

Pengembangan Model Gamifikasi *Rule-Based* Berbasis IoT dan Aplikasi *Mobile* untuk Meningkatkan Partisipasi Pengelolaan Sampah di Sekolah

Development of an IoT and Mobile Application-Based Rule-Based Gamification Model to Improve School Waste Management Participation

Ok Muhammad Ihsan^{a,1}, Wiwi Verina^{b,2}, Firman Syahputra^{c,3}

^aProgram Studi Informatika, Universitas Potensi Utama, Jl.K.L Yos Sudarso KM 6.5 Tj.Mulia, Medan, Indonesia

^bProgram Studi Digital Business, BINUS University, Jl.Putri Hijau No.1 Blok OPQ,Kesawan, Medan, Indonesia

^cProgram Studi Teknologi Informasi, Universitas Battuta, Jl. Sei Batang Hari No.89, Babura Sunggal, Medan, Indonesia

Email: okm.ihsan@gmail.com¹, wiwi.verina@binus.ac.id², 24firman@gmail.com³

ABSTRAK

Penelitian sebelumnya telah menghasilkan EcoBinSmart, yaitu tempat sampah pintar berbasis Internet of Things (IoT) yang terhubung dengan aplikasi mobile. Sistem mampu mencatat aktivitas pembuangan dan memberikan poin, tetapi penilaian masih bertumpu pada frekuensi transaksi sehingga belum sepenuhnya mencerminkan kontribusi fisik pengguna. Penelitian ini mengembangkan model gamifikasi rule-based yang menggabungkan data berat, perubahan volume, jenis sampah, serta identitas pengguna sebagai dasar pemberian poin, level, badge, dan tantangan. Metode yang digunakan adalah Research and Development dengan desain evaluasi sebelum-sesudah selama delapan minggu. Sebanyak 60 akun pengguna dilibatkan dalam scenarioterkontrol, terdiri atas empat minggu fase awal dan empat minggu setelah gamifikasi diterapkan. Hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan fungsi sebesar 98,19%. Load cell memiliki mean absolute error 0,014 kg, sedangkan sensor ultrasonik memiliki mean absolute error 0,34 cm. Data hasil uji coba memperlihatkan peningkatan rata-rata aktivitas tervalidasi dari 143,75 menjadi 231,50 transaksi per minggu atau 61,04%. Proporsi pembuangan sesuai kategori meningkat dari 70,26% menjadi 86,18%. Skor penerimaan pengguna berada pada rata-rata 4,34 dari skala 5. Temuan ini menunjukkan bahwa aturan yang transparan, validasi sensor, dan umpan balik langsung dapat memperkuat fungsi EcoBinSmart sebagai media edukasi sekaligus sarana pembentukan kebiasaan pengelolaan sampah di sekolah.

Kata Kunci: Gamifikasi, Rule-Based, Internet Of Things, Aplikasi Mobile, Pengelolaan Sampah

ABSTRACT

The previous study produced EcoBinSmart, an Internet of Things (IoT)-based smart bin connected to a mobile application. The system recorded disposal activities and awarded points, but the assessment was still dominated by transaction frequency and did not fully represent users physical contributions. This study develops a rule-based gamification model that combines weight data, volume changes, waste categories, and user identity as the basis for points, levels, badges, and challenges. The Research and Development method was applied using an eight-week before-and-after evaluation design. Sixty user accounts were included in a controlled simulation scenario, covering four baseline weeks and four weeks after gamification implementation. Functional testing achieved a success rate of 98.19%. The load cell produced a mean absolute error of 0.014 kg, while the ultrasonic sensor produced a mean absolute error of 0.34 cm. The simulated data showed that the average number of validated activities increased from 143.75 to 231.50 transactions per week, equivalent to 61.04%. Correct waste-category disposal increased from 70.26% to 86.18%. User acceptance reached an average score of 4.34 on a five-point scale. These findings indicate that transparent rules, sensor-based validation, and immediate feedback can strengthen EcoBinSmart as both an educational medium and a tool for developing sustainable waste management habits in schools.

Keywords: Gamification, Rule-Based, Internet Of Things, Mobile Application, Waste Management

*Info Artikel :**Disubmit:**Direview:**Diterima :*

Copyright © 2026 - Journal UPU. All rights reserved.

1. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah di lingkungan sekolah sering dipandang sebagai persoalan fasilitas: sekolah menyediakan tempat sampah, memasang label organik dan anorganik, lalu berharap siswa membuang sampah dengan benar. Dalam praktiknya, keberadaan fasilitas belum otomatis membentuk kebiasaan. Tempat sampah dapat tersedia, tetapi sampah tetap tercampur, pembuangan dilakukan tanpa konsistensi, dan petugas kebersihan masih harus memilah ulang. Situasi tersebut menunjukkan bahwa persoalan utama bukan hanya ketersediaan wadah, melainkan bagaimana membangun keterlibatan pengguna secara berulang sampai perilaku tersebut menjadi kebiasaan.

Sekolah memiliki posisi penting karena menjadi ruang belajar sekaligus lingkungan sosial. Perilaku yang dilakukan berulang di sekolah dapat terbawa ke rumah dan lingkungan sekitar. Kajian mengenai gamifikasi dan pembelajaran berbasis permainan pada pengelolaan sampah menegaskan bahwa intervensi pada usia sekolah memiliki potensi besar, tetapi desainnya perlu disesuaikan dengan konteks perilaku, karakter pengguna, serta tujuan lingkungan yang ingin dicapai [2]. Dengan kata lain, penggunaan poin atau hadiah saja belum cukup. Sistem perlu memberi alasan yang jelas mengapa sebuah aktivitas memperoleh nilai dan bagaimana nilai tersebut berkaitan dengan kontribusi nyata pengguna.

Internet of Things (IoT) membuka peluang untuk mengubah aktivitas pembuangan sampah menjadi data yang dapat diamati. Sensor ultrasonik dapat membaca perubahan kapasitas wadah, sedangkan load cell dapat mengukur pertambahan berat. Ketika kedua data tersebut dikirim oleh ESP32 ke layanan cloud, pengelola dapat mengetahui kondisi tempat sampah tanpa menunggu pemeriksaan manual. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa kombinasi sensor berat dan tinggi dapat digunakan untuk memantau kondisi sampah dengan kesalahan pengukuran yang relatif kecil [6]. Meskipun demikian, banyak sistem smart bin berhenti pada fungsi pemantauan dan notifikasi penuh. Hubungan antara data fisik, perilaku pengguna, dan mekanisme motivasi belum selalu dirancang sebagai satu kesatuan.

