

Pengembangan Aplikasi Mobile IoT untuk Meningkatkan Partisipasi Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah Berkelanjutan Berbasis Android

Ok Muhammad Ihsan¹, M Irfan Aldy Nasution², Wiwi Verina³, Bagus Nugraha⁴

^{1,2,4} Informatika, Universitas Potensi Utama

³ Digital Business, Universitas Bina Nusantara

Email: ¹okm.ihsan@gmail.com, ²aldy.irfan16@gmail.com, ³wiwi.verina@binus.ac.id, ⁴bagusnugraha789@gmail.com

Abstrak

Indonesia sebagai negara dengan populasi terbesar keempat di dunia menghadapi tantangan serius dalam pengelolaan sampah, terutama sampah rumah tangga dan plastik. Pada tahun 2022 tercatat hanya 49,2% sampah yang dapat terangkut, sementara 25,5% masih tidak terkelola. Mayoritas sampah berasal dari pemukiman dengan komposisi 75% organik dan 25% anorganik. Sampah organik relatif mudah diolah menjadi kompos, briket, maupun biogas, namun sampah anorganik masih minim pengelolannya. Rendahnya kesadaran masyarakat, keterbatasan akses informasi, serta dominannya sistem konvensional menyebabkan partisipasi dalam pengelolaan sampah berkelanjutan masih rendah. Sejalan dengan perkembangan teknologi, Internet of Things (IoT) dan aplikasi mobile berbasis Android menawarkan solusi inovatif dalam mendukung pengelolaan sampah. Penelitian ini mengembangkan aplikasi mobile IoT yang terintegrasi dengan smart bin menggunakan sensor ultrasonic JSN SR04T, Dfplayer Pro, Spiker, Amplifier, load cell, servo MG996R, Lcd I2c, lampu led, momentary button, Step Down 5A dan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke layanan cloud Firebase. Aplikasi ini memberikan umpan balik berupa poin, notifikasi, dan riwayat aktivitas kepada pengguna, sehingga sampah yang sebelumnya dianggap tidak bernilai menjadi memiliki nilai. Penelitian dilakukan di lingkungan masyarakat dan sekolah sebagai representasi sosial yang berbeda. Hasil pengujian, terdapat perbedaan tingkat keberhasilan antara lingkungan sekolah dan permukiman. Uji coba di sekolah menunjukkan rata-rata keberhasilan sebesar 98,4%, sementara pada permukiman hanya mencapai 95,0%.

Kata Kunci: IoT, aplikasi mobile, smart bin, partisipasi masyarakat, pengelolaan sampah berkelanjutan

Abstract

Indonesia, the fourth most populous country in the world, faces serious challenges in waste management, particularly household and plastic waste. In 2022, only 49.2% of waste was collected, while 25.5% remained unmanaged. The majority of waste originates from residential areas, with a composition of approximately 75% organic and 25% inorganic. Organic waste is relatively easy to process into compost, briquettes, or biogas; however, inorganic waste remains largely under-managed. Low public awareness, limited access to information, and the predominance of conventional systems contribute to low participation in sustainable waste management. In line with technological developments, the Internet of Things (IoT) and Android-based mobile applications offer innovative solutions to support waste management. This study develops an IoT-based mobile application integrated with a smart bin that utilizes an ultrasonic sensor (JSN-SR04T), DFPlayer Pro, speaker and amplifier, load cell, MG996R servo motor, LCD I2C, LED indicators, momentary buttons, a 5A step-down converter, and an ESP32 microcontroller connected to Firebase cloud services. The application provides users with feedback in the form of points, notifications, and transaction history, thereby transforming waste previously perceived as valueless into valuable resources. The research was conducted in both community and school environments to represent different social settings. The results indicate a difference in success rates: trials in schools achieved an average success rate of 98.4%, whereas trials in residential areas reached 95.0%.

Keywords: IoT, mobile application, smart bin, community participation, sustainable waste management

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara terbesar ke 4 untuk populasinya, oleh karenanya Indonesia dihadapkan dengan tantangan terbesar dalam pengelolaan sampah, terutama sampah rumah tangga dan sampah plastik. Tak hanya di Indonesia dunia sedang tidak baik-baik dalam permasalahan sampah yang merupakan isu global yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan aktivitas masyarakat. Tercatat pada tahun 2022 terjadi masalah signifikan tentang pengangkutan penanganan sampah mencapai 49,2% dan sebesar 25,5% sampah yang tidak dapat dikelola[1]. Sampah terbesar berasal dari pemukiman dengan komposisi 75% yang terdiri dari sampah organik dan 25% sampah anorganik. Dimana sampah organik memiliki manfaat sebagai bahan pembuatan kompos, briket serta biogas, akan tetapi sampah berjenis anorganik sangat minim sekali pengolahannya[2]. Kesadaran masyarakat terhadap lingkungan merupakan tanggung jawab bersama, untuk itu kesadaran dan partisipasi masyarakat sangat penting. Dampak dari kondisi lingkungan berpengaruh pada kesehatan, serta kualitas hidup masyarakat apabila tidak ditangani secara sistematis[3]. Selain itu kurangnya kesadaran, keterbatasan akses terhadap informasi, serta masih dominannya sistem pengelolaan yang

