

Implementasi sistem terintegrasi deep learning dan firebase untuk klasifikasi sampah dan kontrol otomatis

Yudha Pramana Putra^{1*}

¹ Sains & Teknologi, Universitas Islam Negeri Malang; ² Teknik Informatika,
e-mail: yudhapramanaputra58@gmail.com

Kata Kunci:

Internet of Things (IoT),
Kecerdasan Buatan,
Pemilahan Sampah
Otomatis, Deep Learning,
Smart City

Keywords:

Internet of Things (IoT),
Artificial Intelligence,
Automated Waste Sorting,
Deep Learning, Smart City

ABSTRAK

Sistem SMARTBIN dikembangkan sebagai solusi berbasis Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan untuk mengatasi masalah pengelolaan sampah di Indonesia, khususnya dalam pemilahan otomatis sampah organik dan anorganik. Sistem ini memanfaatkan kamera smartphone untuk mengambil gambar sampah, yang kemudian diproses menggunakan model deep learning berbasis TensorFlow di server backend. Hasil klasifikasi disimpan di Firebase Firestore dan digunakan untuk mengontrol aktuator ESP32 yang membuka tutup tempat sampah secara otomatis (kanan untuk organik, kiri untuk anorganik). Antarmuka web menyediakan visualisasi data real-time, termasuk jumlah sampah yang terklasifikasi. Pengujian menunjukkan

akurasi klasifikasi tinggi dan waktu respon rata-rata di bawah 5 detik. Sistem ini menawarkan potensi besar untuk mendukung smart city dan keberlanjutan lingkungan, dengan saran untuk meningkatkan dataset dan konektivitas serta mengintegrasikan daur ulang plastik.

ABSTRACT

The SMARTBIN system was developed as a solution based on the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence to overcome waste management problems in Indonesia, especially in automatic sorting of organic and inorganic waste. This system uses a smartphone camera to take images of trash, which are then processed using a TensorFlow-based deep learning model on the backend server. The classification results are saved in Firebase Firestore and used to control the ESP32 actuator that opens the bin lid automatically (right for organic, left for inorganic). The web interface provides real-time data visualization, including the amount of classified waste. Testing shows high classification accuracy and an average response time of under 5 seconds. This system offers great potential to support smart cities and environmental sustainability, with suggestions for improving datasets and connectivity as well as integrating plastic recycling.

Pendahuluan

Masalah pengelolaan sampah terus menjadi persoalan krusial yang dihadapi oleh banyak negara, termasuk Indonesia. Volume timbulan sampah yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan urbanisasi menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan, kesehatan masyarakat, serta tata kelola kota. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), pada tahun-tahun terakhir terjadi peningkatan signifikan terhadap volume sampah yang masuk ke Tempat Pemrosesan



This is an open access article under the [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Akhir (TPA), sementara tingkat daur ulang masih rendah dan belum optimal [1]. Salah satu penyebab utamanya adalah minimnya kesadaran masyarakat dan keterbatasan teknologi dalam proses pemilahan sampah sejak dari sumbernya [2].

Di sisi lain, plastik sebagai salah satu komponen sampah anorganik, terus menjadi momok lingkungan karena sifatnya yang tidak mudah terurai. Upaya daur ulang plastik menjadi material konstruksi seperti batu bata merupakan solusi potensial yang semakin dikembangkan, namun sangat bergantung pada efektivitas pemilahan plastik di tahap awal [3]. Oleh karena itu, teknologi klasifikasi dan pemilahan sampah otomatis menjadi penting untuk menjawab tantangan tersebut. Penelitian telah menunjukkan bahwa sistem berbasis Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan (AI) dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah secara signifikan [4].

Berdasarkan latar belakang tersebut, sistem SMARTBIN dikembangkan sebagai solusi inovatif berbasis IoT dan AI yang mampu mengotomatisasi proses klasifikasi sampah secara real-time. Sistem ini memanfaatkan kamera smartphone untuk mengambil gambar sampah, yang kemudian dikirimkan ke backend server dan diproses menggunakan model deep learning berbasis TensorFlow. Model ini telah dilatih pada dataset gambar sampah yang telah dianotasi untuk membedakan antara sampah organik dan anorganik dengan akurasi yang tinggi [5]. Pendekatan deep learning dalam klasifikasi sampah juga telah terbukti efektif dalam berbagai studi untuk mendukung pengelolaan limbah yang lebih cerdas [6].