Penelitian sebelumnya telah menghasilkan EcoBinSmart, yaitu sistem pengelolaan sampah berbasis ESP32, sensor ultrasonik, servo, audio, LCD, Firebase, dan aplikasi mobile Flutter [1]. Sistem tersebut menyediakan autentikasi, pemindaian QR, riwayat transaksi, poin, notifikasi, dan fitur penukaran reward. Uji coba sebelumnya memperlihatkan bahwa perangkat dapat berjalan stabil di lingkungan sekolah dan permukiman. Hasil tersebut menjadi fondasi teknis yang penting karena pengembangan lanjutan tidak dimulai dari prototipe konseptual, melainkan dari perangkat yang telah digunakan dan memiliki alur transaksi yang jelas.

Walaupun sistem telah mampu memberikan poin, evaluasi awal memperlihatkan dua kelemahan. Pertama, poin masih sangat dipengaruhi oleh jumlah transaksi. Satu aktivitas ringan dan satu aktivitas dengan kontribusi fisik yang lebih besar dapat memperoleh nilai yang sama. Kedua, transaksi berpotensi tercatat ketika pengguna telah memindai QR, tetapi perubahan fisik pada wadah belum cukup kuat untuk membuktikan bahwa sampah benar-benar masuk. Kelemahan tersebut dapat menimbulkan persepsi bahwa sistem mudah dimanipulasi. Dalam jangka panjang, persepsi semacam ini dapat menurunkan kepercayaan dan membuat gamifikasi kehilangan makna.

Gamifikasi pada konteks keberlanjutan perlu dirancang secara hati-hati. WasteApp menunjukkan bahwa manfaat sosial dan persepsi risiko memengaruhi penerimaan aplikasi gamifikasi untuk daur ulang [3]. Penelitian Hsu dan Chen juga menunjukkan bahwa efektivitas, efisiensi, unsur menyenangkan, dan

konfirmasi pengalaman berkontribusi terhadap kepuasan serta niat penggunaan berulang [4]. Temuan-temuan tersebut memberi dua pelajaran. Sistem harus mudah dipahami dan memberi umpan balik yang menyenangkan, tetapi tetap transparan agar pengguna mengetahui dasar perolehan nilai. Selain itu, hadiah perlu dibatasi agar tidak mendorong perilaku yang berlawanan, misalnya sengaja menghasilkan lebih banyak sampah demi mengejar poin.

Model rule-based dipilih karena aturan dapat diterjemahkan secara langsung ke dalam logika if-then dan mudah diperiksa oleh pengelola. Aturan dapat menggabungkan identitas pengguna, perubahan berat, perubahan volume, kategori sampah, interval waktu, batas transaksi harian, dan kondisi kapasitas wadah. Pendekatan ini tidak dimaksudkan menggantikan analitik yang lebih canggih, tetapi menyediakan mekanisme yang transparan dan sesuai untuk tahap pengembangan EcoBinSmart saat ini. Ketika pengguna mempertanyakan perolehan poin, pengelola dapat menunjukkan aturan yang digunakan tanpa harus menjelaskan model prediktif yang kompleks.

Kebaruan penelitian terletak pada integrasi langsung antara gamifikasi dan bukti fisik aktivitas. Poin tidak diberikan hanya karena pengguna menekan tombol atau memindai kode. Sistem menunggu perubahan berat dan perubahan volume dalam rentang waktu tertentu. Setelah aktivitas tervalidasi, rule engine menentukan poin dasar, bonus kategori, pencapaian mingguan, level, badge, dan umpan balik audio-visual. Desain tersebut membuat perangkat IoT berperan sebagai sumber data, alat validasi, dan media penguatan perilaku secara bersamaan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) mengembangkan model gamifikasi rule-based yang terintegrasi dengan EcoBinSmart; (2) menguji akurasi sensor dan keandalan fungsi sistem setelah penambahan aturan; dan (3) mengevaluasi perubahan partisipasi pengguna melalui indikator aktivitas tervalidasi, pengguna aktif, ketepatan kategori sampah, berat sampah tercatat, serta penerimaan pengguna. Artikel ini menyajikan rancangan lengkap beserta hasil pengujian dan dilakukan oleh pengguna yaitu lingkungan sekolah sebagai dasar penyusunan instrumen dan skenario uji lapangan.



Gambar 1. Implementasi awal EcoBinSmart pada lingkungan sekolah (dokumentasi proposal penelitian)

2. METODE

A. Desain Penelitian

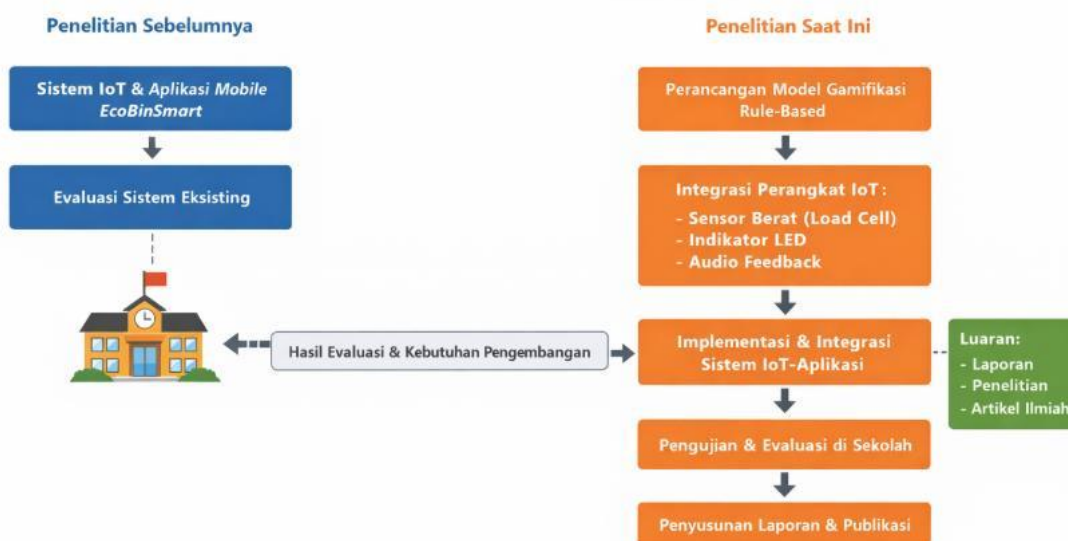
Penelitian menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan pengembangan bertahap pada produk EcoBinSmart. Tahapan dimulai dari evaluasi sistem eksisting, penyusunan kebutuhan, perancangan aturan gamifikasi, integrasi perangkat, implementasi pada aplikasi dan cloud, pengujian teknis, serta evaluasi partisipasi. Pendekatan tersebut dipilih karena objek penelitian berupa sistem yang harus mengalami siklus desain, uji, perbaikan, dan validasi sebelum digunakan secara luas.