konvensional menjadi tantangan utama dalam menciptakan lingkungan yang bersih, sehat, dan berkelanjutan [4]. Pemerintah telah menginisiasi kebijakan pengelolaan sampah berbasis prinsip 3R (Reduce, Reuse, Recycle), namun implementasinya di lapangan masih belum optimal karena minimnya dukungan dan keterlibatan aktif dari masyarakat [5]. Dalam konteks Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya poin 11 (kota dan permukiman yang inklusif, aman, tahan bencana, dan berkelanjutan) dan poin 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab), dibutuhkan pendekatan baru yang mampu memadukan aspek teknologi dan pemberdayaan sosial secara efektif. Seiring dengan perkembangan zaman yang semakin pesat terutama di era 4.0 dan 5.0 salah satunya adalah perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) serta aplikasi mobile berbasis Android memberikan peluang baru dalam mendukung pengelolaan sampah. IoT memungkinkan perangkat seperti sensor ultrasonik, load cell, dan mikrokontroler ESP32 terhubung dengan aplikasi mobile untuk memantau kondisi secara real-time[6]. Di sisi lain, penggunaan aplikasi mobile semakin relevan karena tingkat penetrasi smartphone di Indonesia mencapai lebih dari 70% populasi (Statista, 2023), sehingga pendekatan digital dapat menjadi solusi yang efektif. Salah satu inovasi yang potensial yang dapat meningkatkan kesadaran masyarakat adalah penerapan smart bin berbasis IoT yang terhubung dengan aplikasi mobile, dimana sampah yang dibuang oleh masyarakat memiliki umpan balik berupa suara ucapan terimakasih yang keluar dari spiker dan nilai yaitu berupa poin, notifikasi, serta riwayat aktivitas. Sampah yang tadinya dianggap tidak bernilai dengan adanya inovasi ini membuat sampah sangat bernilai bagi masyarakat[7]. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan motivasi masyarakat untuk berpartisipasi aktif dalam pengelolaan sampah, karena adanya sistem insentif dan transparansi data[8]. Teknologi Internet of Things (IoT) merupakan salah satu solusi inovatif yang telah terbukti efektif di berbagai sektor seperti smart city, pertanian, dan kesehatan. Namun, penerapan IoT dalam pengelolaan sampah, khususnya di Tingkat komunitas, masih sangat terbatas [9]. Integrasi sensor IoT pada tempat sampah dapat membantu memantau volume secara real-time, menghasilkan data yang akurat, serta mendukung sistem pengangkutan sampah yang lebih efisien dan tepat waktu [10].

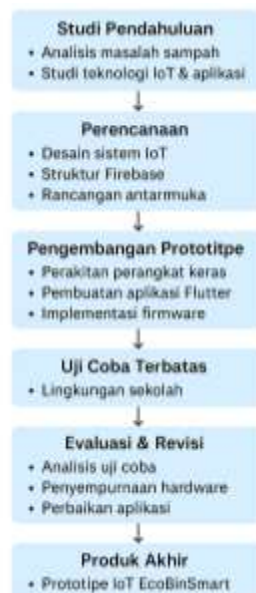
Penelitian ini akan dilaksanakan di dua lokasi berbeda, yaitu permukiman warga dan lingkungan sekolah, sebagai representasi dari konteks sosial yang berbeda. Pemilihan lokasi ini bertujuan untuk mengukur efektivitas dan adaptabilitas sistem dalam mengedukasi serta mendorong partisipasi aktif masyarakat umum dan generasi muda dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Lokasi yang peneliti pilih yaitu tepat di lingkungan II Mabur dan Sekolah SMK Swasta Perguruan Mabur. Hasil dari observasi yang peneliti tinjau pengolahan sampah di lingkungan ini sangat kurang baik, dimana sampah Masyarakat tersebut digantung dipohon-pohon yang ada dipinggir dan diangkut oleh petugas pada pagi hari belajar mereka. terkadang sampah yang digantung jatuh dan berserakan di bawah pohon. Kondisi ini tidak hanya menimbulkan kesan jorok dan kotor, tetapi juga berpotensi menjadi tempat berkembang biaknya nyamuk yang dapat mengakibatkan penyakit demam berdarah, begitu pula di sekolah yang menjadi lokasi penelitian, pengelolaan sampah masih sangat terbatas, yaitu hanya menggunakan tong bekas untuk menampung berbagai jenis sampah. Kondisi ini sering menyebabkan sampah berserakan di halaman sekolah dan pada akhirnya dibakar. Praktik tersebut tidak hanya mencemari lingkungan, tetapi juga menurunkan kualitas udara yang dihirup siswa, yang berimplikasi pada terganggunya kesehatan dan proses

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah aplikasi mobile IoT yang dapat meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah berkelanjutan. Aplikasi ini dirancang untuk memfasilitasi interaksi pengguna dengan smart bin, memberikan poin penghargaan, serta menyimpan data aktivitas ke dalam sistem berbasis cloud (Firebase). Dengan adanya sistem ini, diharapkan tercipta motivasi baru bagi masyarakat dalam mendukung program pengelolaan sampah berkelanjutan yang lebih efektif (Susanto, 2022).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan metode Research and Development (R&D) yang diadaptasi dengan pendekatan prototyping. Model ini dipilih karena sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu mengembangkan suatu produk berupa prototipe tempat sampah pintar (EcoBinSmart) yang terintegrasi dengan aplikasi mobile berbasis Android. Adapun tahapan penelitian dijabarkan sebagai berikut: Proses penelitian dilaksanakan melalui 6 tahap utama sebagai berikut:



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.2 Studi Pendahuluan

Tahap ini diawali dengan melakukan studi literatur untuk mengidentifikasi permasalahan utama terkait pengelolaan sampah sekolah dan rumah tangga. Literatur yang dikaji meliputi isu global dan nasional mengenai sampah, potensi pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT), serta penerapan *gamifikasi* dalam meningkatkan partisipasi masyarakat. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan analisis kebutuhan pengguna (guru dan siswa) sebagai dasar dalam merancang sistem.

