

AI-Driven Inorganic Waste Sorting System for Sustainable Public Facilities

Sistem Pemilahan Sampah Anorganik Berbasis Kecerdasan Buatan untuk Fasilitas Umum yang Berkelanjutan

Po Abas Sunarya^{1*} , Rifqa Nabila Muti² , Ruli Supriati³ , Ryo Satya Pradhana⁴ , Richard Evans⁵ 

¹Faculty of Economics and Business, Universitas Raharja, Indonesia

²CAI Sejahtera Indonesia, Indonesia

^{3,4}Faculty of Science and Technology, Universitas Raharja, Indonesia

⁵Faculty of Computer Science, Adi Journal Incorporation, United States

¹abas@raharja.info, ²mutirifqa04@gmail.com, ³ruli@raharja.info, ⁴ryo.satya@raharja.info, ⁵vans.richard@adi-journal.org

*Corresponding Author

Article Info

Article history:

Penyerahan Januari 10, 2026

Revisi Maret 30, 2026

Diterima Mei 23, 2026

Diterbitkan Juni 9, 2026

Keywords:

Computer Vision

Artificial Intelligence

Raspberry Pi 5

Orange Box

MobileNetV2

Kata Kunci:

Penglihatan Komputer

Kecerdasan Buatan

Raspberry Pi 5

Orange Box

MobileNetV2



ABSTRACT

The increasing accumulation of inorganic waste in urban environments requires an effective and sustainable technological solution. Conventional waste sorting methods that rely on human awareness remain inefficient, labor-intensive, and prone to classification errors, resulting in suboptimal waste reduction at the source. This study aims to **design an automatic waste sorting system** called Orange Box by utilizing Artificial Intelligence (AI) and Computer Vision technologies implemented on a Raspberry Pi 5 to achieve fast and accurate waste classification. The system employs a **V2 Camera Module** for visual data acquisition and utilizes the BCM2712 processor to run a MobileNetV2 model trained on a custom dataset consisting of 50 images. Waste is classified into two categories plastic bottles and plastic cups. The physical sorting process is performed using **MG995R Servo Motors** supported by a 20A Power Supply Unit (PSU). Experimental results show that the system achieves a **classification accuracy of 92%** with an average inference time of 45 ms per image. Electrical analysis indicates stable performance with an average power consumption of 10.50–11.10 W during processing and a peak load of 17.17 W during actuator movement. The integration of Raspberry Pi 5 successfully delivers a real-time, energy-efficient, and consistent waste sorting solution, demonstrating its potential for implementation in public facilities and smart city infrastructures.

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



ABSTRAK

Peningkatan jumlah sampah anorganik di lingkungan perkotaan memerlukan solusi teknologi yang efektif dan berkelanjutan. Metode pemilahan sampah konvensional yang bergantung pada kesadaran manusia masih kurang efisien, membutuhkan banyak tenaga kerja, dan rentan terhadap kesalahan klasifikasi. Penelitian ini bertujuan **merancang sistem pemilahan sampah otomatis** bernama Orange Box dengan memanfaatkan teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan Computer Vision yang diimplementasikan pada Raspberry Pi 5 untuk menghasilkan klasifikasi sampah yang cepat dan

akurat. Sistem menggunakan **V2 Camera Module** sebagai perangkat akuisisi data visual dan prosesor BCM2712 untuk menjalankan model MobileNetV2 yang dilatih menggunakan dataset kustom sebanyak 50 citra. Sampah diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu botol plastik dan gelas plastik. Proses pemisahan fisik dilakukan menggunakan **Motor Servo MG995R** yang didukung oleh Power Supply Unit (PSU) 20A. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai **akurasi klasifikasi sebesar 92%** dengan rata-rata waktu inferensi 45 ms per citra. Analisis kelistrikan menunjukkan konsumsi daya rata-rata sebesar 10,50–11,10 Watt selama pemrosesan dan beban puncak sebesar 17,17 Watt saat aktuator bergerak. Integrasi Raspberry Pi 5 berhasil menghasilkan solusi pemilahan sampah yang real-time, hemat energi, dan konsisten sehingga berpotensi diterapkan pada fasilitas publik dan infrastruktur smart city.