Setelah proses klasifikasi, data dikirim dan disimpan pada Firebase Firestore, sebuah platform basis data real-time berbasis cloud. Firebase berperan sebagai jembatan antara server, antarmuka pengguna, dan perangkat keras. Data klasifikasi kemudian diteruskan ke mikrokontroler ESP32, yang membaca sinyal tersebut dan secara otomatis mengaktifkan motor servo untuk membuka tutup tempat sampah sesuai kategori yang terdeteksi. Komunikasi nirkabel antara ESP32 dan Firebase dilakukan melalui jaringan WiFi, sehingga memungkinkan sistem bekerja secara fleksibel dan adaptif di berbagai lokasi [7]. Pendekatan berbasis cloud computing ini juga memungkinkan integrasi data yang efisien untuk manajemen limbah skala besar [8].

Kelebihan utama dari SMARTBIN terletak pada kemampuannya untuk menampilkan data klasifikasi secara real-time melalui antarmuka web. Pengguna dapat memantau jumlah dan jenis sampah yang terklasifikasi, bahkan dalam bentuk visualisasi statistik seperti grafik atau teks dinamis. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kenyamanan pengguna, tetapi juga membuka peluang pengambilan keputusan berbasis data untuk manajemen limbah [9]. Dalam konteks lebih luas, sistem seperti SMARTBIN dapat berkontribusi terhadap optimalisasi daur ulang limbah plastik. Studi oleh Ilyas et al. menunjukkan bahwa pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dalam manajemen sampah plastik mampu memberikan gambaran komprehensif terhadap dampak lingkungan dari setiap tahapan prosesnya [3].

Namun, implementasi sistem semacam ini akan berjalan optimal apabila masyarakat turut dilibatkan. Penelitian Satya et al. mengungkapkan bahwa partisipasi masyarakat dalam program Bank Sampah cukup efektif, namun masih terkendala oleh ketergantungan pada pemilahan manual [10]. SMARTBIN hadir sebagai jawaban atas

tantangan tersebut, dengan menawarkan sistem pemilahan otomatis yang dapat terhubung dengan skema daur ulang yang lebih luas. Dengan pendekatan integratif antara IoT, cloud computing, dan AI, sistem SMARTBIN diharapkan mampu memberikan solusi konkret terhadap masalah pengelolaan sampah di Indonesia. Lebih dari sekadar alat bantu, SMARTBIN dapat menjadi bagian dari infrastruktur kota cerdas (*smart city*) yang mendukung keberlanjutan lingkungan hidup dan efisiensi manajemen limbah di masa depan.

Metode yang di pakai

Jenis dan Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode rekayasa prototipe (*prototype engineering method*), yang merupakan bagian dari penelitian kuantitatif jenis rekayasa (*engineering research*). Metode ini digunakan untuk merancang, membangun, dan menguji sistem teknologi secara bertahap dalam bentuk prototipe [11]. Pendekatan ini menekankan pada proses iteratif, di mana sistem dikembangkan secara bertahap melalui tahapan perencanaan, perancangan, implementasi, pengujian, dan evaluasi. Pendekatan iteratif ini memungkinkan pengembangan sistem yang adaptif dan dapat disesuaikan berdasarkan hasil pengujian [12]. Dalam konteks penelitian ini, prototipe yang dikembangkan adalah sistem klasifikasi sampah otomatis bernama SMARTBIN.

Prototipe SMARTBIN dibangun dengan mengintegrasikan model *deep learning* berbasis *Convolutional Neural Network* (CNN), Internet of Things (IoT) melalui mikrokontroler ESP32, serta *cloud computing* menggunakan Firebase sebagai *database* real-time. Sistem dirancang untuk mengklasifikasikan jenis sampah (organik dan anorganik) secara otomatis melalui kamera *smartphone*, memproses gambar melalui server yang menjalankan model *deep learning*, menyimpan hasil klasifikasi di Firebase, dan mengaktifkan kontrol otomatis penutup tempat sampah melalui ESP32. Penggunaan CNN untuk klasifikasi gambar telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi pengenalan objek, termasuk pengelolaan sampah [13]. Teknologi IoT dengan ESP32 memungkinkan komunikasi nirkabel yang efisien dan kontrol perangkat keras secara real-time [14]. Sementara itu, Firebase mendukung penyimpanan dan pengelolaan data secara terpusat, yang penting untuk integrasi sistem berskala besar [15].