2.3 Perencanaan

Berdasarkan hasil studi pendahuluan, dilakukan perencanaan yang mencakup desain arsitektur sistem IoT, struktur basis data, dan rancangan aplikasi mobile. Arsitektur sistem mencakup komponen ESP32, sensor ultrasonik JSN-SR04T, servo motor, DFPlayer Mini, LCD I2C, dan tombol manual. Sementara itu, struktur basis data menggunakan Firebase Realtime Database dengan node utama *users*, *history*, dan *bins*. Rancangan antarmuka aplikasi dikembangkan menggunakan Flutter dengan fitur login, pemindaian QR code, sistem poin, riwayat, dan leaderboard. Selain itu, ditetapkan pula algoritma confirm-first strict drop, yaitu mekanisme validasi bahwa sampah benar-benar masuk sebelum poin diberikan kepada pengguna. Untuk memperjelas rancangan perangkat keras, disusun tabel pemetaan pin (pin mapping) ESP32 yang menjelaskan hubungan antara tiap komponen dengan fungsinya. Pemetaan ini menjadi pedoman pada tahap implementasi perangkat keras agar proses integrasi lebih terarah dan meminimalkan kesalahan koneksi. Tabel 1 berikut menyajikan hasil pemetaan pin yang digunakan pada sistem EcoBinSmart.

Tabel 1. Pin Mapping ESP32

Komponen	ESP32 Pin	Label Board	Keterangan Fungsi
Ultrasonik Organik (TRIG)	GPIO5	D5	Mengirim sinyal trigger untuk deteksi ketinggian sampah organik
Ultrasonik Organik (ECHO)	GPIO18	D18	Menerima sinyal pantulan (echo) sebagai data jarak organik
Ultrasonik Anorganik (TRIG)	GPIO15	D15	Mengirim sinyal trigger untuk deteksi ketinggian sampah anorganik
Ultrasonik Anorganik (ECHO)	GPIO4	D4	Menerima sinyal pantulan (echo) sebagai data jarak anorganik
Servo Organik	GPIO23	D23	Menggerakkan tutup tong organik (servo MG996R)
Servo Anorganik	GPIO19	D19	Menggerakkan tutup tong anorganik (servo MG996R)
LCD I ² C 16×2 (SDA)	GPIO25	D25	Jalur data (SDA) untuk komunikasi I ² C
LCD I ² C 16×2 (SCL)	GPIO26	D26	Jalur clock (SCL) untuk komunikasi I ² C
Tombol Manual Organik	GPIO32	D32	Input manual untuk membuka tong organik (mode INPUT_PULLUP)

Tombol Manual Anorganik	GPIO14	D14	Input manual untuk membuka tong Anorganik (mode INPUT_PULLUP)
LED Status	GPIO12	D12	Indikator koneksi (ON = online, OFF = offline, blink = reconnecting)
LED Full	GPIO13	D13	Indikator tong penuh, aktif ketika kapasitas > 85%
DFPlayer Mini (RX ESP32)	GPIO27	D27	RX ESP32, terhubung ke TX DFPlayer (via resistor 1k)
DFPlayer Mini (TX ESP32)	GPIO33	D33	TX ESP32, terhubung ke RX DFPlayer
WiFi (internal ESP32)	–	–	Koneksi nirkabel internal untuk Firebase
Power Servo	–	–	Suplai daya eksternal 5–6 V/2A, GND disatukan dengan ESP32
DFPlayer VCC	–	–	Suplai daya 5 V untuk DFPlayer + speaker, GND common

2.4 Pengembangan Prototipe

Tahap pengembangan dilakukan dengan merakit perangkat keras sesuai rancangan dan mengembangkan aplikasi mobile. Prototipe perangkat keras terdiri atas ESP32 yang dihubungkan dengan dua sensor ultrasonik untuk mendeteksi volume sampah organik dan anorganik, servo motor sebagai penggerak pintu otomatis, DFPlayer Mini untuk audio feedback, serta LCD I2C sebagai penampil status. Aplikasi Flutter dikembangkan dengan integrasi Firebase Authentication untuk autentikasi pengguna serta Firebase Realtime Database untuk pencatatan data secara real-time. Pada tahap ini juga diimplementasikan firmware ESP32 dengan dukungan dua mode operasi, yaitu mode online (QR code, poin, dan riwayat) serta mode offline (tombol manual tanpa poin).

2.5 Uji Coba Terbatas

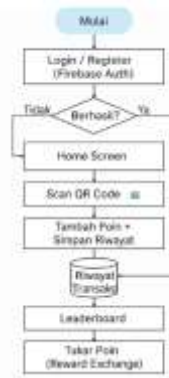
Uji coba terbatas dilakukan di sekolah dengan melibatkan sejumlah guru dan siswa sebagai responden. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menguji fungsionalitas prototipe baik dari sisi perangkat keras maupun perangkat lunak. Aspek yang diuji mencakup akurasi sensor ultrasonik, keandalan servo motor, sinkronisasi audio DFPlayer dan LCD, serta fungsi aplikasi Flutter (login, pemindaian QR code, pencatatan poin, dan riwayat transaksi). Hasil uji coba dicatat melalui observasi, wawancara, dan log sistem Firebase.

2.6 Evaluasi dan Revisi

Data hasil uji coba dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas sistem. Evaluasi dilakukan baik dari sisi teknis maupun respon pengguna. Dari sisi teknis, dilakukan kalibrasi sensor ultrasonik, penyempurnaan sensitivitas notifikasi penuh, serta optimasi firmware agar respon sistem lebih stabil. Dari sisi aplikasi, dilakukan perbaikan antarmuka pengguna (UI/UX), penambahan fitur text-to-speech (TTS) sebagai umpan balik audio, serta optimasi sinkronisasi dengan Firebase. Revisi dilakukan secara iteratif hingga sistem mencapai stabilitas yang memadai.

