

Perancangan Alat Pemilah Plastik Berdasarkan Bentuk dan Warna Berbasis Kecerdasan Buatan

Achmad Anwari¹, Lilik Hari Santoso², Nabillah Shofie Laela³

¹²³Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Texmaco, Indonesia

Email: anwarie@sttexmaco.ac.id

Received 28 Agustus 2026 | Revised 11 September 2026 | Accepted 21 September 2026

ABSTRAK

Penanganan yang serius diperlukan untuk masalah sampah plastik yang meningkat. Pemilahan sampah plastik secara konvensional bisa bermasalah, seperti waktu dan penyortiran sampah. Dengan menggunakan metode kecerdasan buatan masalah bisa dikurangi, penelitian ini bertujuan untuk membuat alat pemilah sampah plastik yang dapat membedakan bentuk dan warnanya. Penggunaan modul Seeed Studio XIAO ESP32S3 Sense pada mikrokontroler sebagai perangkat akuisisi data gambar, dan Platform Edge Impulse yang berbasis klasifikasi gambar sebagai representasi model AI dalam melakukan proses identifikasi objek plastik. Ada tiga objek plastik yang dikategorikan: botol (botol plastik), gelas (gelas plastik), dan cap (tutup botol plastik). Kriteria klasifikasi objek membantu motor servo mengarahkan objek ke wadah yang tepat. Hasil klasifikasi dapat ditampilkan secara real-time pada output (LCD). Implementasi rancangan alat pemilah sampah plastik ini sudah dapat mengidentifikasi dan mengelompokkan objek secara otomatis berdasarkan kategori yang telah ditentukan. Alat ini diharapkan dapat menjadi salah satu alternatif dan ide baru untuk pengelolaan sampah plastik.

Kata kunci: *Sampah Plastik, Kecerdasan Buatan, Klasifikasi gambar, Edge Impulse, ESP32S3 Sense, Mikrokontroler.*

ABSTRACT

Serious measures are required to address the growing problem of plastic waste. Conventional plastic waste sorting methods often face challenges related to time efficiency and the sorting process itself. Artificial intelligence (AI) methods can help mitigate these issues; this research aims to develop a plastic waste sorting device capable of distinguishing objects based on shape and color. The system utilizes the Seeed Studio XIAO ESP32S3 Sense microcontroller module for image data acquisition and the Edge Impulse platform—leveraging image classification—to implement the AI model for identifying plastic objects. Three categories of plastic objects are defined: bottles (plastic bottles), cups (plastic cups), and caps (plastic bottle caps). Classification results guide a servo motor to direct the object into the appropriate container, with real-time output displayed on an LCD screen. The implemented device successfully identifies and automatically sorts objects according to the established categories. This device offers a promising alternative and a novel approach to plastic waste management.

Keywords: *Plastic waste, Artificial Intelligence, Image classification, Edge Impulse, ESP32-S3 Sense, Microcontroller.*

1. PENDAHULUAN

Produksi plastik global terus meningkat secara signifikan dari tahun ke tahun. Berdasarkan laporan *United Nations Environment Programme* (UNEP), dunia memproduksi lebih dari 460 juta ton plastik per tahun, dan diperkirakan akan meningkat tiga kali lipat pada tahun 2060 jika tidak ada intervensi kebijakan yang serius. Sekitar 40% dari seluruh plastik yang diproduksi merupakan plastik sekali pakai, dan hanya kurang dari 10% yang berhasil didaur ulang secara global. Plastik yang tidak terkelola dengan baik mencemari ekosistem darat, sungai, dan lautan, dengan dampak jangka panjang yang mengancam keanekaragaman hayati dan kesehatan manusia.

Sampah plastik merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang paling serius dan mendesak di Indonesia maupun di tingkat global. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, timbunan sampah nasional terus meningkat seiring pertambahan jumlah penduduk dan aktivitas ekonomi masyarakat. Plastik, yang dikenal karena sifatnya yang tahan lama dan sulit terurai secara alami, menjadi komponen terbesar penyumbang pencemaran lingkungan, khususnya di ekosistem perairan dan tanah [1]. Pengelolaan sampah plastik yang tidak tepat, seperti pembuangan ke tempat pembuangan akhir (TPA) tanpa pemilahan, pembakaran terbuka, atau pembuangan ke sungai dan laut, memperburuk dampak negatif yang ditimbulkan. Ini perlu diatasi dengan pendekatan yang lebih sistematis, yaitu melalui pemilahan sampah plastik berdasarkan jenisnya sebelum masuk ke alur pengelolaan lebih lanjut [2][3].