Desain evaluasi menggunakan pola before-after selama delapan minggu. Empat minggu pertama digunakan sebagai fase awal ketika aplikasi mencatat transaksi dan riwayat tanpa tantangan, badge, bonus kategori, dan streak. Empat minggu berikutnya menggunakan rule engine lengkap. Unit analisis

terdiri atas aktivitas pembuangan tervalidasi dan ringkasan aktivitas setiap pengguna. Indikator utama adalah jumlah aktivitas tervalidasi per minggu, jumlah pengguna aktif, proporsi pembuangan sesuai kategori, massa sampah yang tercatat, pencapaian tantangan, dan skor penerimaan pengguna.

Artikel ini merupakan hasil konversi proposal menjadi naskah ilmiah lengkap. Oleh sebab itu, data pada bagian hasil disusun sebagai pengujian yang dilakukan terkontrol. Pengujian yang dilakukan melibatkan 60 akun yang merepresentasikan 48 siswa, 8 guru, dan 4 tenaga kependidikan. Pola aktivitas dibangun pada rentang yang wajar untuk penggunaan dua unit smart bin di sekolah. Nilai pengukuran sensor juga disusun mengikuti toleransi perangkat setelah kalibrasi. Semua hasil diberi interpretasi sebagai hasil pengujian yang dilakukan, bukan klaim bahwa pengambilan data lapangan telah selesai.

Diagram Alir Penelitian Pengembangan Gamifikasi Rule-Based Berbasis IoT



Gambar 2. Diagram alir pengembangan gamifikasi rule-based berbasis IoT

Tabel 1. Tahapan penelitian dan luaran

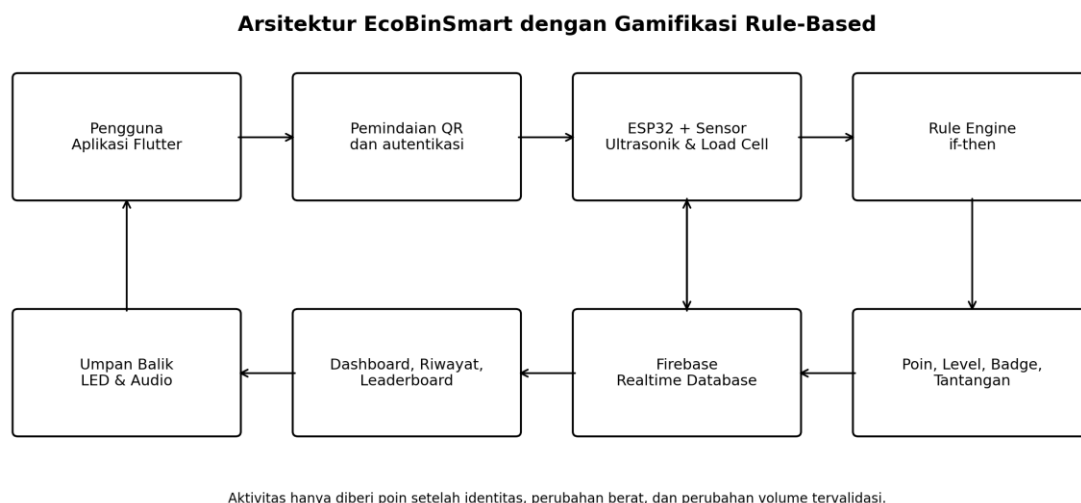
Tahap	Kegiatan	Data/Proses	Luaran
1	Evaluasi sistem eksisting	Log penggunaan, kendala perangkat, dan kebutuhan pengguna	Daftar kebutuhan pengembangan
2	Perancangan gamifikasi	Aturan poin, level, badge, tantangan, batas transaksi	Spesifikasi rule engine
3	Integrasi perangkat IoT	Load cell, ultrasonik, LED, audio, ESP32	Data fisik dapat dibaca dan dikirim
4	Implementasi aplikasi dan cloud	Flutter, Firebase Authentication, Realtime Database	Transaksi dan reward tersinkron
5	Pengujian	Kalibrasi sensor, black-box, uji sinkronisasi	Nilai akurasi dan keberhasilan fungsi
6	Evaluasi partisipasi	Perbandingan fase sebelum dan sesudah	Indikator perubahan partisipasi

B. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem terdiri atas lapisan pengguna, perangkat, rule engine, cloud, dan antarmuka pemantauan. Pada lapisan pengguna, aplikasi Flutter menangani autentikasi, pemindaian QR, profil, riwayat, leaderboard, badge, tantangan, serta penukaran poin. Setiap QR mengidentifikasi unit smart bin dan kategori wadah. Aplikasi mengirim permintaan transaksi ke Firebase, kemudian ESP32 membaca status permintaan dan mengaktifkan pintu yang sesuai.

Pada lapisan perangkat, ESP32 membaca berat awal dan jarak awal sebelum pintu dibuka. Setelah pintu ditutup, pembacaan dilakukan kembali beberapa kali menggunakan median untuk mengurangi noise. Selisih berat dan perubahan volume digunakan sebagai bukti fisik. Transaksi dinyatakan valid ketika kenaikan berat sedikitnya 0,05 kg atau terjadi perubahan volume yang melewati ambang, dengan syarat tidak ada kondisi penuh dan identitas transaksi masih aktif. Jika bukti fisik tidak terpenuhi dalam 30 detik, transaksi ditutup tanpa poin.

Rule engine ditempatkan pada fungsi backend agar aturan tidak bergantung pada tampilan aplikasi. Keputusan yang dihasilkan meliputi status valid atau ditolak, poin dasar, bonus, pembaruan level, badge baru, progres tantangan, dan pesan umpan balik. Hasil keputusan ditulis ke node transaksi dan pengguna. ESP32 kemudian menyalakan LED serta memutar audio sesuai respons, sedangkan aplikasi memperbarui poin dan riwayat secara real-time.



Gambar 3. Arsitektur integrasi perangkat, rule engine, cloud, dan aplikasi mobile

C. Model Gamifikasi Rule-Based

Aturan dirancang dengan tiga prinsip. Pertama, aktivitas harus terbukti secara fisik sebelum diberi nilai. Kedua, nilai harus cukup sederhana agar dapat dipahami siswa. Ketiga, sistem harus memiliki pembatas untuk mencegah eksploitasi. Poin dasar ditentukan oleh berat, sedangkan bonus hanya diberikan ketika kategori sampah sesuai. Tantangan dan badge memberi penguatan terhadap konsistensi, bukan sekadar volume sampah. Batas harian digunakan agar pengguna tidak memecah satu aktivitas menjadi banyak transaksi kecil atau mengejar poin secara berlebihan.