2.7 Produk Akhir

Tahap terakhir adalah menghasilkan produk akhir berupa prototipe EcoBinSmart yang siap digunakan. Produk ini memiliki dua mode operasi, yaitu mode online yang terhubung ke aplikasi sehingga memungkinkan pencatatan poin dan riwayat, serta mode offline untuk pengguna yang tidak menggunakan aplikasi namun tetap dapat membuang sampah melalui tombol manual. Produk akhir diharapkan tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga mampu meningkatkan motivasi partisipasi masyarakat dalam memilah sampah. Berikut gambar dibawah ini flowchart dari aplikasi EcoBinSmart:



Gambar 2. Flowchart EcoBinSmart

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil penelitian yang telah diperoleh sekaligus pembahasan yang mendalam terhadap temuan-temuan tersebut. Hasil penelitian difokuskan pada proses pengembangan prototipe EcoBinSmart, pengujian fungsionalitas sistem, pencatatan data penggunaan, serta tanggapan pengguna melalui observasi dan wawancara. Hasil dari penelitian ini tertuang pada point dibawah ini :

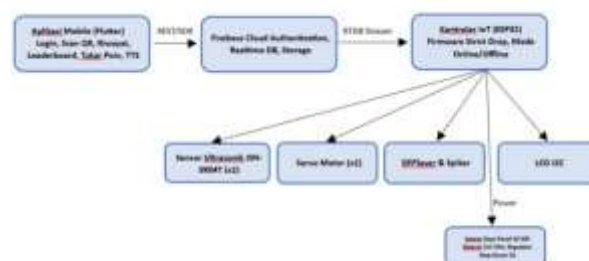
3.1 Arsitektur Sistem EcoBinSmart

Arsitektur EcoBinSmart dirancang untuk mengintegrasikan perangkat keras berbasis Internet of Things (IoT), aplikasi mobile, serta layanan cloud sehingga mampu mendukung pengelolaan sampah secara cerdas, partisipatif, dan berkelanjutan. Secara konseptual, arsitektur ini dibangun dalam tiga lapisan utama, yaitu lapisan pengguna (end-user layer), lapisan perangkat/edge (device layer), dan lapisan layanan cloud (cloud service layer).

Pada lapisan pengguna, interaksi dilakukan melalui aplikasi mobile berbasis Flutter yang bersifat lintas platform. Aplikasi ini berfungsi sebagai antarmuka utama yang memungkinkan pengguna melakukan autentikasi melalui Firebase Authentication, memindai QR code yang terdapat pada tong sampah, memperoleh poin setelah transaksi pembuangan sampah tervalidasi, serta mengakses fitur tambahan seperti riwayat transaksi, leaderboard, dan penukaran poin dengan reward. Lapisan ini merepresentasikan pintu masuk sistem yang secara langsung menghubungkan partisipasi masyarakat dengan mekanisme teknis pengelolaan sampah.

Pada lapisan perangkat/edge, sistem dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 yang bertugas memproses data dari sensor dan mengendalikan aktuator. Dua sensor ultrasonik JSN-SR04T dipasang pada tong organik dan anorganik untuk mendeteksi volume sampah, sedangkan servo motor menggerakkan penutup tong sesuai instruksi sistem. Modul DFPlayer Mini dan LCD I2C menyediakan umpan balik audio dan visual, sementara tombol manual serta LED indikator memastikan perangkat tetap dapat digunakan meskipun dalam mode offline. Seluruh komponen terhubung dalam suatu rangkaian yang memperoleh daya dari subsistem energi mandiri berbasis panel surya, baterai AGM, dan regulator step-down sehingga perangkat dapat beroperasi secara independen dari sumber listrik PLN.

Dengan rancangan arsitektur ini, EcoBinSmart tidak hanya berfungsi sebagai prototipe teknis, tetapi juga sebagai ekosistem yang menghubungkan masyarakat, perangkat cerdas, dan layanan cloud. Desain tiga lapisan ini menjamin transparansi, keamanan, serta keberlanjutan, sekaligus memberikan peluang untuk pengembangan lebih lanjut melalui integrasi fitur analitik, notifikasi adaptif, dan dashboard monitoring pada masa mendatang. Berikut arsitektur sistem Ecobinsmart.



Gambar 3. Arsitektur sistem EcoBinSmart.

3.2 Hasil Pengembangan Produk

Produk penelitian berupa prototipe EcoBinSmart berhasil dikembangkan dengan mengintegrasikan perangkat keras berbasis ESP32, dua sensor ultrasonik JSN-SR04T, dua servo motor sebagai penggerak pintu otomatis, modul DFPlayer Mini untuk audio, serta LCD I2C sebagai penampil status, menggunakan solar panel 50wp, PWM Solar Chager dan batre AGM 9AH 12V dan DC-DC step-down 5A Sebagai penurun tegangan. Panel surya pada EcoBinSmart berfungsi sebagai sumber daya utama berbasis green energy, yang mengisi baterai dan menyuplai listrik untuk ESP32, sensor, servo, serta sistem audio secara mandiri tanpa bergantung pada PLN, sehingga mendukung konsep ramah lingkungan dan berkelanjutan. Selain itu, ditambahkan tombol manual untuk mendukung penggunaan offline mode ketika pengguna tidak menggunakan aplikasi.

1. Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler utama yang berfungsi untuk mengolah input dari sensor serta mengendalikan aktuator.



Gambar 4. Mikrokontroler ESP32

2. Sensor Ultrasonik JSN-SR04T dan Sevo Motor

Dua buah Sensor Ultrasonik JSN-SR04T dipasang pada masing-masing tong sampah organik dan anorganik untuk mendeteksi volume sampah yang masuk. Data sensor ini dikirim secara real-time ke Firebase sehingga dapat dipantau melalui aplikasi dan Untuk mekanisme buka-tutup, digunakan dua buah servo motor yang dikendalikan oleh ESP32 berdasarkan perintah dari aplikasi mobile atau tombol manual.

