



Sistem Lingkungan Pintar Solusi Cerdas Pengelolaan Sampah Menggunakan Adaptasi Machine Learning dan Internet of Things

Widiyono*, Nurul Amalia, Bambang Ismanto

Fakultas Teknologi Informasi, Prodi Teknik Informatika, Institut Widya Pratama, Pekalongan

Jl. Patriot No.25, Dukuh, Kec. Pekalongan Utara, Kota Pekalongan, Jawa Tengah, Indonesia

Email: ^{1,*}widdyono@gmail.com, ²amalia.0121@gmail.com, ³bams.stmikwp@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: widdyono@gmail.com

Submitted: 12/12/2025; Accepted: 21/01/2026; Published: 21/01/2026

Abstrak–Timbulan sampah di Indonesia meningkat dari 28,59 juta ton/tahun pada 2021 menjadi 34,21 juta ton/tahun pada 2024, dengan kenaikan sebesar 19,67%. Namun, pada 2024, baru 46,1% dari total timbulan sampah yang berhasil ditangani. Kondisi ini menunjukkan perlunya solusi yang lebih efisien dalam pengelolaan sampah, khususnya pada Tempat Penampungan Sementara (TPS) yang masih bergantung pada pemantauan manual sehingga sering mengalami penumpukan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan Sistem Lingkungan Pintar berbasis Internet of Things (IoT) dan Machine Learning untuk memantau tingkat kepenuhan sampah secara real-time dan memprediksi pola pembuangan berdasarkan data historis. Metode penelitian menggunakan pendekatan kualitatif melalui observasi lapangan, wawancara dengan Dinas Lingkungan Hidup, serta studi literatur untuk mengidentifikasi kebutuhan sistem. Perancangan dilakukan menggunakan diagram UML, kemudian sistem dibangun menggunakan perangkat IoT berbasis ESP32 dan aplikasi Android berbasis Flutter yang terintegrasi dengan Firebase. Model Machine Learning menggunakan algoritma Random Forest untuk klasifikasi tingkat kepenuhan sampah. Pengujian dilakukan melalui uji unit, integrasi, performa, serta evaluasi pengguna menggunakan metode PIECES. Hasil menunjukkan bahwa aspek Performance, Information, Control, dan Efficiency memiliki skor di atas 80%, menandakan sistem berjalan efektif dalam memberikan informasi sensor, menjaga keamanan data, dan meningkatkan efisiensi kerja. Namun, aspek Economic dan Service masih memerlukan optimalisasi, terutama terkait penghematan biaya operasional dan pemeliharaan sistem. Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan potensi tinggi dalam mendukung pengelolaan sampah yang lebih cerdas, cepat, dan efisien serta layak dikembangkan lebih lanjut.

Kata Kunci: Internet of Things; Machine Learning; Random Forest; Smart City; SDGs

Abstract–Indonesia's waste generation increased from 28.59 million tons per year in 2021 to 34.21 million tons per year in 2024, a 19.67% increase. However, in 2024, only 46.1% of the total waste generation was successfully managed.. This condition highlights the need for a more efficient waste management solution, particularly at Temporary Disposal Sites (TPS), which still rely on manual monitoring and often experience waste overflow. This study aims to develop a Smart Environmental System based on the Internet of Things (IoT) and Machine Learning to monitor waste levels in real time and predict disposal patterns using historical data. The research uses a qualitative approach through field observations, interviews with the Environmental Agency, and literature studies to identify system requirements. System design was carried out using UML diagrams, followed by the development of an IoT device using ESP32 and an Android application built with Flutter, integrated with Firebase. The Machine Learning model employs the Random Forest algorithm to classify waste-level conditions. System testing included unit testing, integration testing, performance testing, and user evaluation using the PIECES method. The results show that the Performance, Information, Control, and Efficiency aspects scored above 80%, indicating that the system effectively provides sensor information, ensures data security, and improves operational efficiency. However, the Economic and Service aspects still require optimization, particularly in reducing operational costs and improving system maintenance routines. Overall, the system demonstrates strong potential in supporting smarter, faster, and more efficient waste management, and is suitable for further development.