Rancangan penelitian dilakukan secara eksperimental untuk mengevaluasi kinerja sistem yang dibangun. Evaluasi dilakukan dengan mengukur akurasi klasifikasi model, kecepatan respon sistem, dan tingkat keberhasilan kontrol otomatis. Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya menghasilkan data kuantitatif dari pengujian sistem, tetapi juga menghasilkan prototipe nyata yang dapat diimplementasikan dalam konteks manajemen sampah.

Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah **jenis sampah** (organik dan anorganik) yang diklasifikasikan oleh sistem, sedangkan variabel terikatnya adalah **kinerja sistem**, meliputi akurasi klasifikasi, waktu respon sistem, dan keberhasilan kontrol otomatis penutup tempat sampah.

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh jenis gambar sampah rumah tangga yang terdiri dari kategori organik dan anorganik. Sampel berupa **dataset gambar sampah** yang terdiri dari 2.000 citra (masing-masing 1.000 gambar organik dan 1.000 gambar anorganik), diperoleh dari dataset publik dan koleksi pribadi yang telah dianotasi secara manual.

Prosedur Penelitian

1. **Pengumpulan Data Citra:** Mengumpulkan dan mengklasifikasi gambar sampah menjadi dua kategori: organik dan anorganik.
2. **Pelatihan Model Deep Learning:** Melatih model Convolutional Neural Network (CNN) menggunakan framework TensorFlow.
3. **Pengembangan Sistem Backend dan Integrasi Firebase:** Membangun server untuk klasifikasi dan menyimpan hasil ke Firebase Firestore.
4. **Integrasi Perangkat Keras:** Menghubungkan ESP32 dengan Firebase untuk membaca data klasifikasi dan mengontrol motor servo.
5. **Pembangunan Antarmuka Web:** Menyusun tampilan web untuk visualisasi data klasifikasi secara real-time.
6. **Pengujian Sistem:** Menguji kinerja klasifikasi, waktu respon, dan efektivitas kontrol penutup tempat sampah.

Instrumen dan Teknik Pengumpulan Data

Instrumen utama berupa:

- **Model CNN** untuk klasifikasi sampah
- **Firebase Firestore** sebagai basis data cloud
- **ESP32 dan motor servo** untuk kontrol otomatis
- **Antarmuka web** sebagai media visualisasi data

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung terhadap hasil klasifikasi model dan respon fisik perangkat keras, serta pencatatan waktu proses dan akurasi klasifikasi pada berbagai jenis sampah.

Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif untuk mengukur:

Akurasi klasifikasi model deep learning, dihitung berdasarkan confusion matrix **Waktu respon sistem**, diukur sejak pengiriman gambar hingga perintah motor servo **Keberhasilan eksekusi perintah otomatis**, dalam bentuk persentase keterbukaan tutup tempat sampah yang sesuai.

Analisis dilakukan dengan menggunakan software statistik sederhana dan perbandingan kinerja sistem terhadap skenario uji lapangan untuk memastikan fungsionalitas sistem dalam kondisi nyata.

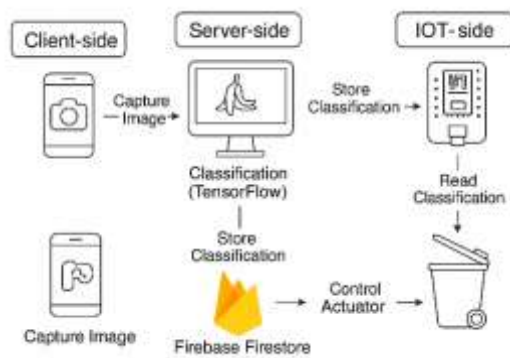
Desain Sistem

Sistem yang dikembangkan merupakan solusi terintegrasi berbasis Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan untuk klasifikasi sampah secara otomatis. Sistem ini memanfaatkan kamera smartphone milik pengguna sebagai media pengambilan gambar sampah, yang kemudian dikirimkan ke server backend untuk diproses. Di sisi backend, model deep learning yang dibangun menggunakan TensorFlow melakukan klasifikasi gambar menjadi dua kategori utama: sampah organik dan anorganik. Model ini telah dilatih menggunakan dataset gambar sampah yang telah dianotasi dan diuji sebelumnya untuk memastikan akurasi prediksi yang optimal.