3. MP3 DFPlayer

Modul DFPlayer Mini untuk memutar file audio tertentu yang sudah tersimpan di kartu microSD yang dikeluarkan oleh Spiker yang memberikan umpan balik suara berupa instruksi atau notifikasi kepada pengguna manual berupa teks suara “Terimakasih anda telah membuang sampah organik atau anorganik pada tempatnya”, dan bagi pengguna yang menggunakan aplikasi suara akan muncul pada smartphone android mereka

4. LCD I2C Display Blue

LCD I2C Display Blue pada EcoBinSmart berfungsi menampilkan status volume tong (persentase kapasitas terisi) serta status transaksi (hasil pemindaian QR, konfirmasi pembuangan, dan pemberian poin) secara real-time guna mendukung keterbacaan informasi oleh pengguna.

5. Solar Panel

Pada subsistemdaya, EcoBinSmart menggunakan panel surya 50 Wp yang dipadukan dengan pengatur pengisian tipe PWM (solar charge controller), baterai AGM 12 V 9 Ah, serta modul DC-DC step-down 5 A sebagai penurun tegangan ke rel 5 V dan 3,3 V. Panel surya berperan sebagai sumber daya utama berbasis green energy yang mengisi baterai dan menyuplai daya bagi ESP32, sensor, aktuator servo, dan sistem audio secara mandiri (off-grid) tanpa ketergantungan pada PLN. Pengontrol PWM mengatur proses pengisian untuk mencegah overcharge dan menyediakan perlindungan low-voltage disconnect (LVD) agar baterai tidak mengalami pelepasan berlebih. Energi dari baterai kemudian diturunkan melalui konverter step-down untuk memenuhi arus puncak beban (servo/DFPlayer) sekaligus menjaga kestabilan tegangan pada rangkaian logika. Konfigurasi ini meningkatkan keandalan operasional sekaligus mendukung prinsip keberlanjutan melalui pemanfaatan energi terbarukan.

Dari sisi perangkat lunak, aplikasi mobile EcoBinSmart dikembangkan menggunakan Flutter sehingga dapat berjalan lintas platform, dengan dukungan Firebase Authentication untuk autentikasi pengguna dan Firebase Realtime Database untuk pencatatan transaksi secara real-time. Aplikasi ini memiliki fitur utama berupa login/register, home screen dengan akses ke menu utama, pemindaian QR code sebagai pintu masuk transaksi pembuangan sampah, riwayat transaksi yang mencatat jenis sampah, volume, waktu, dan poin yang diperoleh, leaderboard untuk menampilkan peringkat pengguna, serta fitur tukar poin yang memungkinkan konversi poin

menjadi reward. Selain itu, aplikasi juga dilengkapi notifikasi kapasitas hampir penuh dan text-to-speech (TTS) sebagai umpan balik audio interaktif berupa suara “Terima kasih (nama user) anda telah membuang sampah organik atau anorganik pada tempatnya”. Sistem mendukung dua mode operasi, yaitu online mode (login, scan QR, poin tercatat, dan riwayat tersimpan di Firebase) serta offline mode (menggunakan tombol manual tanpa poin, namun tetap terkunci apabila tong penuh). Berikut ini fitur utama aplikasi Ecobinsmart.

a. Halaman Login & Register

Antarmuka login aplikasi EcoBinSmart berbasis Firebase Authentication. Pengguna memasukkan email dan kata sandi untuk masuk ke sistem. Kemudian pada halaman registrasi, pengguna harus terlebih dahulu mengisi username berupa email dan password dan nantinya sebagai fitur pemulihan akun (account recovery) ketika lupa password. Setelah berhasil, akun otomatis tercatat di Firebase Authentication dan node users di RTDB dan akan mengarah langsung ke halaman login.



Gambar 7. Halaman Login & Register

b. Halaman Home Screen (Pengguna)

Halaman Home menjadi titik mulai setelah pengguna berhasil login. Tampilan dibuat minimalis dan fokus pada aksi utama: memindai QR pada tong sampah, elemen Header menampilkan nama aplikasi serta beberapa ikon pintasan berupa notifikasi, reward, pemindaian cepat, dan logout keluar aplikasi. Area aksi utama di tengah layar menampilkan ilustrasi QR dan tombol “Scan QR Sekarang” untuk memulai pemindaian. Bottom navigation menyediakan tiga tab yaitu home yang berfungsi kembali ke halaman utama atau pemindaian, History berfungsi melihat riwayat pembuangan sampah dan perolehan poin dan profile untuk melihat profile, total poin dan terdapat empat tombol yaitu kirim pesan keadmin, inbox notifikasi, riwayat penukaran dan logout.



Gambar 8. Halaman Home Screen (Pengguna)

c. Halaman Pemindaian QR

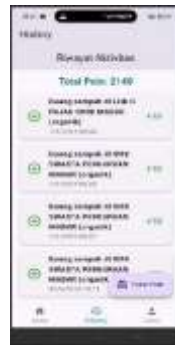
Pada menu Home, pengguna menekan tombol “Scan QR Sekarang” sehingga kamera aktif untuk memindai label QR yang ditempel pada tiap tong. Kode QR berisi jenis tong dan lokasi dengan pola organik dan anorganik. Jika valid, aplikasi mengambil data status terbaru tong dari Realtime Database (RTDB) untuk ditampilkan pada layar berikutnya. Jika tidak valid, aplikasi menampilkan pesan kesalahan dan pengguna diminta memindai ulang.