Keywords: Internet of Things; Machine Learning; Random Forest; Smart City; SDGs

1. PENDAHULUAN

Timbulan sampah di Indonesia meningkat dari 28,59 juta ton/tahun pada 2021 menjadi 34,21 juta ton/tahun pada 2024, dengan kenaikan sebesar 19,67%. Namun, pada 2024, baru 46,1% dari total timbulan sampah yang berhasil ditangani [1]. Angka tersebut mencerminkan bahwa masih adanya ketidakseimbangan antara jumlah sampah yang dihasilkan dengan kapasitas pengelolaan sampah yang ada, sehingga berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan yang semakin kompleks [2]. Pemerintah memberikan solusi cerdas dalam mengelola sampah yaitu dengan adanya bank sampah. Bank sampah adalah sistem pengelolaan sampah yang melibatkan partisipasi aktif dari masyarakat [3]. Dalam sistem bank sampah, masyarakat mengumpulkan sampah bernilai ekonomi dan menyerahkannya ke pasar sehingga mereka dapat memperoleh keuntungan melalui kegiatan menabung sampah. Namun pada kasus ini, tempat sampah yang sudah dikategorikan belum dioptimalkan oleh masyarakat [4].

Meskipun pengelolaan sampah telah melibatkan partisipasi aktif masyarakat, tantangan utama terletak pada pengelolaan yang belum efisien. Salah satu masalah yang sering dihadapi adalah kurangnya kesadaran dan pemahaman masyarakat mengenai cara untuk memilah sampah dengan tepat sehingga menyebabkan sebagian besar sampah menumpuk dan tidak terkelola dengan baik [5]. Selain itu, kurangnya infrastruktur yang memadai seperti sistem pengangkutan yang terjadwal dengan baik dapat memperburuk keadaan, keterlambatan pengangkutan dapat menyebabkan sampah meluber ke area sekitarnya yang berpotensi menimbulkan masalah baru

[6]. Upaya peningkatan efisiensi pengelolaan sampah dapat lebih optimal dengan penerapan teknologi Machine Learning dan Internet of Things [7].

Machine Learning memiliki peran untuk mengenali, mengidentifikasi, ataupun memprediksi data tertentu dengan data historis atau data yang telah dipelajari sebelumnya [8], [9]. Teknologi ini dapat diterapkan dalam berbagai aspek kehidupan sehari-hari, seperti pendeteksi wajah, asisten digital, hingga mobil pintar [10]. Dalam konteks pengelolaan sampah ini, machine learning digunakan untuk memprediksi pola kepenuhan bak sampah dalam periode tertentu berdasarkan history sebelumnya. Salah satu algoritma yang dapat dimanfaatkan adalah Random Forest Classifier, karena dikenal dengan kemudahan dan keefektivasannya [11].

Namun, agar lebih efektif, Machine learning membutuhkan peran IoT atau Internet of Things untuk dijadikan alat pemantau kondisi tempat sampah secara real-time dan meningkatkan pengelolaan logistik sampah yang dapat memberitahu pihak terkait ketika sampah sudah penuh dan perlu dikosongkan [12]. Selain itu, penggunaan Global Positioning System atau GPS juga diperlukan untuk melacak lokasi tempat sampah [13].

Adanya penerapan machine learning dan IoT, dapat diartikan sebagai aktivitas antara manusia dengan benda seperti sensor, robot, dan cloud yang terhubung melalui protokol komunikasi standar untuk saling menerima atau mengirimkan informasi sehingga dapat menciptakan proses kerja menjadi lebih efisien [14]. Untuk mengelola sampah dengan Sistem Cerdas Pengelolaan Sampah, memerlukan beberapa teknologi pendukung seperti sensor dan peran IoT yang ditempatkan di lokasi-lokasi strategis seperti bak sampah. Sensor akan mendeteksi dan mengirimkan informasi mengenai kuantitas sampah tersebut [15].

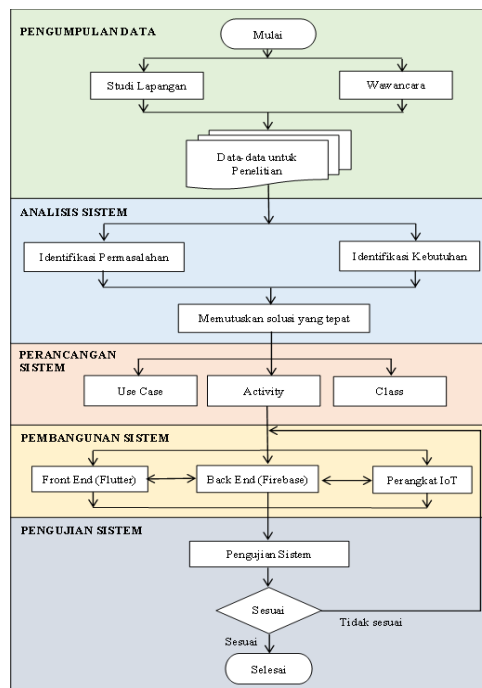
Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan Internet of Things (IoT) pada pengelolaan sampah mampu memantau tingkat kepenuhan tempat sampah secara real-time, sementara Machine Learning digunakan untuk analisis data lingkungan [7], [16]. Namun, sebagian besar penelitian masih bersifat reaktif dan belum mengintegrasikan kemampuan prediksi berbasis data historis serta pelacakan lokasi menggunakan Global Positioning System (GPS), khususnya dalam konteks bank sampah di Indonesia. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian terkait pengembangan sistem pengelolaan sampah cerdas yang terintegrasi dan prediktif.