Proses pemilahan sampah secara konvensional hingga saat ini masih menjadi metode yang umum diterapkan, baik di tempat penampungan sementara (TPS) maupun bank sampah. Namun, metode ini memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain ketergantungan pada tenaga manusia, rendahnya efisiensi dan konsistensi hasil pemilahan, risiko paparan bahan berbahaya bagi pekerja, serta ketidakmampuan dalam memproses volume sampah yang besar secara cepat [4]. Pemanfaatan kembali sampah plastik melalui daur ulang (*recycling*) merupakan salah satu solusi yang paling efektif untuk mengurangi dampak negatif sampah plastik terhadap lingkungan. Sampah plastik yang telah dipilah berdasarkan jenisnya memiliki nilai ekonomi yang signifikan sebagai bahan baku industri daur ulang. Pemilahan yang baik meningkatkan kualitas bahan baku daur ulang dan nilai jualnya. Namun, tahap pemilahan ini masih menjadi tantangan utama, karena proses konvensional memerlukan waktu dan tenaga yang besar serta rentan terhadap kesalahan manusia (*human error*). Objek yang menjadi fokus penelitian ini meliputi tiga jenis sampah plastik yang paling umum ditemukan dalam kehidupan sehari-hari, yaitu botol plastik, gelas plastik, dan tutup botol plastik — ketiganya memiliki karakteristik visual (bentuk dan warna) yang berbeda, sehingga dapat dijadikan kelas dalam proses klasifikasi gambar berbasis kecerdasan buatan. Perkembangan teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*), khususnya di bidang *computer vision* dan *machine learning*, telah membuka peluang besar untuk mengotomatiskan proses pemilahan sampah. Metode *image classification* berbasis *deep learning* terbukti efektif dalam mengidentifikasi objek secara otomatis berdasarkan karakteristik visual, termasuk warna, bentuk, dan tekstur permukaan objek [5][6].

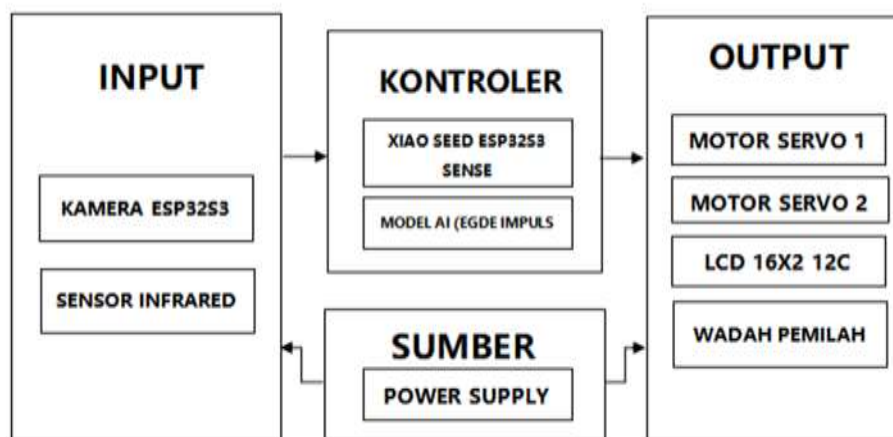
Penelitian-penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas penggunaan algoritma *convolutional neural network (CNN)* dan arsitektur *TinyML* untuk klasifikasi sampah pada perangkat *edge computing* berdaya rendah [7][8]. Platform *Edge Impulse* hadir sebagai solusi *end-to-end* yang memungkinkan pengembang untuk melatih, mengoptimasi, dan *deploy* model *machine learning* secara efisien ke perangkat mikrokontroler dengan

keterbatasan sumber daya seperti memori dan daya komputasi [9]. Penelitian ini bertujuan untuk merancang suatu alat pemilah sampah plastik otomatis berbasis kecerdasan buatan yang mampu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan tiga jenis plastik yang umum ditemukan, yaitu botol plastik, gelas plastik, dan tutup botol plastik, kemudian secara otomatis mengarahkan setiap objek ke wadah pemilah yang sesuai. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah plastik yang lebih baik di tingkat komunitas maupun industri [10].