Gambar 9. Pemindaian QR

d. Halaman Riwayat/History Transaksi

Tampilan Riwayat Aktivitas menyajikan akumulasi poin pengguna di bagian atas dan daftar transaksi poin di bawahnya. Setiap kartu berisi Lokasi & jenis tong misalnya Link II Pajak Sore Mabar (organik), SMK Swasta Perguruan Mabar (organik), nilai poin yang diperoleh (ikon hijau “+10”) dan Tanggal & waktu transaksi. Entri riwayat dibuat otomatis setiap kali QR lokasi valid dipindai dan penambahan poin berhasil. Tombol “Tukar Poin” pada sudut kanan bawah mengarahkan pengguna ke halaman penukaran hadiah.



Gambar 10. Riwayat Transaksi (History)

e. Halaman Rewards & Redeem

Halaman Tukar Poin menampilkan total poin yang dimiliki pengguna dan daftar hadiah yang sedang aktif misal Pulsa 10.000, Pulsa 20.000, Saldo Dana 15.000. Alur saat pengguna menekan Tukar Sekarang: Alur penukaran adalah sebagai berikut:

- Aplikasi melakukan validasi saldo poin pada pengguna.
- Jika valid, sistem melakukan transaksi pengurangan poin dan mencatat pengajuan penukaran.
- Pengguna menerima notifikasi internal bahwa pengajuan telah diterima.
- Setelah admin menyelesaikan proses pengisian pulsa atau transfer saldo, status pengajuan diperbarui menjadi sukses atau gagal. Perubahan status tersebut ditampilkan kembali pada aplikasi pengguna dan tercatat sebagai bagian dari riwayat transaksi.

Dengan rancangan ini, proses penukaran hadiah tercatat, terverifikasi, dan dapat ditelusuri, sekaligus meminimalkan potensi kesalahan melalui validasi saldo serta pencatatan transaksi yang konsisten.



Gambar 11. Rewards & Redeem

Algoritma Validasi Ketat dengan Konfirmasi Awal (Confirm-First Strict Drop)

Dalam penelitian ini diusulkan sebuah mekanisme kendali transaksi yang dinamakan algoritma validasi ketat dengan konfirmasi awal (confirm-first strict drop). Algoritma ini dirancang untuk memastikan bahwa proses penambahan poin hanya terjadi apabila sistem benar-benar mendeteksi adanya sampah yang masuk ke dalam tong setelah pemindaian QR code. Dengan demikian, risiko manipulasi melalui pemindaian QR berulang tanpa aktivitas pembuangan sampah dapat diminimalisasi.

Alur kerja algoritma dimulai dari proses pemindaian QR code oleh pengguna melalui aplikasi mobile. Hasil pemindaian menghasilkan identitas pengguna (user ID) dan identitas tong sampah yang dikirimkan ke Firebase Realtime Database. Pada tahap ini, sistem membuat entri transaksi baru dengan status pending. Selanjutnya, perangkat ESP32 mengaktifkan sensor ultrasonik untuk memantau adanya perubahan volume tong dalam jangka waktu tertentu (misalnya 15 detik). Apabila sensor mendeteksi perubahan volume yang melebihi ambang batas minimal (lebih besar sama dengan 2% kapasitas atau lebih besar sama dengan 3 cm), maka transaksi divalidasi sebagai confirmed, poin ditambahkan ke akun pengguna, dan data tercatat pada history log. Sebaliknya, jika tidak terdeteksi perubahan volume dalam batas waktu tersebut, transaksi ditandai failed dan tidak menghasilkan poin.

3.3 Hasil Uji Fungsionalitas

Uji fungsionalitas dilakukan untuk menilai sejauh mana subsistem perangkat keras dan perangkat lunak EcoBinSmart dapat berfungsi sesuai rancangan pada dua lingkungan berbeda, yaitu sekolah SMK Swasta Perguruan Mabur dan permukiman Lingkungan II Mabur. Lingkungan sekolah merepresentasikan kondisi terkontrol dengan aktivitas terjadwal, pencahayaan relatif stabil, dan jaringan Wi-Fi sekolah. Sementara itu, permukiman merepresentasikan kondisi acak dengan pencahayaan bervariasi, kebisingan sedang hingga tinggi, dan jaringan fluktuatif. Tujuan pengujian adalah memastikan sistem berjalan normal, stabil, dan menghasilkan data transaksi yang valid. Aspek yang diuji meliputi autentikasi pengguna, pemindaian QR code, validasi sensor confirm-first strict drop, respon servo, umpan balik audio, tampilan LCD, pencatatan riwayat, leaderboard, serta tukar poin.

3.3.1 Uji Login dan Register

Fitur autentikasi dengan Firebase Authentication diuji 30 kali percobaan pada kedua lokasi. Seluruh proses berhasil tanpa kendala 100%, menandakan keamanan dan otentikasi berjalan dengan baik. Hal ini memperkuat bahwa sistem mampu mengidentifikasi pengguna terverifikasi dengan andal.

3.3.2 Uji Pemindaian QR Code

Fitur pemindaian QR diuji sebanyak 50 percobaan dan menghasilkan 47 keberhasilan serta 3 kegagalan (94%). Kegagalan terutama terjadi pada pencahayaan rendah pada sore hari atau pantulan cahaya/silau yang mengganggu pembacaan kamera. Pada lokasi sekolah, tingkat keberhasilan mencapai 96% dengan kegagalan terkait pantulan cahaya, sedangkan di lokasi permukiman keberhasilan 92% dengan kegagalan dominan pada kondisi cahaya redup. Hasil ini menunjukkan bahwa fitur QR cukup andal, namun sensitif terhadap kualitas pencahayaan.