Penelitian ini berkontribusi dengan mengembangkan sistem monitoring pengelolaan sampah berbasis IoT dan Machine Learning yang terintegrasi dengan GPS untuk memantau kondisi tempat sampah secara real-time sekaligus memprediksi pola kepenuhan menggunakan algoritma Random Forest Classifier. Sistem ini dilengkapi notifikasi peringatan dini untuk meningkatkan efisiensi pengangkutan dan pengelolaan sampah secara berkelanjutan.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem monitoring berbasis IoT dan Machine Learning yang mampu memberikan notifikasi peringatan secara real-time dan efisien. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kualitatif melalui studi literatur yang diharapkan dapat menghasilkan temuan yang relevan dalam menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih efisien.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan terlihat pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 1. Metode Penelitian

Gambar 1 menunjukkan metode atau langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini. Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam membangun Sistem Lingkungan Pintar: Solusi Cerdas Pengelolaan Sampah Menggunakan Adaptasi Machine Learning dan Internet of Things. Metode yang digunakan meliputi studi lapangan dan wawancara. Studi lapangan dilaksanakan melalui observasi langsung terhadap aktivitas dan proses bisnis pengelolaan sampah di beberapa lokasi, seperti Tempat Pembuangan Sementara (TPS), Kantor Dinas Lingkungan Hidup, serta lingkungan pemukiman warga yang menjadi sasaran implementasi sistem. Observasi ini bertujuan memperoleh gambaran nyata terkait alur pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, hingga pembuangan sampah. Metode wawancara dilakukan kepada pengelola sampah dari Dinas Lingkungan Hidup, untuk memperoleh informasi lebih detail mengenai proses operasional pengelolaan sampah untuk menggali informasi tentang proses pengelolaan sampah.

Setelah data-data terkumpul, maka akan dilakukan analisis terhadap data tersebut, sehingga dapat diketahui permasalahan yang dihadapi pada pengelola sampah, yang selanjutnya akan disusun kebutuhan fungsional dan kebutuhan non fungsional pada aplikasi yang akan dibuat. Selanjutnya menentukan solusi yang sesuai untuk memecahkan permasalahan yang sedang dihadapi serta memenuhi kebutuhan fungsional dan non fungsional yang sudah diidentifikasi tersebut.

Analisis permasalahan dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu identify, understand, analyze, dan report. Pada tahap identify, ditemukan bahwa penumpukan sampah di TPS terjadi akibat tidak adanya pemantauan kondisi secara real-time, sehingga dibutuhkan sistem yang mampu memantau volume sampah, memberikan peringatan dini, dan memprediksi pola pembuangan. Tahap understand menunjukkan bahwa sistem berjalan masih bersifat manual, rute pengangkutan ditentukan secara tetap tanpa mempertimbangkan kondisi lapangan, serta belum tersedia pencatatan data terintegrasi yang mendukung pengambilan keputusan. Selanjutnya, pada tahap analyze dilakukan kajian menyeluruh terhadap sistem eksisting yang mengungkap keterlambatan pengangkutan dan ketiadaan data historis sebagai dasar perancangan sistem baru berbasis IoT dan Machine Learning. Seluruh hasil analisis kemudian dirangkum pada tahap report dalam bentuk laporan yang memuat permasalahan, kebutuhan sistem, rancangan awal, serta rekomendasi tahapan implementasi sebagai acuan pengembangan Sistem Lingkungan Pintar Monitoring Pengangkutan Sampah.