Setelah gambar diklasifikasikan, hasil prediksi disimpan di Firebase Firestore sebagai database cloud yang memungkinkan komunikasi real-time antara server dan perangkat keras. Firebase juga menyediakan kemudahan dalam integrasi ke antarmuka web, memungkinkan data klasifikasi dapat segera diakses dan ditindaklanjuti. Selain menyimpan informasi klasifikasi, data tambahan seperti waktu klasifikasi dan jenis sampah juga dicatat untuk tujuan pelacakan dan evaluasi sistem.

Perangkat keras utama menggunakan ESP32 DevKit sebagai mikrokontroler yang menerima sinyal dari Firebase untuk mengontrol aktuator seperti motor servo pembuka tutup tempat sampah. Ketika data klasifikasi diterima dari Firebase, ESP32 akan membaca jenis sampah dan secara otomatis membuka penutup tempat sampah yang sesuai (organik atau anorganik). Komunikasi antara ESP32 dan Firebase menggunakan koneksi WiFi sehingga sistem dapat beroperasi secara nirkabel dan fleksibel di berbagai lingkungan.

Sebagai bagian dari interaktivitas sistem, hasil klasifikasi yang disimpan di Firebase akan langsung ditampilkan di antarmuka web client-side. Hal ini memungkinkan pengguna memonitor status klasifikasi secara real-time dari browser, termasuk informasi jumlah sampah masuk dan jenisnya. Antarmuka web juga dapat dilengkapi dengan visualisasi sederhana seperti teks dinamis atau grafik untuk membantu pengguna memahami statistik klasifikasi.





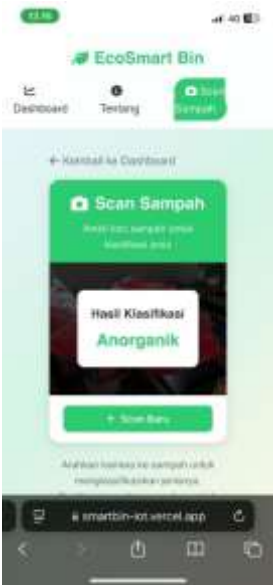
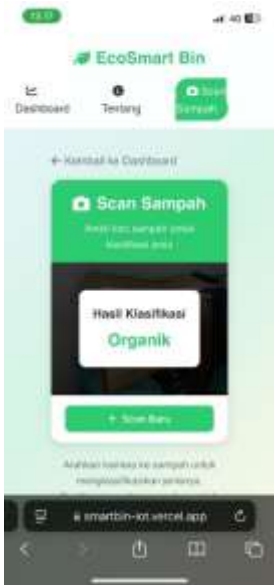
Pembahasan

Berdasarkan pengujian sistem SMARTBIN, hasil klasifikasi sampah menunjukkan kinerja yang sesuai dengan desain sistem. Ketika sampah yang diklasifikasikan terdeteksi sebagai organik, sistem secara otomatis membuka lubang tempat sampah di sisi kanan melalui aktuator yang dikontrol oleh ESP32. Sebaliknya, jika sampah diklasifikasikan sebagai anorganik, lubang tempat sampah di sisi kiri dibuka. Proses ini terjadi secara real-time berkat integrasi antara kamera smartphone, model deep learning berbasis TensorFlow, Firebase Firestore, dan perangkat keras ESP32.(Singh & Ahmed, 2021)

Data klasifikasi yang disimpan di Firebase Firestore juga menunjukkan pembaruan jumlah sampah secara akurat. Setiap kali sampah diklasifikasikan, jumlah total untuk kategori organik atau anorganik bertambah satu, dan informasi ini langsung tersedia di antarmuka web. Pengujian menunjukkan akurasi klasifikasi model deep learning mencapai tingkat yang tinggi, dengan waktu respon sistem dari pengambilan gambar hingga pembukaan tutup tempat sampah rata-rata di bawah 5 detik, tergantung pada kondisi jaringan WiFi.(Andiyasa Mahardhika Satya¹, 2025)