2. METODE

2.1 Rancangan Sistem

Diagram blok sistem pada alat pemilah sampah plastik berbasis kecerdasan buatan ini terdiri dari empat bagian utama yaitu input, kontroler, output, dan sumber daya. Setiap bagian saling terhubung untuk mendukung proses pendeteksian, klasifikasi, hingga pemilahan sampah plastik secara otomatis.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Pada bagian input diperlihatkan, sistem menggunakan kamera ESP32S3, dan sensor *infrared*. Kamera ESP32S3 berfungsi untuk mengambil gambar objek sampah plastik yang akan diproses oleh sistem kecerdasan buatan. Kamera ini digunakan untuk mengenali bentuk dan warna objek sehingga sistem dapat membedakan kategori sampah plastik seperti botol, gelas, tutup, dan kosong. Sensor *Infrared* LM393 berfungsi mendeteksi keberadaan objek di depan alat sebelum proses klasifikasi dimulai. Sedangkan sensor infrared digunakan untuk memastikan posisi objek berada pada area pengambilan gambar agar proses identifikasi dapat dilakukan secara optimal.

Pada bagian kontroler, sistem menggunakan *Seeed Studio* XIAO ESP32S3 Sense sebagai pusat pengendali utama. Mikrokontroler ini bertugas menerima data dari sensor input, mengolah data citra objek, menjalankan model kecerdasan buatan, dan mengontrol proses pemilahan. Sistem klasifikasi objek dilakukan menggunakan platform *Edge Impulse* dengan metode *image*

classification. Model AI yang telah dilatih sebelumnya akan diimplementasikan ke dalam ESP32S3 sehingga sistem dapat mengenali objek secara *real-time*.

Pada bagian output, sistem menggunakan motor servo, LCD 16x2 I2C, dan wadah pemilah. Motor servo berfungsi sebagai pengarah jalur objek menuju wadah sesuai hasil klasifikasi AI. Servo akan bergerak pada sudut tertentu untuk mengarahkan objek ke wadah botol, gelas, atau tutup. Selanjutnya LCD 16x2 I2C digunakan untuk menampilkan informasi hasil klasifikasi seperti jenis objek dan jumlah objek yang telah dipilah oleh sistem. Setelah proses klasifikasi selesai, objek akan masuk ke wadah pemilah sesuai kategorinya masing-masing.

2.2 Analisis Kebutuhan

Sebagai proses untuk menjembatani antara rancangan dan implementasi diperlukan identifikasi kebutuhan dalam perancangan baik perangkat keras maupun perangkat lunak yang akan digunakan dalam kegiatan ini.

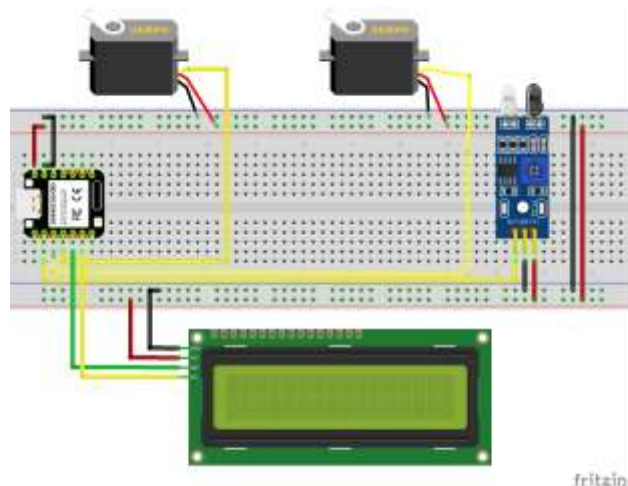
Spesifikasi, kualitas, jumlah komponen yang digunakan menentukan kualitas sistem yang dihasilkan. Berikut ini adalah daftar komponen utama yang digunakan dalam perancangan sistem.