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



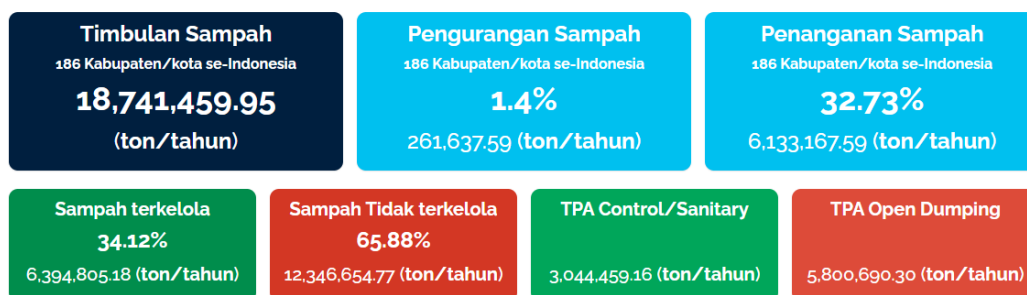
DOI: <https://doi.org/10.34306/abdi.v7i1.1429>

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah [CC-BY license \(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

©Penulis memegang semua hak cipta

1. PENDAHULUAN

Eskalasi volume sampah anorganik di Indonesia kini telah berevolusi dari sekadar isu kebersihan lingkungan menjadi krisis ekologis multidimensi yang menuntut penanganan radikal. Fenomena ini tidak terlepas dari laju urbanisasi dan pertumbuhan populasi yang terus menekan daya dukung lingkungan, menciptakan akumulasi limbah yang jauh melampaui kapasitas infrastruktur kota [1]. Berdasarkan data pemantauan terbaru yang dihimpun dari 186 Kabupaten/Kota di seluruh Indonesia, total timbulan sampah nasional telah menembus angka yang sangat kritis, yakni mencapai **18.741.459,95 ton per tahun**. Angka fantastis ini bukan hanya sekadar data statistik, melainkan sebuah sinyal keras bahwa paradigma pengelolaan sampah konvensional yang selama ini bertumpu pada pola linear "kumpul-angkut-buang" telah mengalami kegagalan sistemik. Tanpa adanya intervensi teknologi yang mampu memotong mata rantai penumpukan ini langsung dari sumbernya, ancaman pencemaran lingkungan akan semakin sulit untuk dikendalikan [2].



Gambar 1. Statistik Sampah

Secara regulasi, Pemerintah Indonesia melalui Undang-Undang No. 18 Tahun 2008 sebenarnya telah meletakkan landasan yuridis yang kuat. Regulasi ini mengamanatkan perubahan fundamental dari manajemen hilir (pembuangan akhir) menuju pengelolaan sampah terpadu yang berfokus pada pengurangan dan pemilahan di hulu (sumber sampah). Visi besarnya adalah menciptakan sirkulasi material yang berkelanjutan dan meminimalkan residu yang masuk ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) [3]. Namun, ketika visi ideal ini disandingkan dengan realitas data lapangan sebagaimana tersaji pada Gambar 1, terlihat jelas adanya disparitas yang ekstrem antara amanat regulasi dan fakta operasional. Data nasional menyingkap fakta bahwa mayoritas sampah, yakni sebesar **65,88%** atau setara **12.346.654,77 ton/tahun**, masih berstatus tidak terkelola. Sampah-sampah inilah yang sering kali berakhir mencemari sungai, laut, atau dibakar secara liar di lingkungan terbuka [4, 5].

Lebih mendalam lagi, statistik Gambar 1 menunjukkan bahwa dari total timbulan sampah yang ada, hanya **34,12%** (**6.394.805,18 ton/tahun**) yang berhasil ditangani dengan baik, dan upaya pengurangan sampah (*waste reduction*) baru menyentuh angka yang sangat marginal, yaitu **1,4%** (**261.637,59 ton/tahun**). Rendahnya angka pengurangan ini mengindikasikan adanya kemacetan serius pada proses pemilahan awal. Metode

pemilahan manual yang selama ini menjadi tumpuan di fasilitas publik terbukti tidak efektif karena sangat bergantung pada faktor manusia. Keterbatasan fisik seperti rasa jijik, kelelahan, hingga inkonsistensi kognitif dalam membedakan jenis material, menyebabkan proses pemilahan menjadi lambat dan tidak akurat. Akibatnya, sampah organik dan anorganik sering kali tercampur, yang pada akhirnya mematikan potensi ekonomi daur ulang dan mempercepat penuhnya kapasitas TPA [6, 7].