3.3.3 Uji Konfirmasi Sensor (Confirm-First Strict Drop)

Algoritma strict drop diuji 100 kali percobaan. Sebanyak 94 transaksi berhasil divalidasi, sementara 6 gagal. Tingkat keberhasilan 94% dipengaruhi oleh sampah dengan massa sangat ringan seperti plastik tipis yang tidak menghasilkan perubahan ketinggian signifikan. Lokasi Sekolah lebih stabil, karena sampah dominan berupa kertas dan botol plastik dengan keberhasilan 96% dan Lokasi Permukiman lebih variatif plastik tipis, sedotan, kantong kecil dengan keberhasilan 92%.

3.3.4 Uji Servo Buka-Tutup

Servo diuji 100 kali perintah buka-tutup. Sebanyak 96 percobaan berhasil dengan respon cepat, 4 gagal dengan respon lambat (>2 detik). Tingkat keberhasilan 96%. Kegagalan terjadi karena beban sampah menggagalkan penutup tong.

3.3.5 Uji Audio Feedback (DFPlayer Mini)

Modul audio DFPlayer Mini diuji sebanyak 100 kali pemutaran pesan suara. Seluruh percobaan berhasil (100%), baik instruksi “silakan buang sampah” maupun ucapan “terima kasih”. Hal ini menunjukkan keandalan penuh pada aspek audio.

3.3.6 Uji Tampilan LCD I2C

LCD diuji untuk menampilkan status transaksi (QR, konfirmasi, penuh). Dari 100 percobaan, 97 berhasil dan 3 gagal karena keterlambatan sinkronisasi Firebase. Tingkat keberhasilan 97%.

3.3.7 Uji Riwayat Transaksi (History Log)

Sebanyak 120 transaksi diuji terkait pencatatan di Firebase node history. Semua transaksi berhasil tercatat sesuai UID, jenis tong, volume, waktu, dan poin. Tingkat keberhasilan 100%. Hal ini membuktikan integritas data terjaga, tanpa duplikasi maupun kehilangan catatan.

3.3.8 Uji Leaderboard

Leaderboard diuji pada 50 percobaan update ranking pengguna. Seluruh percobaan berhasil (100%). Data peringkat diperbarui otomatis setelah setiap transaksi, sehingga fitur gamifikasi berfungsi sesuai rancangan.

3.3.9 Uji Fitur Tukar Poin

Fitur tukar poin diuji pada 10 percobaan. Sebanyak 9 berhasil, 1 gagal karena koneksi jaringan terputus saat sinkronisasi. Tingkat keberhasilan 90%.

3.3.10 Rekapitulasi Hasil Uji Fungsionalitas

Secara keseluruhan, rata-rata tingkat keberhasilan seluruh fitur adalah 96,8%, sehingga dapat disimpulkan bahwa prototipe EcoBinSmart berfungsi dengan stabil dan layak digunakan pada tahap implementasi terbatas di sekolah maupun di lokasi lingkungan. Untuk hasil uji fungsional dari dua lokasi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3. Hasil Uji Fungsionalitas di Lokasi Sekolah

Fitur yang Diuji	Jumlah Percobaan	Berhasil	Gagal	Keberhasilan (%)
Login & Register	15	15	0	100%
Pemindaian QR Code	25	24	1	96%
Konfirmasi Sensor (Strict Drop)	50	48	2	96%
Servo Buka-Tutup	50	49	1	98%
Audio Feedback	50	50	0	100%
LCD PC	50	49	1	98%
Riwayat Transaksi	60	60	0	100%
Leaderboard	25	25	0	100%
Tukar Poin	5	5	0	100%

Rata-rata Keberhasilan: 98,4%

Tabel 4. Hasil Uji Fungsionalitas di Permukiman

Fitur yang Diuji	Jumlah Percobaan	Berhasil	Gagal	Keberhasilan (%)
Login & Register	15	15	0	100%
Pemindaian QR Code	25	23	2	92%
Konfirmasi Sensor (Strict Drop)	50	46	4	92%
Servo Buka-Tutup	50	47	3	94%
Audio Feedback	50	50	0	100%
LCD PC	50	48	2	96%
Riwayat Transaksi	60	60	0	100%
Leaderboard	25	25	0	100%
Tukar Poin	5	4	1	80%

Rata-rata Keberhasilan: 95,0%

Tabel 5. Rekapitulasi Gabungan (Sekolah + Permukiman)

Fitur yang Diuji	Jumlah Percobaan	Berhasil	Gagal	Keberhasilan (%)
Login & Register	30	30	0	100%
Pemindaian QR Code	50	47	3	94%
Konfirmasi Sensor (Strict Drop)	100	94	6	94%
Servo Buka-Tutup	100	96	4	96%
Audio Feedback	100	100	0	100%
LCD PC	100	97	3	97%

Riwayat Transaksi	120	120	0	100%
Leaderboard	50	50	0	100%
Tukar Poin	10	9	1	90%

Rata-rata Keberhasilan Total: 96,8%

3.3.11 Analisis Perbandingan Lingkungan Uji

Berdasarkan hasil pengujian, terdapat perbedaan tingkat keberhasilan antara lingkungan sekolah dan permukiman. Uji coba di sekolah menunjukkan rata-rata keberhasilan sebesar 98,4%, sementara pada permukiman hanya mencapai 95,0%. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh faktor lingkungan. Pada uji sekolah, kondisi pencahayaan relatif stabil, jaringan Wi-Fi lebih terkontrol, serta jenis sampah yang dominan berupa kertas dan botol plastik menghasilkan deteksi sensor yang konsisten. Hal ini menyebabkan fitur pemindaian QR dan validasi sensor strict drop memiliki keberhasilan lebih tinggi.