Tabel 1. Spesifikasi komponen

No	Material / Deskripsi	Fungsi	Jumlah
1	<i>Seeed Studio XIAO ESP32S3 Sense</i> (dengan Kamera OV2640)	Sebagai pusat pengendali sistem, menjalankan model TinyML, mengambil citra objek, serta mengendalikan seluruh komponen..	1 Pcs
2	<i>Sensor Infrared (IR Obstacle Sensor LM393)</i>	Mendeteksi keberadaan objek pada area pembacaan kamera dan memicu proses pengambilan gambar	1 Pcs
3	LCD 16×2 I2C	Menampilkan status sistem, hasil klasifikasi, dan informasi proses secara real-time.	1 Pcs
4	Motor Servo MG90S <i>Continuous Rotation</i> (360°)	Menggerakkan mekanisme penutup dan stopper jalur botol sesuai hasil klasifikasi.	2 Pcs

2.3 Perancangan Hardware

Pada gambar 2.2 diperlihatkan skematik rangkaian sebagai implementasi dari blok diagram sistem, skematik dibuat dengan menggunakan aplikasi Fritzing. Sebagai mainboard utama sistem digunakan *Breadboard* untuk mempermudah perancangan



Gambar 2. Skematik Rangkaian Alat

Berikut penjelasan dari skematik rangkaian :

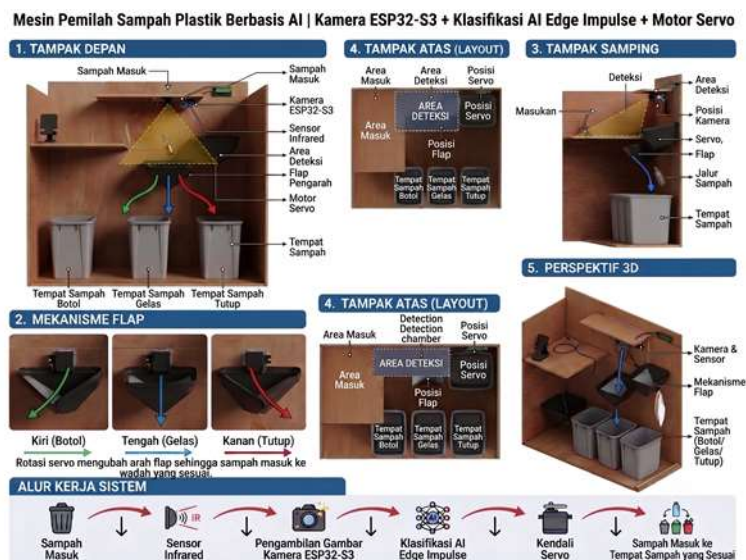
1. *Seesee Studio XIAO ESP32-S3 Sense* bertindak sebagai pusat pemroses data dan pengambil keputusan. Modul ini terhubung ke kamera OV2640 secara internal melalui *expansion board* bawaan.
2. Dua Motor Servo *Continuous Rotation* (Servo 1 dan Servo 2) digunakan sebagai aktuator pemilah. Masing-masing servo memiliki tiga jalur kabel: jalur sinyal PWM Servo 1 dihubungkan ke GPIO3, sedangkan jalur sinyal PWM Servo 2 dihubungkan ke GPIO4. Jalur tegangan (VCC) dan Ground (GND) dari kedua servo dihubungkan ke *power rail breadboard*.
3. Modul Sensor *Infrared (IR Obstacle Sensor LM393)* digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek sampah pada area *capture* kamera. Pin output digital (OUT) dari sensor IR dihubungkan ke GPIO2, sedangkan pin VCC dan GND dihubungkan ke *power rail breadboard*. Sensor ini dilengkapi dengan pemancar LED inframerah, fototransistor penerima, dan potensiometer untuk mengatur sensitivitas jarak deteksi.
4. Display LCD 16x2 I2C digunakan untuk menampilkan status dan hasil klasifikasi secara *real-time*. Antarmuka I2C menggunakan jalur SDA yang dihubungkan ke GPIO5 dan SCL ke GPIO6. Pin VCC dan GND pada modul I2C dihubungkan ke *power rail breadboard*.
5. Pendistribusian daya menggunakan *power rail breadboard* (jalur merah untuk VCC 5V dan hitam untuk GND). Step-Down LM2596 menurunkan tegangan input 12V DC dari adaptor menjadi output stabil 5V DC, yang kemudian mendistribusikan daya ke seluruh komponen termasuk XIAO ESP32-S3 Sense, kedua motor servo, sensor IR, dan LCD 16x2 I2C.