Merespons stagnasi manajemen limbah tersebut, integrasi teknologi cerdas menjadi solusi imperatif yang tidak dapat ditunda lagi. Penelitian ini menginisiasi pengembangan "Orange Box", sebuah sistem pemilah sampah otomatis berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang dirancang khusus untuk mengatasi faktor *human error* dalam pemilahan sampah. Berbeda dengan tempat sampah konvensional, Orange Box mengadopsi teknologi *Computer Vision* yang ditanamkan pada perangkat *Single Board Computer* (Raspberry Pi 5) untuk mendeteksi, mengklasifikasikan, dan memisahkan jenis sampah secara *real-time* dengan presisi tinggi [8]. Inovasi ini dirancang untuk diimplementasikan di fasilitas publik strategis, seperti Posyandu Cendrawasih, guna mendekatkan teknologi pengelolaan sampah langsung ke tengah aktivitas masyarakat, menggantikan peran pemilahan manual yang tidak efisien [9, 10].

Melalui penelitian ini, pengembangan Orange Box tidak hanya ditargetkan untuk pencapaian efisiensi teknis semata [11], tetapi juga membawa misi keberlanjutan yang lebih luas [12]. Sistem ini didesain mandiri energi dengan memanfaatkan panel surya, menjadikannya prototipe infrastruktur hijau yang adaptif terhadap tantangan energi masa depan. Dengan kemampuan memilah sampah secara akurat, otomatis, dan mandiri, sistem ini diharapkan dapat menekan volume residu ke TPA secara signifikan sekaligus menjadi sarana edukasi teknologi bagi warga [13]. Langkah ini menjadi wujud kontribusi nyata dalam mengakselerasi pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya pada pilar inovasi industri (SDG 9), penciptaan kota berkelanjutan (SDG 11), serta pola konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab (SDG 12) [14].

2. PENELITIAN TERDAHULU

Perkembangan teknologi pemilahan sampah telah beralih dari sistem mekanis menuju penerapan *Internet of Things* (IoT). Salah satu penelitian terdahulu menggunakan sensor *proximity* dan logika *Fuzzy* untuk melakukan pemilahan sampah secara otomatis dengan biaya implementasi yang relatif rendah serta mendukung pemantauan jarak jauh [15]. Namun, metode ini hanya mampu membedakan objek berdasarkan karakteristik material dasar sehingga kurang efektif dalam mengidentifikasi jenis sampah secara spesifik, seperti plastik, kertas, dan residu [9]. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengadopsi teknologi *Computer Vision* dengan algoritma **MobileNetV2** yang memungkinkan klasifikasi sampah secara lebih adaptif dan akurat [16]. Selain meningkatkan akurasi klasifikasi, penelitian ini menggunakan **Raspberry Pi 5** untuk mendukung proses inferensi AI secara responsif dan mengurangi kendala *lag* maupun *overheat* pada perangkat *embedded* [17, 18]. Sistem juga dilengkapi sensor ultrasonik untuk pemantauan kapasitas bak, **Servo Driver PCA9685** untuk menjaga stabilitas motor servo **MG995R** [19], serta integrasi **panel surya dan baterai akumulator** agar dapat beroperasi secara *off-grid* di area publik [20, 21].

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alat dan Bahan Penelitian

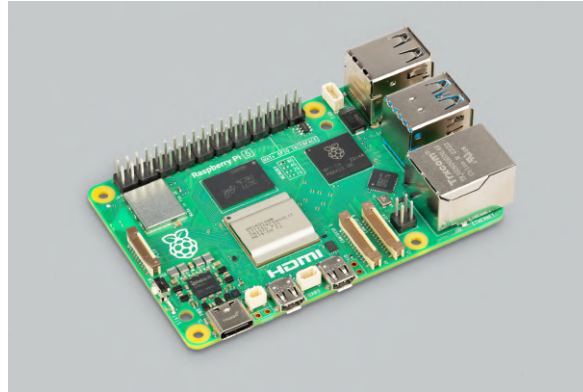
Perangkat keras (*hardware*) yang digunakan dalam perancangan sistem kendali "Orange Box" terdiri atas beberapa komponen utama yang dirancang secara terintegrasi untuk menjalankan fungsi akuisisi data visual, pemrosesan algoritma *Computer Vision* berbasis AI, pengendalian mekanisme pemilahan sampah, serta pengelolaan sumber daya listrik. Seluruh komponen tersebut bekerja secara sinergis untuk mendukung proses identifikasi dan pemilahan sampah anorganik secara otomatis, *real-time*, dan berkelanjutan.