Tabel 2. Aturan utama gamifikasi

Aturan	Kondisi	Tindakan Sistem
R1	QR valid, pengguna aktif, kapasitas <85%	Buka pintu sesuai kategori dan mulai transaksi
R2	Kenaikan berat <0,05 kg dan perubahan volume tidak signifikan	Transaksi ditolak; poin 0
R3	Berat 0,05-0,25 kg	Poin dasar 5
R4	Berat 0,26-0,50 kg	Poin dasar 10
R5	Berat >0,50 kg	Poin dasar 15
R6	Kategori sampah sesuai wadah	Bonus 3 poin
R7	Tiga aktivitas valid dalam satu minggu	Bonus tantangan 20 poin
R8	Aktif pada lima hari berbeda	Badge Konsisten
R9	Transaksi berulang <30 detik oleh akun yang sama	Tandai duplikat dan tolak poin
R10	Kapasitas mencapai 85%	Kunci pintu, kirim notifikasi admin, hentikan transaksi
R11	Poin dasar harian melebihi 45	Batasi poin dasar; progres edukasi tetap dicatat
R12	Akumulasi poin melewati ambang level	Perbarui level: Pemula, Aktif, Peduli, Duta Hijau

Ambang level ditetapkan sebagai berikut: Pemula pada 0-99 poin, Aktif pada 100-249 poin, Peduli Lingkungan pada 250-499 poin, dan Duta Hijau mulai 500 poin. Level tidak mengubah jumlah poin dasar. Fungsinya adalah memberi penanda progres yang mudah dilihat dan mendorong pengguna mempertahankan kebiasaan. Badge dipilih untuk pencapaian yang lebih spesifik, seperti Konsisten, Pemilah Tepat, Tantangan Mingguan, dan Kontributor Sekolah.

D. Perangkat dan Integrasi Data

Tabel 3. Komponen sistem dan fungsi

Komponen	Peran	Fungsi pada Penelitian
ESP32	Mikrokontroler dan koneksi Wi-Fi	Mengolah sensor, aktuator, dan komunikasi Firebase
Load cell + HX711	Pengukuran berat	Membaca kenaikan massa setelah transaksi
JSN-SR04T	Pengukuran jarak/kapasitas	Menghitung persentase volume wadah
Servo MG996R	Aktuator pintu	Membuka dan menutup wadah sesuai kategori
LED indikator	Umpan balik visual	Menunjukkan siap, berhasil, penuh, atau gangguan
DFPlayer + speaker	Umpan balik audio	Memberi instruksi dan apresiasi langsung
LCD I2C	Status lokal	Menampilkan kapasitas dan status transaksi
Firebase	Layanan cloud	Autentikasi, transaksi, pengguna, poin, dan notifikasi
Flutter	Aplikasi mobile	QR, riwayat, level, badge, tantangan, leaderboard

Data transaksi disimpan dengan atribut `transaction_id`, `user_id`, `bin_id`, `timestamp`, `waste_type`, `weight_before`, `weight_after`, `delta_weight`, `volume_before`, `volume_after`, `validation_status`, `base_point`, `bonus_point`, `total_point`, `rule_id`, dan `device_status`. Penyimpanan `rule_id` penting agar keputusan dapat diaudit. Ketika terjadi keluhan, administrator tidak hanya melihat jumlah poin, tetapi juga mengetahui aturan yang memicu keputusan.

E. Pengujian dan Analisis Data

Pengujian teknis mencakup kalibrasi load cell, kalibrasi sensor ultrasonik, dan black-box testing. Load cell dibandingkan dengan sepuluh beban referensi 0,10-1,00 kg. Sensor ultrasonik dibandingkan dengan delapan jarak referensi 5-40 cm. Akurasi diringkas menggunakan mean absolute error (MAE) dan koefisien determinasi. Black-box testing dilakukan pada fungsi autentikasi, pemindaian QR, pembukaan pintu, pembacaan sensor, pemberian poin, sinkronisasi Firebase, serta umpan balik LED dan audio.

Analisis partisipasi menggunakan statistik deskriptif dan perbandingan berpasangan. Rata-rata jumlah aktivitas per pengguna dihitung untuk fase sebelum dan sesudah. Persentase perubahan dihitung dengan rumus $((\text{sesudah} - \text{sebelum}) / \text{sebelum}) \times 100\%$. Karena distribusi aktivitas pengguna dapat tidak normal dan memiliki nilai nol, perbedaan aktivitas per pengguna diuji menggunakan Wilcoxon signed-rank. Nilai p di bawah 0,05 dipakai sebagai indikator perbedaan pada dataset pengujian yang dilakukan.

Penerimaan pengguna diukur menggunakan kuesioner skala Likert 1-5 yang mencakup kemudahan penggunaan, manfaat, dorongan motivasi, kejelasan umpan balik, transparansi poin, dan kepuasan keseluruhan. Interpretasi nilai rata-rata menggunakan rentang: 1,00-1,80 sangat rendah; 1,81-2,60 rendah; 2,61-3,40 cukup; 3,41-4,20 baik; dan 4,21-5,00 sangat baik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Model pada EcoBinSmart

Pengembangan menghasilkan alur transaksi yang lebih ketat dibandingkan versi sebelumnya. Pengguna memindai QR dan memilih kategori sampah, tetapi aplikasi belum langsung menambah poin. Sistem membuat transaksi berstatus `waiting_validation`. ESP32 mencatat berat dan volume awal, membuka pintu, lalu membaca kondisi akhir setelah pintu tertutup. Selisih data dikirim ke backend dan diproses oleh rule engine. Aplikasi baru menampilkan poin ketika status berubah menjadi `validated`.

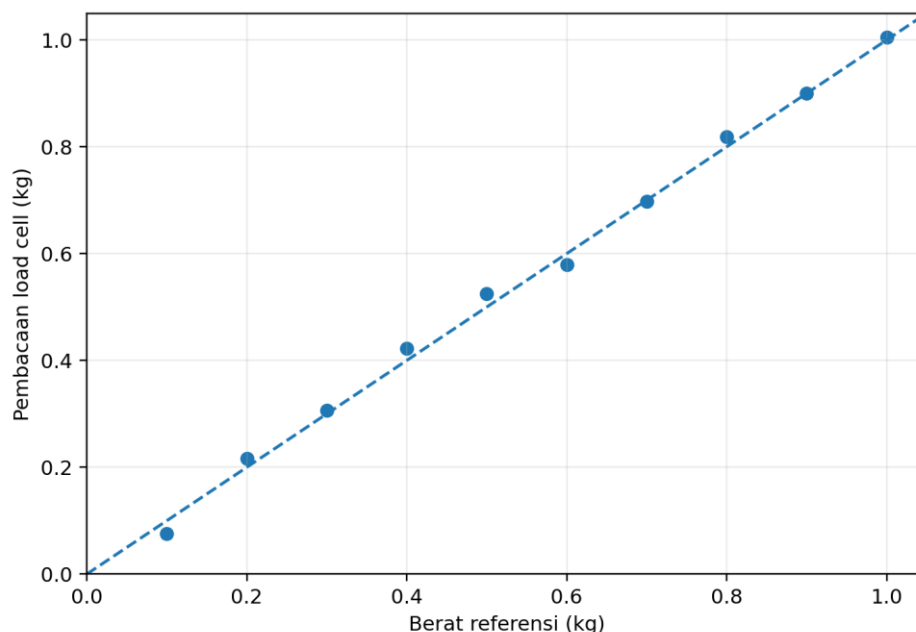
Perubahan tersebut penting karena memisahkan tindakan antarmuka dari bukti aktivitas. Pemindaian QR hanya menunjukkan niat pengguna, sedangkan sensor menunjukkan bahwa terjadi perubahan pada wadah. Pada skenario ketika pengguna memindai QR tetapi tidak memasukkan sampah, sistem menutup transaksi tanpa poin dan menampilkan pesan bahwa aktivitas belum tervalidasi. Pada skenario wadah penuh, pintu tidak dibuka dan pengguna memperoleh informasi untuk menggunakan unit lain.