Solusi yang dihasilkan di tahapan analisis akan diwujudkan melalui desain fungsi untuk masing-masing pengguna, alur sistem, desain database menggunakan diagram UML [17] yang dilakukan oleh anggota peneliti dan pembantu peneliti. Pada UML, ada beberapa diagram yang akan digunakan, diantaranya diagram use case untuk menggambarkan interaksi antara pengguna dan sistem yang mendeskripsikan fungsi-fungsi yang ada pada sistem. Selanjutnya untuk menggambarkan alur sistem menggunakan diagram activity, sedangkan untuk menggambarkan relasi antar objek atau entitas menggunakan diagram class. Setelah ketiga desain tersebut selesai dibuat, maka akan dilakukan pengujian apakah desain tersebut sesuai dengan solusi yang sudah ditetapkan pada tahapan analisis, jika ternyata belum sesuai maka akan dilakukan perbaikan terhadap desain tersebut, namun jika sudah sesuai maka akan dilakukan dokumentasi terhadap desain fungsi sistem menggunakan diagram use case.

Tahap pembangunan perangkat IoT dan aplikasi android sesuai dengan desain yang sudah dilakukan. Pengembangan aplikasi menggunakan framework flutter yang menghasilkan aplikasi dengan performa yang bagus dan lebih cepat dibandingkan aplikasi berbasis web [18]. Untuk mendukung aplikasi android, penyimpanan database dan data yang dibutuhkan menggunakan layanan berbasis online. Layanan untuk penyimpanan database, penggunaan peta google maps dan notifikasi menggunakan google firebase. Sementara itu untuk menyimpan asset seperti gambar, suara, video dan lain-lain menggunakan layanan hosting.

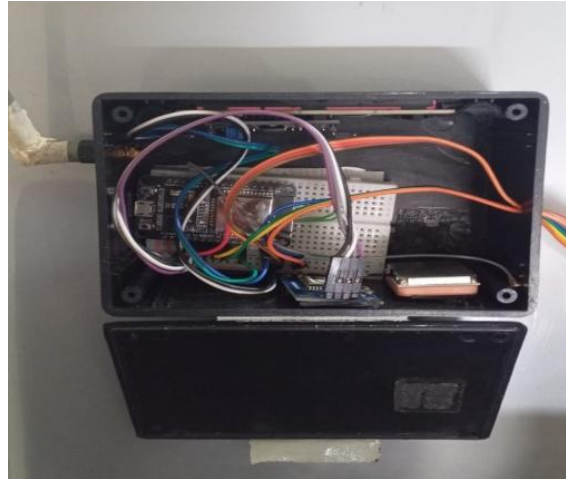
Setelah tahapan pembangunan aplikasi selesai, kemudian dilakukan tahapan pengujian sistem untuk mengetahui kesalahan apa saja yang timbul saat aplikasi sedang berjalan. Pengujian perangkat IoT dilakukan dengan menjalankan perangkat pada kondisi aslinya untuk memastikan perangkat dapat berjalan dengan baik. Pengujian aplikasi android dilakukan oleh peneliti dibantu dengan pembantu peneliti menggunakan Pengujian unit untuk Memverifikasi perilaku metode atau class, Pengujian integrasi untuk Menjalankan aplikasi lengkap, Pengujian performa untuk Mengukur kinerja aplikasi

Setelah aplikasi dipastikan berjalan dengan baik, dilakukan evaluasi aplikasi terhadap pengguna untuk mengetahui apakah sistem yang dibangun sudah sesuai dengan kebutuhan pengguna. Metode evaluasi yang digunakan pada tahapan ini adalah metode usability testing [19] dengan mengacu pada metode PIECES (Performance, Information, Economic, Control, Efficiency, Service) [20]. Evaluasi dilakukan oleh anggota peneliti dan anggota mahasiswa kepada pengelola sampah melalui wawancara. Setelah aplikasi android sudah sesuai, maka akan diupload ke layanan google play agar dapat diunduh pengguna secara luas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perangkat IoT

Perangkat IoT dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor DHT-22, HC-SR04, dan sensor GPS Neo-6M, dengan program yang direalisasikan menggunakan Arduino IDE dan Google Firebase. Perangkat IoT diletakkan di TPS memindai lingkungan TPS berupa Jarak, kelembaban udara, suhu dan titik koordinat Maps, yang terhubung mikrokontroler ESP-32 yang berada di TPS yang digambarkan pada Gambar 2.