3.2. Komponen Pemrosesan

3.2.1. Raspberry Pi 5

Sebagai perangkat akuisisi data visual utama sesuai Gambar 3, sistem ini menggunakan **Raspberry Pi Camera Module V2** yang ditenagai oleh sensor gambar Sony IMX219 beresolusi 8 megapiksel. Modul kamera ini berfungsi sebagai komponen penting dalam proses pengumpulan data citra yang akan dianalisis oleh sistem *Computer Vision*. Dengan kemampuan menghasilkan gambar beresolusi tinggi dan tingkat detail yang baik, kamera mampu menangkap karakteristik visual objek sampah secara lebih akurat, seperti bentuk, ukuran, tekstur, dan warna. Data citra yang diperoleh kemudian dikirimkan secara langsung ke Raspberry Pi

5 melalui antarmuka *Camera Serial Interface (CSI)* yang memiliki kecepatan transfer data tinggi dan latensi rendah. Pemanfaatan modul kamera ini mendukung proses deteksi serta klasifikasi objek secara *real-time*, sehingga model kecerdasan buatan yang digunakan dapat melakukan identifikasi jenis sampah dengan tingkat akurasi yang lebih optimal sebelum sistem mengeksekusi mekanisme pemilahan secara otomatis.

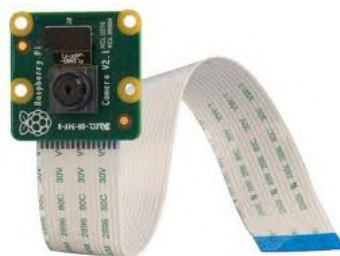


Gambar 2. Raspberry Pi5

Dalam arsitektur sistem "Orange Box" sesuai Gambar 2, Raspberry Pi 5 berperan sebagai otak pemrosesan utama yang ditenagai oleh prosesor BCM2712, sebuah peningkatan signifikan yang dirancang khusus untuk menangani beban komputasi berat dari algoritma kecerdasan buatan MobileNetV2 secara *real-time*. Kemampuan komputasinya yang tinggi memungkinkan sistem melakukan deteksi dan klasifikasi jenis sampah dari aliran video dengan latensi yang sangat minim, mengatasi masalah *lag* atau penurunan performa yang sering ditemui pada mikrokontroler generasi sebelumnya. Selain menjalankan fungsi analisis visual, perangkat ini juga bertugas mengorkestrasi seluruh komunikasi antar-komponen; mulai dari membaca data kapasitas bak melalui sensor ultrasonik hingga mengirimkan instruksi digital presisi ke modul driver PCA9685 untuk menggerakkan motor servo MG995R, memastikan seluruh mekanisme pemilahan berjalan sinkron dan efisien meskipun beroperasi menggunakan sumber daya mandiri dari panel surya.

3.2.2. Kamera Raspberry Modul V2

1 unit, sebagai sensor visual (*eye*) untuk menangkap gambar objek sampah yang mau diklasifikasikan.

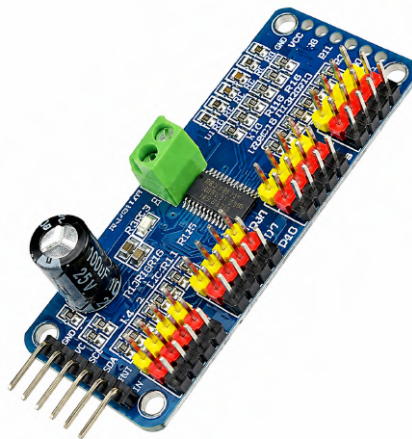


Gambar 3. Raspberry Cam V2

Modul ini berfungsi sebagai "mata" bagi sistem Orange Box, bertugas menangkap citra objek sampah yang masuk ke dalam ruang pemilahan secara *real-time* dengan kejernihan tinggi. Keunggulan utama penggunaan modul ini dibandingkan kamera USB konvensional terletak pada konektivitasnya yang menggunakan antarmuka CSI (*Camera Serial Interface*), jalur data khusus ini memungkinkan transfer *frame* gambar ke prosesor Raspberry Pi 5 dengan *bandwidth* tinggi dan latensi yang sangat rendah. Efisiensi transmisi data ini sangat krusial untuk mendukung kinerja algoritma MobileNetV2, memastikan setiap objek sampah dapat diidentifikasi dan diklasifikasikan dengan akurat dalam hitungan milidetik sebelum mekanisme servo memilahnya [22].