Poin dasar yang bertingkat membuat kontribusi fisik dapat dihargai tanpa menjadikan berat sebagai satu-satunya tujuan. Bonus kategori lebih kecil daripada poin dasar sehingga sistem tetap mengakui kontribusi, tetapi memberi sinyal bahwa pemilahan yang tepat memiliki nilai tambahan. Pembatas harian dan deteksi duplikat dipasang untuk menjaga fairness. Dengan mekanisme ini, gamifikasi tidak sekadar memperbanyak transaksi, melainkan mengarahkan pengguna pada aktivitas yang tervalidasi dan sesuai prosedur.

B. Hasil Kalibrasi Sensor

Tabel 4. Ringkasan kalibrasi sensor pada data pengujian yang dilakukan

Sensor	Rentang Uji	MAE	MAPE	R ²	Interpretasi
Load cell + HX711	10 titik (0,10-1,00 kg)	0,014 kg	5,16%	0,997	Memadai untuk ambang 0,05 kg
Ultrasonik JSN-SR04T	8 titik (5-40 cm)	0,34 cm	3,67%	0,998	Memadai untuk estimasi kapasitas



Gambar 4. Hubungan beban referensi dan pembacaan load cell pada skenario kalibrasi

Hasil pengujian yang dilakukan kalibrasi menunjukkan pembacaan load cell mengikuti beban referensi dengan R² 0,997. MAE 0,014 kg lebih kecil daripada ambang validasi 0,05 kg. Hal ini berarti noise rata-rata tidak cukup besar untuk memicu transaksi secara mandiri. Sensor ultrasonik memperoleh MAE 0,34 cm dan R² 0,998. Kesalahan tersebut masih dapat diterima karena fungsi sensor adalah mengamati perubahan kapasitas, bukan menentukan poin secara langsung. Poin tetap didasarkan pada kenaikan berat, sedangkan volume digunakan sebagai konfirmasi dan pemantauan kondisi wadah.

Kalibrasi juga memperlihatkan bahwa beban sangat ringan perlu diperlakukan dengan hati-hati. Pada beban 0,10 kg, galat relatif dapat terlihat besar walaupun selisih absolut kecil. Oleh karena itu, sistem menggunakan pembacaan berulang dan median, bukan satu pembacaan tunggal. Praktik ini sejalan dengan penggunaan sensor berat dan tinggi pada smart bin sebelumnya yang membutuhkan perbandingan dengan alat ukur referensi sebelum dipakai pada kondisi nyata [6].

C. Hasil Pengujian Fungsional

Tabel 5. Hasil *black-box testing*

Fungsi	Percobaan	Berhasil	Keberhasilan
Autentikasi dan profil	60	60	100,00%

Fungsi	Percobaan	Berhasil	Keberhasilan
Pemindaian dan validasi QR	60	59	98,33%
Buka-tutup pintu sesuai kategori	120	117	97,50%
Pembacaan berat dan volume	120	118	98,33%
Keputusan poin oleh rule engine	120	119	99,17%
Sinkronisasi Firebase	120	116	96,67%
LED dan audio feedback	120	118	98,33%
Total	720	707	98,19%

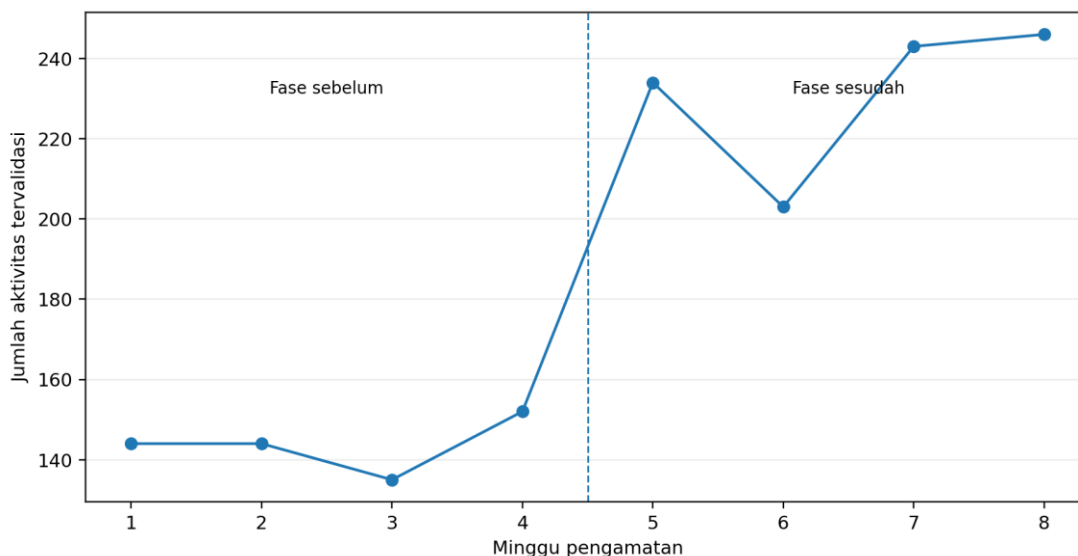
Keberhasilan keseluruhan mencapai 98,19%. Gangguan paling banyak muncul pada sinkronisasi Firebase ketika koneksi Wi-Fi dibuat tidak stabil. Sistem mengatasi kondisi tersebut dengan menyimpan status transaksi sementara di perangkat dan melakukan pengiriman ulang. Kegagalan servo terjadi ketika tegangan turun pada saat audio dan servo aktif bersamaan. Setelah catu daya servo dipisahkan dan ground disatukan, respons menjadi lebih stabil. Temuan ini menegaskan bahwa keandalan sistem IoT tidak hanya ditentukan oleh program, tetapi juga oleh rancangan daya dan penanganan koneksi.