Tabel 2. Pengkabelan Komponen

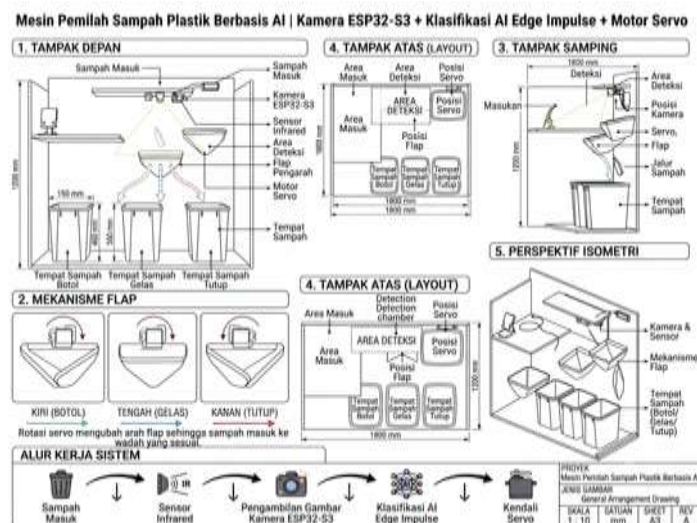
No	Komponen	Koneksi Pin GPIO	Jalur Daya	Fungsi
1	Seesee Studio XIAO ESP32-S3 Sense + Kamera OV2640	Internal (expansion board)	VCC & GND ke power rail	Pusat pemrosesan data dan klasifikasi

No	Komponen	Koneksi Pin GPIO	Jalur Daya	Fungsi
2	Servo 1 (Continuous Rotation)	PWM ke GPIO3	VCC & GND ke power rail	Aktuator pemilah kategori A
3	Servo 2 (Continuous Rotation)	PWM ke GPIO4	VCC & GND ke power rail	Aktuator pemilah kategori B
4	Sensor IR LM393	OUT ke GPIO2	VCC & GND ke power rail	Deteksi keberadaan objek sampah
5	LCD 16x2 I2C	SDA ke GPIO5, SCL ke GPIO6	VCC & GND ke power rail	Menampilkan status & hasil klasifikasi

Adapun bentuk rancangan visual dan pengaturan tata letak secara umum dari sistem yang akan dibuat diperlihatkan pada gambar berikut. rancangan bentuk visual dibuat dengan bantuan aplikasi open AI dengan *prompt* sesuai dengan kebutuhan rancangan sistemnya



Gambar 3. Visualisasi 3D Sistem



Gambar 4. Pengaturan tata letak

2.4 Perancangan Software

Perancangan software ditulis dalam bahasa C++ menggunakan aplikasi IDE Arduino. Rancangan dibuat terdiri dari beberapa modul fungsi yang saling terintegrasi sebagai berikut.

- a. File *firmware* utama adalah *PemilahPlastik_AI.ino*.
- b. Alur program utama terdapat dalam fungsi *setup()* dan *loop()* pada Arduino. Fungsi *setup()* dieksekusi sekali saat mikrokontroler *boot*, sedangkan *loop()* dieksekusi berulang secara kontinyu selama sistem aktif.
- c. Pada *setup()*, urutan inisialisasi adalah: (1) *Serial Monitor 115200 baud*, (2) *LCD I2C dengan Wire.begin* (GPIO5, GPIO6), (3) Kamera OV2640 dengan resolusi 96×96 RGB565 and PSRAM *enabled*, (4) Sensor *IR pinMode INPUT* pada *GPIO2*, (5) Servo 1 dan Servo 2 dengan *setPeriodHertz(50)* dan *attach()* dengan *pulse width 500–2400μs*.
- d. Pada *loop()*, urutan eksekusi adalah: (1) *handleSerial()* — pemrosesan perintah *debugging via Serial Monitor*, (2) Pengecekan *trigger IR sensor (isObjectDetected())* dengan *debounce 50ms* atau *interval fallback jika IR dinonaktifkan*, (3) Pemanggilan *runInference()* yang melakukan *capture frame* kamera dan menjalankan *run_classifier()*, (4) Evaluasi hasil inferensi terhadap *confidence threshold*, (5) Pemanggilan fungsi sorting servo sesuai label yang terdeteksi, (6) *Cooldown 1 detik* dan *reset debounce IR*.