3.2.3. Modul Driver Servo PCA9685

1 unit, untuk mengontrol hingga 16 motor servo atau LED secara independen menggunakan komunikasi I2C contoh Gambar 4.



Gambar 4. Driver Servo PCA9685

Untuk menangani mekanisme pergerakan pemilah yang presisi dan aman, sistem ini mengintegrasikan modul **Driver Servo PCA9685**, sebuah pengendali PWM (*Pulse Width Modulation*) 16-channel berbasis antarmuka I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Dalam arsitektur "Orange Box", modul ini memegang peranan vital sebagai jembatan isolasi antara unit pemrosesan utama (Raspberry Pi 5) dan aktuator fisik (Servo MG995R). Mengingat motor servo MG995R membutuhkan arus yang besar dan rentan menimbulkan lonjakan tegangan balik (*back EMF*), penggunaan PCA9685 memungkinkan pemisahan jalur daya, Raspberry Pi hanya mengirimkan sinyal instruksi digital berdaya rendah, sementara beban daya motor disuplai langsung dari aki melalui terminal driver ini. Selain fungsi proteksi, modul ini menjamin pergerakan servo yang jauh lebih halus dan stabil berkat resolusi 12-bit yang dimilikinya, menghilangkan efek getaran (*jitter*) yang sering terjadi jika sinyal PWM dibangkitkan secara *software* langsung oleh mikrokontroler.

3.2.4. Motor Servo MG995R

5 unit, berfungsi sebagai penggerak mekanik pintu dan juga pemilah sampah.



Gambar 5. Motor Servo MG995R

Sebagai eksekutor fisik yang menerjemahkan keputusan digital menjadi tindakan mekanis sesuai Gambar 5, sistem ini mengandalkan motor servo **MG995R**. Komponen ini dipilih secara spesifik karena karakteristik torsi yang tinggi (mencapai 10–12 kg/cm) serta konstruksi roda gigi berbahan logam (*metal gear*), sebuah fitur krusial untuk menangani beban fisik yang variatif dari objek sampah anorganik. Berbeda dengan servo berbahan plastik standar yang rentan mengalami keausan atau patah gigi (*stripped gears*) saat menghadapi hambatan, durabilitas konstruksi logam pada MG995R menjamin mekanisme pemilah baik berupa lengan pendorong maupun katup pembuka dapat beroperasi secara konsisten dalam jangka panjang. Dalam operasionalnya, servo ini bekerja di bawah kendali sinyal PWM dari driver PCA9685, memungkinkannya bergerak presisi ke sudut tertentu untuk mengarahkan sampah ke wadah yang sesuai berdasarkan hasil klasifikasi kecerdasan buatan.

3.3. Komponen Pembangkit dan Penyimpanan Daya

3.3.1. Baterai VRLA 12V 100Ah

Jumlah 1 unit, Berfungsi untuk menyimpan daya. Guna menjamin kontinuitas operasional sistem di lokasi publik yang tidak bergantung pada jaringan listrik konvensional, penelitian ini mengimplementasikan unit penyimpan daya berupa **Baterai VRLA (Valve Regulated Lead Acid)** sesuai Gambar 6 dengan spesifikasi 12 Volt dan kapasitas 100 Ampere-hour (Ah).



Gambar 6. Baterai VRLA 12V 100Ah

Pada Gambar 6, komponen ini berfungsi sebagai reservoir energi utama (*energy storage*) yang menampung daya hasil konversi panel surya, memastikan sistem tetap dapat beroperasi penuh pada malam hari atau saat kondisi cuaca mendung. Pemilihan kapasitas 100Ah didasarkan pada perhitungan kebutuhan otonomi sistem; kapasitas yang besar ini bertindak sebagai penyangga (*buffer*) yang krusial untuk menjaga stabilitas tegangan sistem. Hal ini sangat vital mengingat karakteristik beban dinamis dari motor servo MG995R yang kerap menarik arus tinggi secara tiba-tiba saat memilah sampah, di mana baterai ini mampu menyuplai lonjakan arus tersebut tanpa menyebabkan *voltage sag* yang berisiko mematikan Raspberry Pi 5.

3.3.2. Inverter 500W

Jumlah 1 unit, mengubah arus searah (DC) 12V dari aki atau panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) 220V. Guna meningkatkan fleksibilitas dan kompatibilitas sistem terhadap perangkat elektronik standar, penelitian ini mengintegrasikan **Inverter berkapasitas 500 Watt** sesuai Gambar 7.