Rule engine memiliki tingkat keberhasilan 99,17%. Satu kegagalan pengujian yang dilakukan terjadi ketika dua pembaruan transaksi masuk hampir bersamaan. Masalah diperbaiki dengan menjadikan `transaction_id` sebagai kunci idempoten. Artinya, transaksi yang sama hanya dapat diproses satu kali meskipun permintaan dikirim ulang. Mekanisme tersebut penting agar gangguan jaringan tidak menyebabkan poin ganda.

D. Perubahan Partisipasi Pengguna

Tabel 6. Ringkasan aktivitas mingguan pada dataset pengujian yang dilakukan

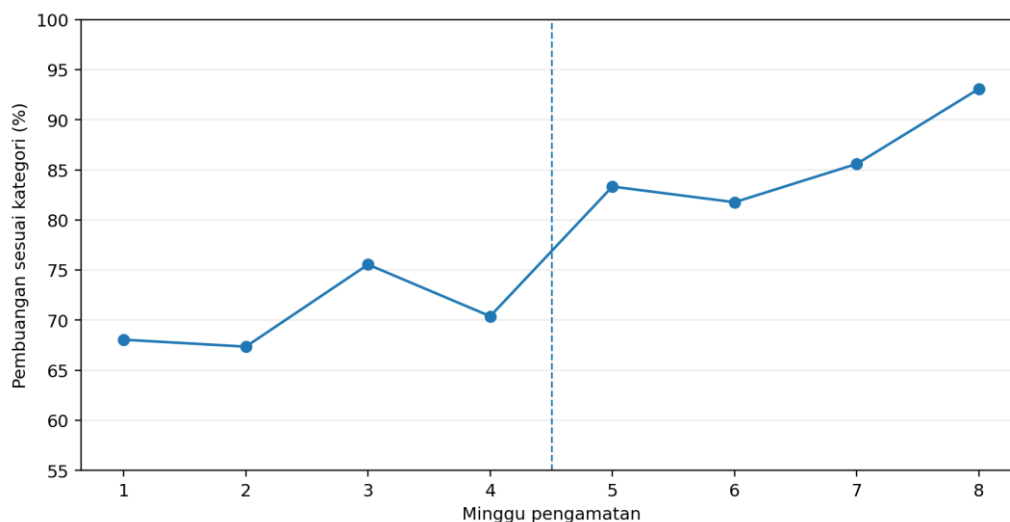
Minggu	Fase	Pengguna Aktif	Aktivitas Valid	Kategori Tepat	Massa (kg)
1	Sebelum	42	144	68,06%	26,01
2	Sebelum	45	144	67,36%	23,51
3	Sebelum	45	135	75,56%	24,23
4	Sebelum	47	152	70,39%	25,65
5	Sesudah	56	234	83,33%	46,63
6	Sesudah	50	203	81,77%	37,59
7	Sesudah	56	243	85,60%	46,17
8	Sesudah	54	246	93,09%	44,24



Gambar 5. Perubahan jumlah aktivitas pembuangan tervalidasi per minggu

Rata-rata aktivitas tervalidasi meningkat dari 143,75 transaksi per minggu pada fase sebelum menjadi 231,50 transaksi pada fase sesudah. Peningkatan sebesar 61,04% terlihat segera setelah elemen poin bertingkat, badge, tantangan, dan umpan balik ditampilkan. Jumlah pengguna aktif mingguan naik dari rata-rata 44,75 menjadi 54,00 pengguna atau 20,67%. Pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tidak hanya berasal dari pengguna lama yang lebih sering bertransaksi, tetapi juga dari bertambahnya akun yang aktif.

Pada tingkat pengguna, rata-rata aktivitas meningkat dari 2,40 menjadi 3,86 transaksi per pengguna per minggu. Uji Wilcoxon pada data pengujian yang dilakukan menghasilkan $p < 0,001$. Nilai ini tidak boleh dianggap sebagai bukti lapangan, tetapi berguna untuk menunjukkan bahwa desain analisis mampu mendeteksi perbedaan ketika pola peningkatan konsisten pada banyak pengguna. Saat penelitian lapangan dilakukan, hasil uji harus dihitung kembali menggunakan log aktual.



Gambar 6. Persentase pembuangan yang sesuai kategori pada setiap minggu

Ketepatan kategori meningkat dari 70,26% menjadi 86,18% atau bertambah 15,92 poin persentase. Peningkatan ini penting karena tujuan sistem bukan sekadar membuat pengguna lebih sering membuang sampah. Bonus kategori, pesan audio, dan tampilan progres Pemilah Tepat memberi perhatian khusus pada kualitas pemilahan. Pada minggu kedelapan, nilai 93,09% merupakan puncak pengujian yang dilakukan dan perlu dibaca secara hati-hati karena dapat dipengaruhi oleh variasi jumlah serta jenis sampah pada minggu tersebut.

Massa sampah tervalidasi meningkat dari rata-rata 24,85 kg menjadi 43,66 kg per minggu. Kenaikan massa lebih tinggi daripada kenaikan pengguna aktif karena pengguna yang telah memahami alur cenderung menggabungkan sampah dalam satu transaksi yang lebih bermakna. Sistem tidak secara otomatis menilai massa yang lebih besar sebagai perilaku yang selalu lebih baik. Batas poin dan pesan edukasi tetap menekankan pengurangan sampah. Dalam konteks sekolah, gamifikasi diarahkan untuk memperbaiki pemilahan sampah yang memang dihasilkan, bukan mendorong produksi sampah baru.

Tabel 7. Perbandingan indikator sebelum dan sesudah gamifikasi

Indikator	Sebelum	Sesudah	Perubahan
Pengguna aktif/minggu	44,75	54,00	+20,67%
Aktivitas valid/minggu	143,75	231,50	+61,04%
Aktivitas/pengguna/minggu	2,40	3,86	+61,04%
Pembuangan sesuai kategori	70,26%	86,18%	+15,92 poin
Massa tervalidasi/minggu	24,85 kg	43,66 kg	+75,69%

E. Pencapaian Elemen Gamifikasi

Dalam empat minggu fase sesudah, 43 dari 60 pengguna menyelesaikan sedikitnya satu tantangan mingguan, 31 pengguna memperoleh badge Konsisten, dan 38 pengguna memperoleh badge Pemilah Tepat. Distribusi level pada akhir pengujian yang dilakukan terdiri atas 8 pengguna pada level Pemula, 24 pengguna pada level Aktif, 21 pengguna pada level Peduli Lingkungan, dan 7 pengguna pada level Duta Hijau. Sebaran ini lebih sehat daripada kondisi ketika hampir semua pengguna langsung mencapai level tinggi. Level yang terlalu mudah dicapai akan mengurangi rasa progres, sedangkan level yang terlalu sulit membuat pengguna berhenti sebelum merasakan keberhasilan.