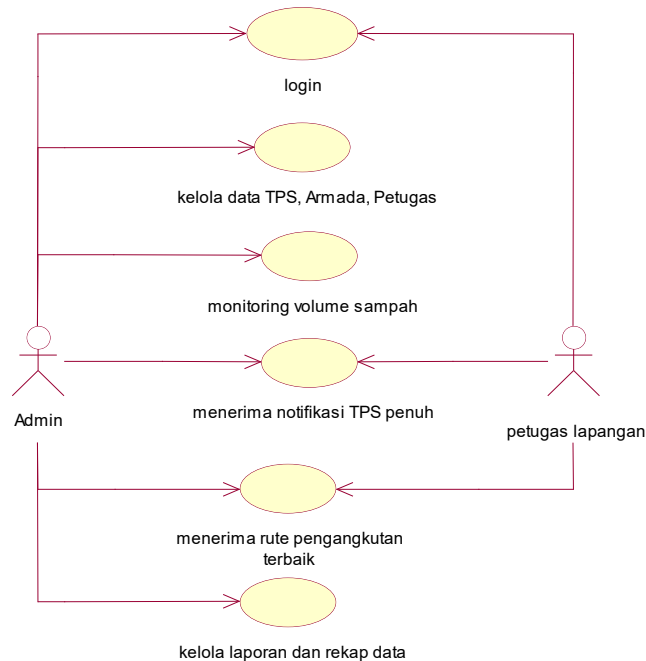


Gambar 2. Rangkaian Perangkat IoT

Data perolehan pemindaian sensor dikirim ke Database Firebase, perlakuan data selanjutnya dimasukan ke Machine Learning untuk menentukan apakah informasi yang ditampilkan ke aplikasi Android merupakan informasi secara real-time seperti kondisi sampah Kosong, Normal, dan Penuh. Data tersebut kemudian dikirim ke Database Firebase dan dapat diakses melalui aplikasi Android, memungkinkan petugas untuk memantau dan mengelola kondisi sampah secara lebih efektif.

3.2 Perancangan Fungsi Sistem

Diagram use case digunakan untuk menggambarkan interaksi antara aktor dan sistem dalam Sistem Cerdas Pengelolaan Sampah berbasis IoT dan Machine Learning.



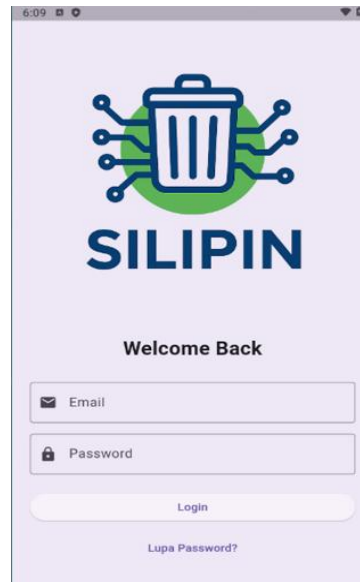
Gambar 3. Diagram Use Case

Gambar 3 menunjukkan proses login untuk verifikasi akses pengguna, kemudian berlanjut ke aktivitas lain seperti mengelola data, memantau volume sampah yang berasal dari sensor, serta menerima notifikasi ketika bak sampah mencapai kondisi tertentu. Pengguna dapat melakukan pengelolaan laporan dan rekap data yang menjadi hasil analisis keseluruhan untuk dijadikan acuan pembuatan keputusan.

3.3 Aplikasi Android

3.3.1 Tampilan Login

Pada ini dijelaskan tampilan login yang berfungsi sebagai gerbang autentikasi pengguna sebelum mengakses fitur utama sistem. Halaman login dirancang untuk memastikan hanya pengguna yang memiliki hak akses yang dapat masuk, sekaligus memberikan pengalaman penggunaan yang sederhana dan mudah dipahami.

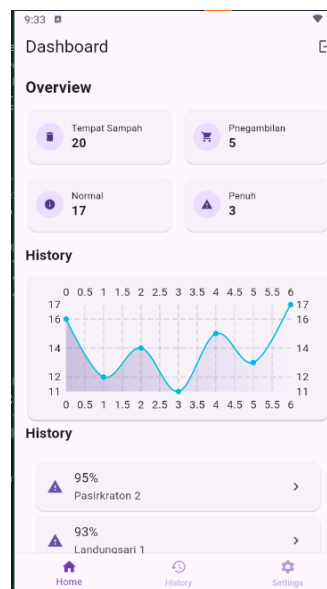


Gambar 4. tampilan Login Aplikasi

Gambar 4 merupakan tampilan halaman login dari aplikasi yang telah dibuat. Pengguna dari Dinas Lingkungan Hidup bisa login menggunakan akun yang telah didaftarkan.