Fungsi Inferensi *Edge Impulse*

Fungsi *runInference()* adalah inti dari sistem AI. Alur eksekusinya adalah:

- a. *Capture frame* RGB565 96×96 dari kamera via *esp_camera_fb_get()*.
- b. *2Set pointer buffer global ei_frame_buffer* untuk *callback getPixelData()*.
- c. Inisialisasi *signal_t* dengan *total_length = 96×96 = 9216 piksel*.
- d. Panggil *run_classifier(&signal, &ei_result, false)* dari library *Edge Impulse*.
- e. Kembalikan frame buffer kamera via *esp_camera_fb_return()*.
- f. Iterasi *EI_CLASSIFIER_LABEL_COUNT* kelas untuk mencari index dengan *confidence* tertinggi.
- g. *Return struct InferenceResult* berisi *label, confidence, aboveThreshold, dan inferenceTimeMs*.

Callback getPixelData() mengkonversi data RGB565 (2 byte/piksel) ke format float yang dibutuhkan *Edge Impulse: float = (R << 16) | (G << 8) | B*. Konversi komponen warna dilakukan dengan *bit-shifting*: R = 5 bit diperluas ke 8 bit, G = 6 bit diperluas ke 8 bit, B = 5 bit diperluas ke 8 bit.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Running Test Awal Sistem

Sebagai tahap validasi awal dilakukan running test untuk memastikan hasil perancangan dan perakitan bekerja sesuai desain sebelum masuk ke tahap pengujian dan analisis.

Berikut hasil pantauan dari hasil running test;

- a. Inisialisasi;
- b. Serial Monitor: dibuka pada 115200 baud, maksimal delay 3 detik;

- c. LCD 16x2 I2C: Wire I2C GPIO5 (SDA) dan GPIO6 (SCL), alamat 0x27. LCD menyala dan menampilkan: Baris atas: 'PemilahPlastik' Baris bawah: 'Booting...' ;
- d. Kamera OV2640: Resolusi 96x96 piksel RGB565. Buffer di PSRAM jika tersedia. LCD baris bawah: 'Init kamera...' -> 'Cam: OK' (jika berhasil) atau 'Cam: GAGAL!' (jika error);
- e. Sensor IR LM393: GPIO2 sebagai INPUT. Mode active-LOW, debounce 50 ms ;
- f. Servo 1 dan Servo 2: Frekuensi PWM 50 Hz. Diset ke netral (*write micro seconds* (1500+trim)). Delay 500 ms untuk settling. Trim awal = 0 us (dapat dikalibrasi via Serial Monitor);
- g. Sistem Siap: LCD menampilkan: Baris atas: 'Siap deteksi' Baris bawah: 'Menunggu...' Sistem masuk ke loop() dan menunggu trigger sensor IR.

3.2 Pengujian

Pengujian sistem dilakukan secara bertahap (*bottom-up*), dimulai dari verifikasi komponen individual hingga validasi sistem secara terintegrasi penuh. Pendekatan ini bertujuan memastikan setiap subsistem berfungsi sesuai spesifikasi sebelum diintegrasikan, sehingga apabila terjadi ketidaksesuaian dapat diidentifikasi dan diperbaiki lebih awal.

Pengujian aktuator servo dilakukan secara terpisah untuk setiap kelas objek guna memverifikasi mekanisme pemilahan dua tahap. Berdasarkan verifikasi kode firmware final (PemilahPlastik_AI.ino, patch BUG 3 FIX 2026-07-11), urutan gerak servo per kelas adalah:

- a. Kelas Tutup (Wadah Kanan): Servo 1 berputar ke kanan (CW, 370 ms), balik ke home (300 ms). Servo 2 tidak aktif.
- b. Kelas Botol (Wadah Kiri): Servo 1 ke kiri (CCW, 300 ms) mengoper ke Servo 2, balik ke home (230 ms). Setelah jeda 100 ms, Servo 2 ke kiri (CCW, 300 ms) ke Wadah Kiri, balik (230 ms).
- c. Kelas Gelas (Wadah Tengah): Servo 1 ke kiri (CCW, 300 ms) mengoper ke Servo 2, balik. Setelah jeda 100 ms, Servo 2 ke kanan (CW, 370 ms) ke Wadah Tengah, balik.