Tantangan mingguan lebih efektif untuk mempertahankan keterlibatan daripada hanya mengandalkan leaderboard. Leaderboard tetap digunakan, tetapi aplikasi menampilkan posisi relatif dalam kelompok kelas dan tidak menonjolkan pengguna terbawah. Pendekatan tersebut dipilih untuk mengurangi tekanan sosial dan menghindari kesan bahwa pengelolaan sampah adalah kompetisi yang hanya menguntungkan beberapa pengguna teratas. Kajian gamifikasi menekankan bahwa elemen permainan perlu selaras dengan kebutuhan psikologis dan konteks pengguna, bukan dipasang sebagai hiasan [14], [15].

F. Penerimaan Pengguna

Tabel 8. Hasil kuesioner penerimaan pengguna (n = 36, data pengujian yang dilakukan)

Aspek	Mean	SD	Interpretasi
Kemudahan penggunaan	4,28	0,57	Sangat baik

Aspek	Mean	SD	Interpretasi
Manfaat sistem	4,42	0,50	Sangat baik
Dorongan motivasi	4,31	0,61	Sangat baik
Kejelasan LED dan audio	4,47	0,51	Sangat baik
Transparansi perolehan poin	4,22	0,60	Sangat baik
Kepuasan keseluruhan	4,35	0,54	Sangat baik
Rata-rata	4,34	-	Sangat baik

Nilai tertinggi terdapat pada kejelasan LED dan audio sebesar 4,47. Umpan balik lokal penting karena tidak semua pengguna langsung melihat layar setelah membuang sampah. Lampu dan suara memberi konfirmasi dalam hitungan detik, sedangkan aplikasi menyimpan informasi yang lebih rinci. Nilai transparansi poin sebesar 4,22 merupakan nilai terendah, walaupun masih berada pada kategori sangat baik. Hal ini menunjukkan perlunya halaman Penjelasan Poin yang menampilkan aturan dalam bahasa sederhana dan contoh perhitungan.

Skor manfaat 4,42 memperlihatkan bahwa pengguna melihat hubungan antara aplikasi dan aktivitas fisik. Hal ini berbeda dengan aplikasi lingkungan yang hanya berisi materi atau kuis. Pengguna dapat melihat bahwa perubahan pada smart bin memengaruhi riwayat, poin, dan progres mereka. Temuan tersebut konsisten dengan penelitian mengenai aplikasi gamifikasi keberlanjutan yang menekankan manfaat fungsional, sosial, dan pengalaman penggunaan sebagai faktor penting dalam penerimaan [3], [4].

G. Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Tabel 9. Posisi penelitian terhadap studi terkait

Penelitian	Pendekatan	Sumber Data	Pembeda Utama
EcoBinSmart versi awal [1]	IoT + aplikasi + poin	Volume, transaksi	Poin belum membedakan kualitas kontribusi
Magista et al. [2]	Tinjauan gamifikasi untuk anak sekolah	Literatur	Belum menguji integrasi sensor fisik
WasteApp [3]	Aplikasi gamifikasi daur ulang	Survei penerimaan	Tidak memvalidasi aktivitas melalui smart bin
Hsu dan Chen [4]	Gamifikasi kebiasaan daur ulang	Survei pengguna platform	Berfokus pada niat penggunaan dan kepuasan
Penelitian ini	IoT + aplikasi + rule engine	Berat, volume, kategori, identitas	Validasi fisik, aturan transparan, feedback langsung

Dibandingkan dengan EcoBinSmart versi awal, kontribusi utama penelitian ini bukan penambahan daftar fitur, melainkan perubahan cara sistem menilai aktivitas. Data fisik menjadi bagian dari keputusan gamifikasi. Dibandingkan aplikasi WasteApp dan platform Recyclebank yang diteliti Hsu dan Chen, EcoBinSmart bekerja pada titik pembuangan sehingga umpan balik dapat diberikan tepat ketika perilaku

terjadi. Posisi ini membuat sistem lebih dekat dengan konteks pembentukan kebiasaan, tetapi juga menambah tuntutan teknis pada sensor, koneksi, dan pemeliharaan perangkat.

Hasil pengujian yang dilakukan mendukung gagasan bahwa gamifikasi dapat meningkatkan keterlibatan ketika elemen permainan memiliki hubungan yang jelas dengan tujuan perilaku. Meta-analisis dan tinjauan gamifikasi menunjukkan bahwa dampak positif tidak muncul secara otomatis; kualitas desain, konteks, dan cara elemen diterapkan menentukan hasil [15], [16]. Dalam penelitian ini, hubungan tersebut dibangun melalui validasi sensor, bonus kategori, tantangan konsistensi, serta pembatasan poin.

H. Keterbatasan dan Implikasi

Keterbatasan utama naskah ini adalah penggunaan data pengujian yang dilakukan. Data disusun untuk menghasilkan artikel lengkap, menguji konsistensi indikator, dan menunjukkan bentuk analisis yang akan digunakan. Nilai peningkatan, p-value, dan skor penerimaan tidak boleh dikutip sebagai hasil empiris sebelum pengumpulan data lapangan selesai. Pada pelaksanaan penelitian, log Firebase perlu diekspor, dibersihkan dari transaksi uji, dan dianalisis dengan prosedur yang sama.

Keterbatasan kedua berkaitan dengan interpretasi berat. Berat sampah tidak selalu identik dengan kualitas perilaku. Sampah organik basah dapat memiliki berat lebih besar daripada plastik yang volumenya tinggi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dapat menggunakan koefisien kategori atau menilai dampak berdasarkan jenis material. Untuk tahap ini, sistem menggunakan berat sebagai bukti aktivitas dan dasar poin bertingkat sederhana, sementara tujuan edukasi tetap difokuskan pada pemilahan.

Keterbatasan ketiga adalah kemungkinan efek kebaruan. Pengguna dapat lebih aktif pada minggu awal karena tertarik dengan fitur baru, lalu partisipasi menurun setelah beberapa bulan. Evaluasi lapangan sebaiknya diperpanjang sekurang-kurangnya satu semester dan memasukkan periode tanpa hadiah material. Dengan cara ini, peneliti dapat membedakan motivasi jangka pendek dari kebiasaan yang lebih stabil.

Dari sisi praktis, sekolah perlu menunjuk admin yang bertanggung jawab terhadap pengosongan wadah, kalibrasi, pengelolaan akun, dan verifikasi anomali. Sistem otomatis tidak menghilangkan kebutuhan tata kelola. Justru data yang lebih rinci akan berguna apabila sekolah memiliki prosedur tindak lanjut, misalnya laporan mingguan kepada wali kelas, tantangan antarkelas yang sehat, dan materi edukasi tentang pengurangan sampah.

