of Things (IoT) dengan sistem teknologi informasi. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3(1), 7–12. <https://doi.org/10.37905/jjee.v3i1.8099>
- Jingura, C., Chitura, T., & Jingura, R. (2024). Waste management 2.0 leveraging internet of things for an efficient and eco-friendly smart city solution. *PLOS ONE*, 19(7), e0307608. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307608>
- Jonek-Kowalska, I., & Wolniak, R. (2023). Waste management in the smart city: Current practices and future directions. *Resources*, 12(10), 115.

- <https://doi.org/10.3390/resources12100115>
Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kurniawan, T. A., Dzarfan Othman, M. H., Hwang, G. H., & Gikas, P. (2022). Unlocking digital technologies for waste recycling in industry 4.0 era: A transformation towards a digitalization-based circular economy in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131911. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131911>
- Kurniawan, T. A., Meidiana, C., Dzarfan Othman, M. H., Goh, H. H., & Chew, K. W. (2023). Strengthening waste recycling industry in Malang (Indonesia): Lessons from waste management in the era of Industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135296>
- Lotfi, A., Milanovic, M., & El Aboudi, M. (2025). Advancing sustainability through an IoT-driven smart waste management system with software engineering integration. *Sustainability*, 17(21), 9803. <https://doi.org/10.3390/su17219803>
- Maalouf, A., & Agamuthu, P. (2023). Waste management evolution in the last five decades in developing countries: A review. *Waste Management & Research*, 41(8), 1–17. <https://doi.org/10.1177/0734242X231160099>
- Makinde, O. A., Pasipanodya, E. T., Adeyeye, A., & Makinde, O. O. (2022). IoT-based waste management system in formal and informal public areas in Mecca. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13066. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013066>
- Muhardono, A., Susilo, D., Sahara Fitri, N. R., & Khasanah, M. (2023). Sistem informasi bank sampah berbasis web untuk manajemen pengelolaan sampah di Desa Sumurjomblangbogo Kabupaten Pekalongan. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(4), 1540–1549. <https://doi.org/10.33379/gtech.v7i4.3248>
- Rimantho, D., Syaiful, S., Nurfaida, & Sulandari, U. (2022). Electronic waste bank model as a solution for implementing circular economy: Case study DKI Jakarta, Indonesia. *Frontiers in Built Environment*, 8, 1030196. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1030196>
- Tundjungsari, V., Putranto, B. P. D., Ulum, M. B., & Anwar, N. (2025). An integrated model for circular waste management using the Internet of Things, semantic web, and gamification (Circonomy): Case study in Indonesia. *JMIR Serious Games*, 13, e66781. <https://doi.org/10.2196/66781>
- Vishnu, S., Ramson, S. R. J., Senith, S., Anagnostopoulos, T., Abu-Mahfouz, A. M., Fan, X., Srinivasan, S., & Kirubaraj, A. A. (2021). IoT-enabled solid waste management in smart cities. *Smart Cities*, 4(3), 1004–1017. <https://doi.org/10.3390/smartcities4030053>
- Voskergian, D., & Ishaq, I. (2023). Smart e-waste management system utilizing Internet of Things and deep learning approaches. *Journal of Smart Cities and Society*. <https://doi.org/10.3233/SCS-230007>
- Wijayanti, D. R., & Suryani, S. (2015). Waste bank as community-based environmental governance: A lesson learned from Surabaya. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*, 184, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.05.077>
- Yamin, M. I., Ariman, A., Dinata, R. M., & Purnomo, N. (2026). Comparative performance evaluation of MQTT, WebSocket, and Firebase on ESP32-C3 for real-time IoT communication. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 10(3), 3917–3923.