Tabel 3. Ringkasan Pengujian

Objek	Servo 1 (GPIO3)	Servo 2 (GPIO4)	Catatan
Tutup (Wadah Kanan)	CW 370 ms → balik home 300 ms	Tidak aktif	Pemilahan ke kanan
Botol (Wadah Kiri)	CCW 300 ms → balik home 230 ms	Setelah jeda 100 ms: CCW 300 ms → balik 230 ms	Pemilahan ke kiri
Gelas (Wadah Tengah)	CCW 300 ms → balik	Setelah jeda 100 ms: CW 370 ms → balik	Pemilahan ke tengah

3.3 Analisis Hasil Klasifikasi

Berdasarkan hasil pengujian, sistem secara umum telah mampu mengklasifikasikan objek plastik sesuai dengan kategori yang telah ditentukan, yaitu botol, gelas, tutup, dan kosong. Namun, selama proses pengujian masih ditemukan beberapa kondisi di mana sistem melakukan proses klasifikasi meskipun objek belum sepenuhnya berada pada area

pengambilan gambar. Akibatnya, sistem terkadang menghasilkan prediksi terhadap objek yang sebenarnya belum dimasukkan ke dalam area deteksi.

Hal tersebut dianalisis dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor pertama adalah kualitas dan variasi *dataset* yang digunakan pada proses pelatihan model. Meskipun dataset telah dibagi menjadi data *training* dan *testing*, variasi kondisi pencahayaan, posisi objek, serta kondisi tanpa objek (kelas kosong) masih terbatas. Akibatnya, ketika kamera menangkap citra dengan kondisi yang berbeda dari data pelatihan, model cenderung memberikan prediksi terhadap kelas yang memiliki tingkat kemiripan paling tinggi.

Faktor kedua adalah kondisi pencahayaan saat proses pengujian. Model *image classification* pada *Edge Impulse* sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang diterima kamera. Perubahan pencahayaan, munculnya bayangan, maupun pantulan cahaya pada permukaan plastik dapat mengubah karakteristik citra sehingga memengaruhi hasil klasifikasi. Kondisi tersebut menyebabkan model terkadang memberikan prediksi meskipun objek belum berada pada posisi yang ideal.

Ada keterbatasan komponen perangkat keras juga menjadi salah satu penyebab. Sensor infrared (IR) berfungsi sebagai pemicu proses pengambilan gambar, sensitivitas sensor dapat menyebabkan kamera melakukan pengambilan citra ketika objek baru memasuki area deteksi atau bahkan saat terjadi pantulan cahaya. Akibatnya, citra yang diproses oleh model belum sepenuhnya merepresentasikan objek yang akan diklasifikasikan sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya prediksi yang kurang akurat.

Berdasarkan hasil pengujian *confusion matrix*, model tetap menunjukkan performa yang baik dengan tingkat akurasi masing-masing kelas yang cukup tinggi. Permasalahan tersebut lebih dipengaruhi oleh kondisi implementasi sistem secara nyata dibandingkan dengan kemampuan model klasifikasi itu sendiri. Pengembangan selanjutnya diperlukan penambahan variasi *dataset*, optimalkan posisi dan sensitivitas sensor *infrared*, kendali kondisi pencahayaan, serta pengaturan waktu pengambilan gambar agar objek telah berada sepenuhnya pada area deteksi sebelum proses inferensi dilakukan.

4. KESIMPULAN

Hasil pengembangan alat pemilah sampah plastik berbasis kecerdasan buatan menggunakan Seeed Studio XIAO ESP32-S3 Sense dan Edge Impulse ini mampu mengklasifikasikan objek menjadi empat kelas, yaitu botol, gelas, tutup, dan kosong, serta aktuator servo dapat berfungsi melakukan pemilahan secara otomatis. Dari pengujian menunjukkan bahwa model memiliki performa klasifikasi yang cukup baik dengan akurasi kelas masing-masing sebesar 98,7% (botol), 91,9% (gelas), 95,6% (tutup), dan 100% (kosong). Analisis menunjukkan kualitas *dataset*, kondisi pencahayaan, kualitas citra kamera, serta sinkronisasi sensor *infrared* dan kamera sangat mempengaruhi kestabilan hasil klasifikasi. Diperlukan optimalisasi pada aspek-aspek tersebut peningkatan keandalan sistem pada penggunaan di kondisi nyata.