3.3.2 Tampilan Dashboard

Tampilan dashboard merupakan halaman utama yang muncul setelah pengguna berhasil login, berfungsi untuk menampilkan ringkasan informasi penting secara cepat dalam satu layar. Dashboard dirancang agar pengguna dapat memantau kondisi data terkini, melihat indikator utama, dan mengakses menu-menu inti sistem dengan lebih efisien



Gambar 5. tampilan Dashboard

Gambar 5 merupakan tampilan halaman dashboard dari aplikasi yang telah dibuat. Pengguna dapat melihat statistik jumlah tempat sampah, jumlah tempat sampah yang sudah diambil dan tempat sampah yang penuh dan perlu diambil sampahnya. Pengguna juga dapat melihat data riwayat pengambilan sampah yang sudah dilakukan. Selain itu pengguna dapat memantau kondisi tingkat kepenuhan sampah, sehingga jika ada tempat sampah yang penuh dapat segera ditindaklanjuti.

3.4 Evaluasi

Setelah aplikasi dipastikan berjalan dengan baik, dilakukan evaluasi aplikasi terhadap pengguna untuk mengetahui apakah sistem yang dibangun sudah sesuai dengan kebutuhan pengguna. Metode evaluasi yang digunakan pada tahapan ini adalah metode usability testing (11) dengan mengacu pada metode PIECES (Performance, Information, Economic, Control, Efficiency, Service) (12). Berikut merupakan hasil dari kuesioner adalah sebagai berikut.



Tabel 1. Hasil Kuesioner sesuai metode PIECES

No	Kriteria	Pertanyaan	Ya	Tidak
1.	Performance	Sistem Lingkungan Pintar merespons perintah dengan cepat saat memproses data dari sensor IoT.	92%	8%
2.	Performance	Notifikasi dari sistem muncul tepat waktu sesuai kondisi tempat sampah.	83%	17%
3.	Performance	Akurasi prediksi Machine Learning dalam menentukan level kepenuhan sampah sudah memadai.	67%	33%
4.	Information	Informasi tingkat kepenuhan sampah yang ditampilkan sistem akurat.	83%	17%
5.	Information	Data sensor (suhu, kelembapan, volume sampah, dsb) mudah dipahami oleh pengguna.	92%	8%
6.	Information	Sistem memberikan informasi prediktif (forecasting) yang membantu pengambilan keputusan pengelolaan sampah.	83%	17%
7.	Economic	Sistem membantu mengurangi biaya operasional pengangkutan sampah.	25%	75%
8.	Economic	Dengan sistem ini, frekuensi pemantauan langsung (manual) dapat dikurangi.	92%	8%
9.	Economic	Sistem membantu menghemat sumber daya seperti bahan bakar, waktu, dan tenaga operator	75%	25%
10.	Control	Sistem memiliki mekanisme perlindungan data yang baik.	83%	17%
11.	Control	Sistem dilengkapi login dan otorisasi yang aman.	92%	8%
12.	Control	Sistem dapat mendeteksi atau mencegah input data yang salah atau sensor error.	92%	8%
13.	Efficiency	Aplikasi mudah digunakan oleh petugas lapangan tanpa pelatihan khusus.	83%	17%
14.	Efficiency	Tampilan antarmuka sistem (dashboard, grafik, notifikasi) mudah dipahami.	92%	8%
15.	Efficiency	Aplikasi membantu mempercepat proses kerja dalam pengelolaan sampah harian.	83%	17%
16.	Service	Dukungan teknis untuk sistem (IoT, ML, aplikasi) mudah diakses dan responsif.	75%	25%
17.	Service	Panduan penggunaan aplikasi tersedia dan mudah dipahami.	75%	25%
18.	Service	Pemeliharaan sistem (sensor IoT, server, pembaruan model ML) dilakukan secara rutin.	67%	33%

Berdasarkan Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan Sistem Lingkungan Pintar – Solusi Cerdas Pengelolaan Sampah memiliki kualitas yang baik hingga sangat baik pada aspek Performance, Information, Control, dan Efficiency, dengan sebagian besar skor berada di atas 80%.

