

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan proses perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem cerdas pemilah sampah daur ulang bernilai ekonomis, dapat ditarik kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah sebagai berikut:

1. Model Deep Learning berbasis arsitektur MobileNetV2 berhasil dikembangkan untuk mengklasifikasikan sampah berdasarkan nilai ekonomisnya. Proses klasifikasi dilakukan menggunakan pendekatan dua tahap (*cascade classification*), yaitu model pertama untuk membedakan kategori botol plastik, kaleng, dan sampah kering lainnya, kemudian dilanjutkan dengan model kedua untuk mengidentifikasi botol plastik menjadi PET bening dan PET berwarna. Berdasarkan hasil pengujian, model tahap pertama memperoleh akurasi sebesar 84,5%, sedangkan model tahap kedua mencapai akurasi sebesar 89,3%. Pendekatan klasifikasi bertingkat ini terbukti mampu meningkatkan spesifikasi klasifikasi dibandingkan apabila seluruh kategori diklasifikasikan secara langsung dalam satu model.
2. Model yang telah dikembangkan berhasil diimplementasikan pada sistem embedded berbasis Raspberry Pi 4 sehingga mampu melakukan proses identifikasi dan pemilahan sampah secara real-time.

Integrasi antara kamera, model klasifikasi berbasis ONNX Runtime, mekanisme deteksi objek, aktuator motor servo, serta sistem kendali memungkinkan proses identifikasi dan pemilahan berlangsung secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemilahan sesuai kategori yang ditentukan pada berbagai kondisi pencahayaan, yaitu pagi, siang, sore, dan malam, meskipun tingkat keberhasilan dipengaruhi oleh intensitas cahaya serta posisi objek. Selain itu, mekanisme state machine yang diterapkan mampu mengatur urutan kerja sistem secara terstruktur sehingga proses deteksi, klasifikasi, pemilahan, dan pengembalian sistem ke kondisi awal dapat berjalan dengan stabil.

3. Antarmuka interaktif berbasis layar TFT berhasil dirancang dan diintegrasikan dengan sistem sehingga mampu memberikan informasi edukatif secara dinamis berdasarkan hasil klasifikasi sampah. Setelah proses identifikasi selesai, sistem secara otomatis menampilkan jenis sampah yang terdeteksi, tingkat kepercayaan hasil klasifikasi, informasi mengenai karakteristik material, manfaat daur ulang, serta dampak lingkungan apabila sampah tidak dikelola dengan benar. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pemilah sampah otomatis, tetapi juga sebagai media edukasi yang diharapkan dapat meningkatkan pemahaman dan kesadaran pengguna mengenai pentingnya pemilahan sampah berdasarkan nilai ekonomisnya.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai pengembangan pada penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperbanyak jumlah dan variasi dataset yang digunakan dalam proses pelatihan model. Variasi tersebut dapat mencakup jenis sampah, kondisi pencahayaan, orientasi objek, latar belakang, serta kondisi fisik sampah. Dataset yang lebih beragam diharapkan mampu meningkatkan kemampuan generalisasi model sehingga menghasilkan akurasi klasifikasi yang lebih baik ketika diterapkan pada kondisi nyata.
2. Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan penggunaan arsitektur deep learning berbasis object detection, seperti YOLO, sebagai alternatif model klasifikasi. Dengan kemampuan deteksi objek yang dimiliki, model tersebut diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan keandalan sistem dalam mengenali berbagai jenis sampah pada kondisi nyata.
3. Dari sisi antarmuka pengguna, sistem dapat dikembangkan dengan mengintegrasikan Large Language Model (LLM) atau teknologi generative artificial intelligence sehingga informasi edukatif yang ditampilkan menjadi lebih dinamis, interaktif, dan kontekstual sesuai dengan jenis sampah yang terdeteksi. Namun demikian, implementasi teknologi tersebut perlu mempertimbangkan waktu respons (response time) agar tidak mengurangi kenyamanan pengguna maupun menghambat proses pemilahan sampah secara real-time.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] “SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional.” Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: <https://sipsn.kemenvh.go.id/sipsn/>
- [2] H. D. Atmanti, “KAJIAN PENGELOLAAN SAMPAH DI INDONESIA,” *B. Chapter Pembang. Berkelanjutan di Indones. dalam Mewujudkan Tujuan Ekon. Inklusif*, pp. 15–27, 2023.
- [3] N. Nnamoko, J. Barrowclough, and J. Procter, “Solid Waste Image Classification Using Deep Convolutional Neural Network,” *Infrastructures*, pp. 1–18, 2022, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2412-3811/7/4/47>
- [4] G. Yo, “Harga Biji Plastik Daur Ulang PET Dan Jenis Lainnya (2025).” Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: <https://siu-bijiplastik.com/berapa-harga-biji-plastik-daur-ulang-pet/>
- [5] A. H. Hu, C. Y. Ting, A. Ouattara, W. T. Chen, and C. H. Kuo, “Life Cycle Assessment of Recycling Polyethylene Terephthalate (PET): A Comparative Case Study in Taiwan,” *Recycling*, vol. 10, no. 3, 2025, doi: 10.3390/recycling10030098.
- [6] “Amazing Facts About Aluminum Recycling Dallas | Texas Recycling.” Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.texasrecycling.com/recycling/aluminum-recycling-most-valuable-material/>
- [7] Denice, R. Oska Amanda, and E. Pradana, “Implementasi Dan Deteksi Tong Sampah Pintar Menggunakan Esp8266 dengan Algoritma CNN,” *Metik J.*, vol. 9, no. 2, pp. 364–374, 2025, doi: 10.47002/metik.v9i2.1083.
- [8] K. Muchtar, N. T. Anshari, C. Chairuman, K. Alhabibie, and K. Munadi, “Rancang Bangun Purwarupa Pemilah Sampah Pintar Berbasis Deep Learning,” *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 3, pp. 655–661, 2022, doi: 10.25126/jtiik.2022934976.
- [9] L. S. Pieters, “PENGEMBANGAN SISTEM KLASIFIKASI SAMPAH OTOMATIS MENGGUNAKAN DEEP LEARNING BERBASIS CNN UNTUK MENDUKUNG SMART WASTE MANAGEMENT,” *INOVTEK Polbeng - Seri Inform.*, vol. 10, no. 1, pp. 214–224, 2025, doi:

- 10.35314/wst8mh87.
- [10] Z. Qiao, "Advancing Recycling Efficiency: A Comparative Analysis of Deep Learning Models in Waste Classification," 2024, [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2411.02779>
 - [11] H. Ahmed Khan, S. S. Naqvi, A. A. K. Alharbi, S. Alotaibi, and M. Alkhathami, "Enhancing trash classification in smart cities using federated deep learning," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-62003-4.
 - [12] F. R. Sayem *et al.*, "Enhancing waste sorting and recycling efficiency: robust deep learning-based approach for classification and detection," *Neural Comput. Appl.*, vol. 37, no. 6, pp. 4567–4583, 2025, doi: 10.1007/s00521-024-10855-2.
 - [13] J. Guna, K. P. Horvat, and D. Podjed, "People-Centred Development of a Smart Waste Bin," *Sensors*, vol. 22, no. 3, pp. 1–14, 2022, doi: 10.3390/s22031288.
 - [14] M. M. Taye, "Theoretical Understanding of Convolutional Neural Network: Concepts, Architectures, Applications, Future Directions," *Computation*, vol. 11, no. 3, pp. 5–13, 2023, doi: 10.3390/computation11030052.
 - [15] X. Zhao, L. Wang, Y. Zhang, X. Han, M. Deveci, and M. Parmar, *A review of convolutional neural networks in computer vision*, vol. 57, no. 4. Springer Netherlands, 2024. doi: 10.1007/s10462-024-10721-6.
 - [16] J. Wu, "Introduction to Convolutional Neural Networks," *Introd. to Convolutional Neural Networks*, pp. 1–31, 2017, [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20180928011532/https://cs.nju.edu.cn/wujx/teaching/15_CNN.pdf
 - [17] L. Zhao and Z. Zhang, "A improved pooling method for convolutional neural networks," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–22, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-51258-6.
 - [18] M. Sandler, M. Zhu, A. Zhmoginov, and C. V. Mar, "MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks".
 - [19] M. Z. Zaydan, L. Dwi, D. Anisa, A. Mizwar, and A. Rahim, "Optimization of MobileNetV2 Architecture Model Using Convolutional Neural Network Algorithm for Sugarcane Leaf Disease Classification," vol. 10, no. May, pp. 1056–1067, 2026.
 - [20] K. Dong, C. Zhou, Y. Ruan, and Y. Li, "MobileNetV2 Model for Image Classification," *Proc. - 2020 2nd Int. Conf. Inf.*

- Technol. Comput. Appl. ITCA 2020*, pp. 476–480, 2020, doi: 10.1109/ITCA52113.2020.00106.
- [21] O. Novac *et al.*, “Analysis of the Application Efficiency of TensorFlow and PyTorch in Convolutional Neural Network,” 2022.
 - [22] F. Nagata *et al.*, “Evaluation of Interoperability of CNN Models between MATLAB and Python Environments Using ONNX Runtime Model,” no. December, pp. 1–13, 2024.
 - [23] “ONNX Runtime | onnxruntime.” Accessed: Jun. 16, 2026. [Online]. Available: <https://onnxruntime.ai/docs/#onnx-runtime-for-inferencing>
 - [24] F. Durán, M. Martinez, P. Lago, and S. Martínez-Fernández, “Insights into resource utilization of code small language models serving with runtime engines and execution providers,” *J. Syst. Softw.*, vol. 230, no. July, p. 112574, 2025, doi: 10.1016/j.jss.2025.112574.
 - [25] Shubham Mishra, Mrs. Versha Verma, Dr. Nikhat Akhtar, Shivam Chaturvedi, and Dr. Yusuf Perwej, “An Intelligent Motion Detection Using OpenCV,” *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 4099, pp. 51–63, 2022, doi: 10.32628/ijrsrset22925.
 - [26] M. S. Bonney *et al.*, “Development of a digital twin operational platform using Python Flask,” *Data-Centric Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1017/dce.2022.1.
 - [27] T. A. Mulyanto, M. Habiby, Kusnandi, and R. Adam, “HOME AUTOMATION SYSTEM DENGAN MENGGUNAKAN RASPBERRY PI 4,” *J. Digit.*, vol. 11, pp. 60–73, 2021, doi: 10.55041/ijrsrem32505.
 - [28] M. A. Baballe, M. I. Bello, A. A. Umar, A. K. Shehu, D. Bello, and F. T. Abdullahi, “A Look at the Different Types of Servo Motors and Their Applications,” *Sarcouncil J. Eng. Comput. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 4–9, 2022.
 - [29] S. Autsou, K. Kudelina, T. Vaimann, A. Rassõlkin, and A. Kallaste, “Principles and Methods of Servomotor Control: Comparative Analysis and Applications,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 6, 2024, doi: 10.3390/app14062579.
 - [30] A. zamani paydar *et al.*, “Resistance Temperature Detector (RTD) System in Nuclear Power Plant (A Short Review) Resistance Temperature Detector (RTD) System in Nuclear Power Plant (A Short Review) Resistance Temperature Detector (RTD) System in Nuclear Power Plant (A Short

- Review),” 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/369405654>
- [31] NXP Semiconductors, “PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller,” 2015. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>