5. DAFTAR RUJUKAN

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, "Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN)," Kementerian LHK, Jakarta, 2024. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/>

- [2] A. I. Maula, "Optimalisasi Pengelolaan Sampah di Desa Mendalo Indah melalui Pendekatan Partisipatif," *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 6, pp. 939–946, 2025.
- [3] A. D. Astuti and E. Frimawaty, "Karakteristik Sampah Sungai dan Perilaku Masyarakat Pesisir terhadap Sampah Plastik: Studi Kasus di Sungai," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, Kota Cirebon, vol. 17, no. 1, pp. 45–53, 2019.
- [4] D. I. Lingkungan, "Upaya Mengurangi Timbulan Sampah Plastik di Lingkungan," *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, vol. 8, no. 2, pp. 141–147, 2019.
- [5] R. Amalia and P. Rosyani, "Klasifikasi Citra Menggunakan Metode Random Forest dan Sequential Minimal Optimization (SMO)," *Jurnal Informatika*, vol. 8, no. 1, pp. 12–20, 2021.
- [6] A. Ahmad, "Mengenal Artificial Intelligence, Machine Learning, Neural Network, dan Deep Learning," *Teknosains*, vol. 14, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [7] L. Listyalina, R. R. Utami, and N. Putri, "The Application of Artificial Intelligence in Waste Classification as an Effort in Plastic Waste Reduction," *International Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 5, no. 2, pp. 88–97, 2021.
- [8] P. Warden and D. Situnayake, *TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2020. [Online]. Available: <https://www.oreilly.com/library/view/tinyml/9781492052036/>
- [9] Edge Impulse, "Edge Impulse Documentation — Image Classification Getting Started," Edge Impulse Inc., 2024. [Online]. Available: <https://docs.edgeimpulse.com/docs/tutorials/end-to-end-tutorials/image-classification> (diakses: 30 Juni 2026).
- [10] Seeed Studio, "XIAO ESP32S3 Sense — Getting Started with XIAO ESP32S3 (Sense)," Seeed Studio Wiki, 2024. [Online]. Available: https://wiki.seeedstudio.com/xiao_esp32_s3_getting_started/ (diakses: 30 Juni 2026).
- [11] K. Harrington, "ESP32Servo: Servo library for ESP32 using hardware PWM," GitHub Repository, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/madhephaestus/ESP32Servo> (diakses: 30 Juni 2026).
- [12] F. de Brabander, "LiquidCrystal_I2C: Arduino Library for LCD Display with I2C," GitHub Repository, 2019. [Online]. Available: <https://github.com/fdebrabander/Arduino-LiquidCrystal-I2C-library> (Diakses: 30 Juni 2026).
- [13] Espressif Systems, "ESP32-S3 Technical Reference Manual," Espressif Systems, Shanghai, v1.4, 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf (Diakses: 30 Juni 2026).
- [14] A. Anwari, B. Sunarto, dan A. Amelia, "Rancang Bangun Alat Pemilah Sampah Organik Dan Anorganik Otomatis Berbasis Arduino Uno Untuk Kantin STT Texmaco Subang," *INFOTEX: Jurnal Informatika dan Teknik*, vol. 2, no. 2, hlm. 86-97, 2024. [Online]. Available: <https://ojs.sttexmaco.ac.id/index.php/infotex/article/view/82>

- [15] L. H. Santoso, A. Anwari, dan R. Cahya, "Perancangan Miniatur Sistem Sortir Barang Berdasarkan Warna pada Konveyor Menggunakan Robot ARM Berbasis Mikrokontroler," INFOTEX: Jurnal Informatika dan Teknik, vol. 3, no. 1, hlm. 100-111, 2024.[Online]. Available:<https://ojs.stttexmaco.ac.id/index.php/infotex/article/view/117>
- [16] A. Anwari, L. H. Santoso, dan F. S. Alfahrezi, "Rancang Bangun Bank Sampah Botol Plastik Berbasis Mikrokontroller Dengan Sistem Voucher Otomatis," INFOTEX: Jurnal Informatika dan Teknik, vol. 4, no. 2, hlm. 1-15, 2026. [Online]. Available: <https://ojs.stttexmaco.ac.id/index.php/infotex/article/view/210>
- [17] A. Anwari, L. H. Santoso, dan R. F. Shopa, "Implementasi Teknologi ESP-32 Camera dalam Sistem Keamanan Kandang Domba Berbasis Internet Of Things," INFOTEX: Jurnal Informatika dan Teknik, vol. 2, no. 2, hlm. 1-13, 2024. [Online]. Available: <https://ojs.stttexmaco.ac.id/index.php/infotex/article/view/77>