Pada aspek Performance, rata-rata skor sebesar 80,7%, sehingga dapat disimpulkan bahwa kinerja sistem sudah tergolong baik, terutama dalam hal kecepatan respons dan penyampaian notifikasi secara real-time. Namun demikian, akurasi prediksi Machine Learning masih menjadi kelemahan utama. Hal ini menunjukkan perlunya peningkatan model ML melalui optimasi dataset atau penyempurnaan algoritma untuk meningkatkan ketepatan estimasi tingkat kepenuhan sampah.

Pada aspek Information, rata-rata skor sebesar 86%, yang menunjukkan bahwa kualitas informasi yang diberikan sistem tergolong sangat baik. Data sensor disajikan secara jelas dan mudah dipahami, serta sistem telah mampu memberikan insight prediktif. Kondisi ini menggambarkan bahwa integrasi IoT dan dashboard informatif sudah berjalan efektif.

Pada aspek Economic, rata-rata skor sebesar 64%, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengguna belum merasakan dampak signifikan terhadap pengurangan biaya operasional, khususnya biaya pengangkutan. Meski demikian, sistem terbukti mampu mengurangi frekuensi pemeriksaan manual dan menghemat sumber daya. Manfaat ekonomi kemungkinan belum sepenuhnya terlihat karena sistem masih relatif baru atau belum diimplementasikan secara penuh di lapangan.

Pada aspek Control, rata-rata skor mencapai 89%, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki mekanisme kontrol dan keamanan yang sangat baik. Keamanan data, autentikasi, serta validasi input telah diterapkan dengan baik, menggambarkan bahwa desain sistem kontrol disusun secara matang.

Pada aspek Efficiency, rata-rata skor sebesar 86%, sehingga dapat disimpulkan bahwa tingkat efisiensi sistem cukup tinggi. Antarmuka pengguna dinilai jelas dan mudah dioperasikan bahkan tanpa pelatihan khusus. Kondisi ini membantu meningkatkan produktivitas petugas lapangan dan mengurangi beban kerja operasional.

Terakhir, pada aspek Service, rata-rata skor sebesar 72,3%, sehingga kualitas layanan dinilai baik meskipun belum optimal. Maintenance terhadap model ML, sensor, dan server masih perlu ditingkatkan secara rutin, dan



dokumentasi teknis masih dapat diperkaya. Dukungan teknis cukup responsif, namun peningkatan tetap diperlukan untuk mendukung keberlangsungan sistem dalam jangka panjang.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi menggunakan indikator PIECES, Sistem Lingkungan Pintar sebagai solusi cerdas pengelolaan sampah menunjukkan kinerja yang baik hingga sangat baik, ditandai dengan tingginya skor pada aspek Performance, Information, Control, dan Efficiency (di atas 80%) yang mengindikasikan sistem mampu beroperasi secara efektif dalam penyediaan informasi, respons instruksi, keamanan, dan efisiensi operasional melalui integrasi IoT dan Machine Learning. Namun demikian, aspek Economic dan Service masih memerlukan peningkatan, khususnya terkait optimalisasi manfaat penghematan biaya yang belum dirasakan secara maksimal serta penguatan pemeliharaan sistem, model Machine Learning, dan dokumentasi teknis untuk mendukung keberlanjutan. Secara keseluruhan, sistem telah layak digunakan, namun masih membutuhkan penyempurnaan pada beberapa komponen agar dapat beroperasi secara lebih stabil dan berkelanjutan di masa mendatang.