Sebaliknya, di lingkungan permukiman, variasi kondisi jauh lebih besar. Faktor pencahayaan redup pada sore hari dan pantulan cahaya menyebabkan kegagalan pada pemindaian QR. Selain itu, keberadaan sampah ringan seperti kantong plastik tipis atau sedotan memengaruhi akurasi deteksi sensor ultrasonik pada fitur strict drop. Fitur tukar poin juga lebih rentan gagal karena bergantung pada kestabilan jaringan internet rumah warga yang tidak selalu optimal.

Secara umum, kedua lokasi tetap menunjukkan bahwa EcoBinSmart berfungsi dengan reliabilitas tinggi lebih besar dari 95%, meskipun terdapat variasi performa akibat kondisi lingkungan. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem cocok digunakan di berbagai skenario, namun perlu dilakukan optimasi tambahan pada algoritma sensor untuk sampah ringan serta peningkatan toleransi pemindaian QR pada kondisi pencahayaan yang kurang ideal.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe EcoBinSmart, sebuah sistem tempat sampah pintar berbasis IoT yang memadukan perangkat keras (ESP32, sensor ultrasonik JSN-SR04T, servo motor, DFPlayer Mini, LCD I2C, dan sistem daya panel surya) dengan perangkat lunak berupa aplikasi mobile berbasis Flutter yang terintegrasi dengan Firebase Authentication dan Realtime Database. Sistem ini dirancang untuk mendukung partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan melalui mekanisme gamifikasi berupa akumulasi poin, leaderboard, serta fitur tukar poin.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh subsistem dapat berfungsi dengan stabil dan konsisten. Uji fungsionalitas di dua lokasi berbeda, yaitu sekolah dan permukiman, membuktikan bahwa prototipe mampu mencapai rata-rata keberhasilan 98,4% di sekolah dan 95,0% di permukiman, dengan rata-rata agregat 96,8%. Perbedaan kinerja terutama dipengaruhi oleh kondisi pencahayaan saat pemindaian QR, variasi jenis sampah ringan yang memengaruhi deteksi sensor, serta kestabilan jaringan internet. Kendati demikian, fitur-fitur inti seperti autentikasi pengguna, pencatatan riwayat transaksi, audio feedback, dan leaderboard menunjukkan reliabilitas penuh dengan tingkat keberhasilan 100%.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa EcoBinSmart layak diimplementasikan pada skala terbatas di sekolah maupun lingkungan masyarakat, serta memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut. Optimalisasi algoritma sensor terhadap sampah ringan, peningkatan toleransi pemindaian QR pada kondisi cahaya redup, serta pengayaan umpan balik multi-modal (audio dan visual) direkomendasikan untuk pengembangan tahap selanjutnya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan kesadaran dan partisipasi masyarakat terhadap pengelolaan sampah yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Potensi Utama atas dukungan fasilitas, pendampingan administratif, dan supervisi selama perencanaan hingga pelaksanaan penelitian ini. Penghargaan yang setinggi-tingginya juga disampaikan kepada Kemdiktisaintek (Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi) melalui skema pendanaan Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun 2025, yang telah memberikan dukungan pembiayaan serta arahan kebijakan sehingga penelitian dan pengembangan prototipe EcoBinSmart dapat terlaksana dengan baik dan menghasilkan luaran yang bermanfaat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Statistik Sampah Nasional. Jakarta: KLHK, 2020.
- [2] A. R. Nasution and H. Siregar, "Partisipasi Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah," *Jurnal Lingkungan*, vol. 12, no. 1, pp. 45–52, 2019.
- [3] Pemerintah Indonesia, Peraturan Presiden No. 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga. Jakarta: Sekretariat Negara, 2017.
- [4] A. Hannan, M. Arebey, R. A. Begum, and H. Basri, "An automated solid waste bin monitoring system using sensor based wireless mesh network," *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pp. 301–306, 2019.
- [5] Suwali, S., Suprpto, S., Panunggul, V. B., Sitanini, A., Noviani, F., & Azalia, I. I. (2024). Inovasi Aplikasi Sadar Lingkungan

- Berbasis Android (Saling Bangga). ADIMA Jurnal Awatara Pengabdian Kepada Masyarakat, 2(2), 19-27.
- [6] Y. Su, Y. Luo, and L. Li, "Smart garbage monitoring system based on IoT," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1187, no. 5, 2020.
 - [7] A. S. Al Mamun, A. A. Hannan, and H. Basri, "Design and implementation of smart waste management system," IEEE Access, vol. 7, pp. 156970–156985, 2019.
 - [8] N. Abdulkareem, R. S. Sulaiman, and F. Alenezi, "IoT-based waste management system for smart cities," International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 11, no. 12, pp. 456–463, 2020.
 - [9] A. J. Hussain, K. Musial, and W. Khan, "Efficient monitoring of waste bins in smart cities using IoT and machine learning," Sustainable Cities and Society, vol. 65, pp. 102–130, 2021.
 - [10] M. T. Islam, M. A. Rahman, and A. Das, "IoT based waste management system for smart city," International Journal of Computer Applications, vol. 175, no. 23, pp. 1–6, 2020.
 - [11] M. N. Mejri and F. Chibani, "Cloud-based IoT platform for smart waste management," Proceedings of the International Conference on Cloud and Big Data Computing (ICCBDC), pp. 76–81, 2021.
 - [12] A. Darmawan and R. C. Saputra, "Implementasi aplikasi mobile Flutter dengan Firebase Authentication," Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi, vol. 10, no. 2, pp. 55–64, 2022.
 - [13] R. L. Wahyudi, "Green computing approach for IoT-based systems in Indonesia," Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer, vol. 12, no. 3, pp. 115–122, 2023.
 - [14] S. R. Putra, "Pemanfaatan energi surya pada sistem IoT untuk lingkungan berkelanjutan," Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Aplikasinya (SENTIA), pp. 201–208, 2022