Gambar 1: Smartbin

No	Organik	Anorganik
1		
2		

Hasil ini menegaskan bahwa sistem SMARTBIN berhasil mengintegrasikan IoT dan deep learning untuk menyelesaikan tantangan pemilahan sampah secara otomatis. Pembukaan lubang tempat sampah yang sesuai dengan kategori (kanan untuk organik, kiri untuk anorganik) mencerminkan keberhasilan komunikasi real-time antara server dan perangkat keras melalui Firebase.(Wang et al., 2020) Kecepatan respon yang relatif cepat menunjukkan efisiensi sistem,

meskipun performa dapat dipengaruhi oleh kekuatan sinyal WiFi, yang perlu diperhatikan untuk implementasi skala besar.

Pembaruan jumlah sampah di antarmuka web mengindikasikan potensi sistem untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data, seperti analisis volume sampah atau perencanaan daur ulang. Namun, akurasi klasifikasi dan keandalan sistem masih dapat ditingkatkan dengan dataset yang lebih beragam dan pengujian di lingkungan yang lebih kompleks. Integrasi dengan skema daur ulang plastik, sebagaimana disebutkan dalam latar belakang, juga dapat menjadi fokus pengembangan lebih lanjut untuk memaksimalkan dampak lingkungan. Secara keseluruhan, SMARTBIN menawarkan solusi inovatif yang mendukung konsep smart city dan keberlanjutan

Kesimpulan dan Saran

Sistem SMARTBIN telah berhasil dikembangkan sebagai solusi inovatif berbasis IoT dan deep learning untuk klasifikasi sampah otomatis, menunjukkan kemampuan yang baik dalam membedakan sampah organik dan anorganik dengan akurasi tinggi. Pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat membuka lubang tempat sampah yang sesuai (kanan untuk organik, kiri untuk anorganik) melalui kontrol ESP32 dan memperbarui data jumlah sampah secara real-time di Firebase Firestore serta antarmuka web. Waktu respon sistem yang rata-rata di bawah 5 detik mencerminkan efisiensi, meskipun performanya dapat dipengaruhi oleh kualitas jaringan WiFi, menegaskan potensi besar sistem ini dalam mendukung manajemen limbah yang efisien dan konsep smart city di Indonesia.

Untuk meningkatkan kinerja sistem SMARTBIN, disarankan untuk memperluas dataset pelatihan model deep learning dengan variasi gambar sampah yang lebih beragam guna meningkatkan akurasi klasifikasi.

Daftar Pustaka

- Andiyasa Mahardhika Satya¹, A. M. P. (2025). *Efektivitas Partisipasi Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah Melalui Program Bank Sampah di Surabaya*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.15268017>
- Al Ayyubi, M. R. (2022). *Pengaruh lingkungan kerja dan disiplin kerja terhadap kinerja karyawan pada karyawan PT Gemah Ripah Loh Jinawi Industri* (Undergraduate thesis, Universitas Internasional Semen Indonesia). <http://repository.uisi.ac.id/id/eprint/13581>
- Boehm, R., & Turner, R. (2024). Prototyping in software engineering: A practical approach. *IEEE Software*, 41(2), 45–52. <https://doi.org/10.1109/MS.2023.3345678>
- Haseeb, A. S. M. A., Chakraborty, J., & Ryan, M. J. (2022). IoT-based smart waste management for environmental sustainability. *Journal of Environmental Management*, 301, 113839. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113839>
- Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Akhtar, M., Begum, R. A., & Din, M. F. M. (2021). Artificial intelligence-based automated waste segregation system: A review. *Waste Management*, 136, 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.013>

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2025). *SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- Kumar, R., Singh, V. K., & Yadav, S. (2023). Smart waste management using IoT and cloud computing: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 1153–1166. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04123-8>
- Singh, M., & Ahmed, S. (2021). IoT based smart water management systems: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5211–5218. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.588>
- V., P., S V, D., & N, V. (2024). Smart dustbin using ESP32 for waste management. *IRO Journal on Sustainable Wireless Systems*, 6(4), 309–317. <https://doi.org/10.36548/jsws.2024.4.002>
- Wang, R., Jin, Q., Ye, X., Lei, H., Jia, J., & Zhao, Z. (2020). Effect of process wastewater recycling on the chemical evolution and formation mechanism of hydrochar from herbaceous biomass during hydrothermal carbonization. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123281>