REFERENCES

- [1] A. N. Syahidah, G. L. Sari, and K. Ratnawati, "Analysis of the Potential for Organic and Inorganic Waste Reduction at PT Asmin Bara Bronang," *Media Ilm. Tek. Lingkung.*, vol. 10, no. 2, pp. 93–100, 2025, doi: 10.33084/mitl.v10i2.10183.
- [2] A. H. Z. Fasya, M. Ibad, K. U. N. El Muna, and S. F. Pratiwi, "A Systematic Review of Solid Waste Management in Indonesia: Generation, Characteristics, Treatment, and Regulation," *J. Kesehat. Lingkung.*, vol. 17, no. 4, pp. 333–342, 2025, doi: 10.20473/jkl.v17i4.2025.333-342.
- [3] N. W. Aisha, "Pengaruh Bank Sampah Terhadap Jumlah Sampah Plastik di Indonesia," *J. Altern. - J. Ilmu Hub. Int.*, vol. 14, no. 1, pp. 68–73, 2023, doi: 10.31479/jualter.v14i1.57.
- [4] K. L. H. dan Kehutanan, "Pedoman Pelaksanaan Bank Sampah," 2020.
- [5] M. D. Putri, M. F. Fazriansyah, E. L. Sirri, M. A. Saputra, and A. N. Hermawanti, "Greenovation: Literasi Transformasi Sampah Menuju Karakter Unggul dalam Perspektif Ekonomi, Pendidikan dan Teknologi," *AJAD J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 4, no. 2, pp. 415–421, 2024, doi: 10.59431/ajad.v4i2.355.
- [6] T. P. Kakabong, H. Riogilang, and H. Riogilang, "Evaluasi Sistem Pengangkutan Sampah di Kecamatan Wanca Kota Manado," *TEKNO J. Tek.*, 2025, doi: 10.35793/jts.v23i92.62529.
- [7] P. Hendradi and A. Wahyono, "Pemodelan Sistem Informasi Berbasis IoT untuk Optimasi Pengelolaan Sampah Perkotaan (Studi Kasus: Pemantauan Level Tempat Sampah Pintar)," *J. Techlink*, vol. 9, no. 1, pp. 16–30, 2025, doi: 10.59134/jtnk.v9i1.690.
- [8] R. G. Wardhana, G. Wang, and F. Sibuea, "Penerapan Machine Learning dalam Prediksi Tingkat Kasus Penyakit di Indonesia," *J. Inf. Syst. Manag.*, vol. 5, no. 1, 2023, doi: 10.24076/joism.2023v5i1.1136.
- [9] R. S. Nurhalizah, R. Ardianto, and P. Purwono, "Analisis Supervised dan Unsupervised Learning pada Machine Learning: Systematic Literature Review," *J. Ilmu Komput. dan Inform.*, vol. 4, no. 1, pp. 61–72, 2024, doi: 10.54082/jiki.168.
- [10] M. Wang and W. Deng, "Deep Face Recognition: A Survey," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 43, no. 10, pp. 3366–3388, 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2020.2992394.
- [11] A. M. Akbar, M. Basri, and Wahyuddin, "Implementasi Machine Learning Menggunakan Algoritma Klasifikasi untuk Mendeteksi Jenis Sampah," *J. Publ. Manaj. Inform.*, vol. 3, no. 3, pp. 152–161, 2024, doi: 10.55606/jupumi.v3i3.3751.
- [12] T. J. Sheng et al., "An Internet of Things Based Smart Waste Management System Using LoRa and Tensorflow Deep Learning Model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 148793–148811, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016255.
- [13] K. N. Nurwijayanti and R. E. Adhytyas, "Garbage Bin Monitoring System Based on the Internet of Things at University Dirgantara Marsekal Suryadarma," *Int. J. Educ. Manag. Eng.*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.5815/ijeme.2021.02.01.
- [14] Y. Kumar, "Application of Machine Learning in Internet of Things (IoT)," *IJRASET*, 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.43026.
- [15] R. Khan et al., "Retraction: Machine Learning and IoT-Based Waste Management Model," *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/5942574.
- [16] H. Gusdevi, A. Hadhiwibowo, N. Agustina, and A. Fatah, "Timbangan Berbasis IoT untuk Pemantauan dan Pengelolaan Sampah Organik," *Naratif J. Nas. Ris. Apl. dan Tek. Inform.*, 2023, doi: 10.53580/naratif.v5i2.270.
- [17] V. Aulia, M. Adriyani, M. Wahyuda, G. Langi, and S. Ria, "Implementasi Diagram UML (Unified Modelling Language) Pada Perancangan Sistem Informasi Laporan Persediaan Barang," *J. Ilmu Komput. dan Bisnis*, vol. 12, no. 2, pp. 91–98, 2021, doi: 10.47927/jikb.v12i2.145.
- [18] Muslim, R. Puspita Sari, and S. Rahmayuda, "Implementasi Framework Flutter pada Sistem Informasi Perpustakaan Masjid," *J. Komput. dan Apl.*, vol. 10, no. 1, pp. 46–59, 2022.
- [19] S. D. Purnamasari and F. Syakti, "Implementasi Usability Testing dalam Evaluasi Website Sekolah," *J. Sisfokom*, vol. 9, no. 3, pp. 420–426, 2020.
- [20] R. Prayogi, K. Ramanda, C. Budihartanti, and A. Rusman, "Penerapan Metode PIECES Framework dalam Analisis dan Evaluasi Aplikasi M-BCA," *J. Infortech*, vol. 3, no. 1, pp. 7–12, 2021.