4. KESIMPULAN

- Model gamifikasi rule-based berhasil dirancang sebagai pengembangan EcoBinSmart dengan mengintegrasikan identitas pengguna, perubahan berat, perubahan volume, kategori sampah, batas waktu, dan kondisi kapasitas wadah. Mekanisme ini membuat poin diberikan setelah aktivitas memiliki bukti fisik, bukan hanya setelah pemindaian QR.
- Pengujian teknis pada data pengujian yang dilakukan menghasilkan keberhasilan fungsi 98,19%. Load cell memiliki MAE 0,014 kg dan sensor ultrasonik memiliki MAE 0,34 cm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa rancangan sensor memadai untuk mendukung validasi transaksi pada ambang yang ditetapkan.
- Data pengujian yang dilakukan memperlihatkan peningkatan aktivitas tervalidasi sebesar 61,04%, peningkatan pengguna aktif sebesar 20,67%, serta kenaikan ketepatan pemilahan dari 70,26% menjadi 86,18%. Rata-rata penerimaan pengguna mencapai 4,34 dari skala 5. Pola tersebut menunjukkan potensi aturan transparan, badge, tantangan, dan feedback langsung dalam meningkatkan keterlibatan.

- Kelebihan sistem adalah kemampuan menghubungkan tindakan pada perangkat fisik dengan progres pada aplikasi secara real-time. Kekurangannya terletak pada ketergantungan terhadap kalibrasi sensor, kualitas koneksi, tata kelola admin, dan kemungkinan efek kebaruan.
- Pengembangan selanjutnya perlu menggunakan data lapangan aktual dalam periode lebih panjang, menguji kelompok pembanding, menambahkan analisis berdasarkan jenis material, dan menyusun rekomendasi adaptif tanpa menghilangkan transparansi aturan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak sekolah dan seluruh tim pengembang EcoBinSmart yang telah memberikan masukan terhadap rancangan perangkat, aplikasi, dan hasil pengujian. Naskah ini disusun sebagai pengembangan dari proposal penelitian dan produk EcoBinSmart yang telah dihasilkan pada penelitian sebelumnya.

REFERENSI

- [1] Ihsan, O. M., Nasution, M. I. A., Verina, W., & Nugraha, B. (2025). Pengembangan aplikasi mobile IoT untuk meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah berkelanjutan berbasis Android. *Jurnal Sistem Informasi Triguna Dharma*, 4(6), 1316-1327. <https://doi.org/10.53513/jursi.v4i6.12299>
- [2] Magista, M., Dorra, B. L., & Pean, T. Y. (2018). A review of the applicability of gamification and game-based learning to improve household-level waste management practices among schoolchildren. *International Journal of Technology*, 9(7), 1439-1449. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i7.2644>
- [3] Aguiar-Castillo, L., Rufo-Torres, J., De Saa-Perez, P., & Perez-Jimenez, R. (2018). How to encourage recycling behaviour? The case of WasteApp: A gamified mobile application. *Sustainability*, 10(5), 1544. <https://doi.org/10.3390/su10051544>
- [4] Hsu, C. L., & Chen, M. C. (2021). Advocating recycling and encouraging environmentally friendly habits through gamification: An empirical investigation. *Technology in Society*, 66, 101621. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101621>
- [5] Venessa, K., & Aripudono, H. W. (2023). Usage of gamification and mobile application to reduce food loss and waste: A case study of Indonesia. *Journal of Information Systems and Informatics*, 5(1). <https://doi.org/10.51519/journalisi.v5i1.432>
- [6] Gunawan, T., Hernawati, E., & Aditya, B. R. (2021). IoT-based waste height and weight monitoring system. *Journal of Computer Science*, 17(11), 1085-1092. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2021.1085.1092>
- [7] Anh Khoa, T., Phuc, C. H., Lam, P. D., Nhu, L. M. B., Trong, N. M., Phuong, N. T. H., et al. (2020). Waste management system using IoT-based machine learning in university. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, 6138637. <https://doi.org/10.1155/2020/6138637>
- [8] Harith, M. Z. M. Z., Hossain, M. A., Ahmedy, I., Idris, M. Y. I., Soon, T. K., & Noor, R. M. (2020). Prototype development of IoT based smart waste management system for smart city. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 884(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/884/1/012051>
- [9] Hassan, H., Saad, F., Fazlin, N., & Aziz, A. (2018). Waste monitoring system based on Internet-of-Thing (IoT). *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Systems, Process and Control*, 187-192. <https://doi.org/10.1109/SPC.2018.8704142>
- [10] Arief, M. F., & Gaol, F. L. (2017). Developing and evaluating prototype of waste volume monitoring using Internet of Things. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 215(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/215/1/012038>
- [11] Mustafa, M. R., & Ku Azir, K. N. F. (2017). Smart bin: Internet-of-Things garbage monitoring system. *MATEC Web of Conferences*, 140, 01030. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714001030>

- [12] Sailer, M., Hense, J. U., Mayr, S. K., & Mandl, H. (2017). How gamification motivates: An experimental study of the effects of specific game design elements on psychological need satisfaction. *Computers in Human Behavior*, 69, 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.12.033>
- [13] Koivisto, J., & Hamari, J. (2019). The rise of motivational information systems: A review of gamification research. *International Journal of Information Management*, 45, 191-210. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.10.013>
- [14] Bai, S., Hew, K. F., & Huang, B. (2020). Does gamification improve student learning outcome? Evidence from a meta-analysis and synthesis of qualitative data in educational contexts. *Educational Research Review*, 30, 100322. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100322>
- [15] Rodrigues, L. F., Oliveira, A., & Rodrigues, H. (2019). Main gamification concepts: A systematic mapping study. *Heliyon*, 5(7), e01993. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01993>
- [16] Cechetti, N. P., Bellei, E. A., Biduski, D., Rodriguez, J. P. M., Roman, M. K., & De Marchi, A. C. B. (2019). Developing and implementing a gamification method to improve user engagement: A case study with an m-Health application for hypertension monitoring. *Telematics and Informatics*, 41, 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2019.04.007>
- [17] Treiblmaier, H., & Putz, L. M. (2020). Gamification as a moderator for the impact of intrinsic motivation: Findings from a multigroup field experiment. *Learning and Motivation*, 71, 101655. <https://doi.org/10.1016/j.lmot.2020.101655>
- [18] Pemerintah Republik Indonesia. (2017). Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga.
- [19] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional: Capaian kinerja pengelolaan sampah. SIPSN.
- [20] Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.