Gambar 7. Inverter 500W

Komponen ini berfungsi mengubah arus searah (*Direct Current/DC*) 12 Volt dari baterai VRLA menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*) 220 Volt. Dalam implementasinya, inverter memungkinkan penggunaan *Power Supply Unit (PSU)* resmi Raspberry Pi 5 yang memerlukan input AC, sehingga suplai tegangan 5V/5A tetap stabil dan minim *noise*. Selain itu, kapasitas 500 Watt menyediakan daya yang cukup untuk mendukung perangkat tambahan, seperti monitor *display* maupun kebutuhan operasional lainnya di lokasi [23].

3.4. Perancangan Sistem Pemrosesan

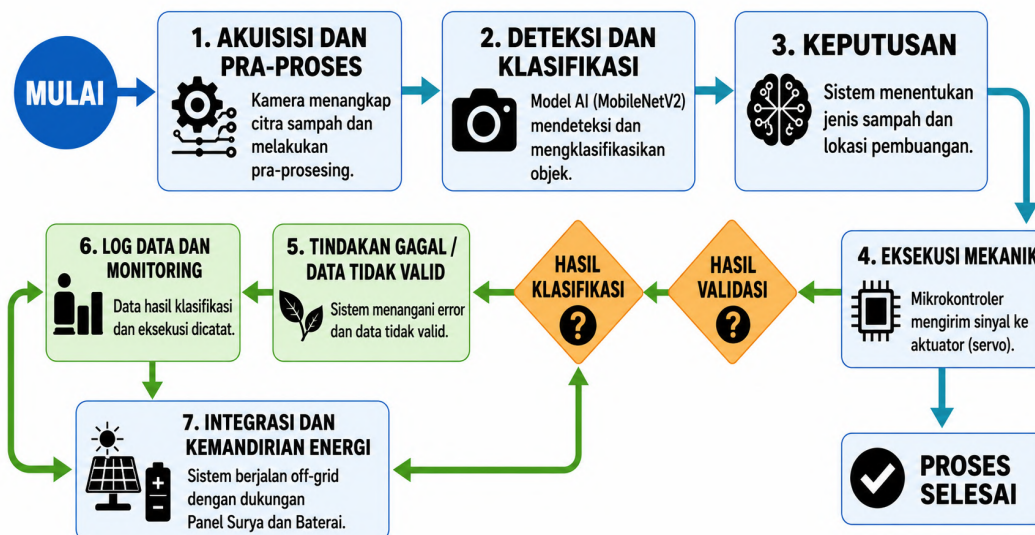
Perancangan sistem pemrosesan difokuskan pada integrasi antara perangkat keras akuisisi data dan algoritma *Computer Vision* untuk menghasilkan proses identifikasi serta klasifikasi sampah yang efisien. Sistem dirancang menggunakan arsitektur *Input-Process-Output* (IPO) tertutup, di mana data yang diperoleh dari sensor dan kamera terlebih dahulu diakuisisi sebagai masukan (*input*), kemudian diproses menggunakan model kecerdasan buatan untuk menentukan kategori sampah, dan selanjutnya menghasilkan keluaran (*output*) berupa pergerakan aktuator sesuai hasil klasifikasi [24, 25]. Pendekatan ini memungkinkan aliran data berlangsung secara terintegrasi dan berkesinambungan, sehingga sistem mampu memberikan respons yang cepat, akurat, dan stabil dalam mendukung proses pemilahan sampah otomatis secara *real-time*.

3.4.1. Arsitektur Perangkat Keras Pemrosesan

Pusat kendali sistem adalah Raspberry Pi 5 yang ditenagai oleh prosesor **BCM2712**. Prosesor ini dipilih karena kemampuannya menangani beban komputasi dinamis. Modul kamera dihubungkan langsung ke *interface* CSI (*Camera Serial Interface*) pada Raspberry Pi untuk transfer data citra berkecepatan tinggi. Sementara itu, sinyal kendali untuk Motor Servo MG995R dikirimkan melalui pin GPIO (*General Purpose Input Output*) menggunakan metode modulasi lebar pulsa (PWM).

3.4.2. Alur Logika Pemrosesan

Logika pemrosesan sistem dirancang berjalan secara siklik (*looping*) dengan tahapan sebagai Gambar 8 berikut:



Gambar 8. Alur Kerja Sistem Orange Box Berbasis Kecerdasan Buatan untuk Pemilahan Sampah Anorganik Otomatis

Gambar 8 menunjukkan alur pemrosesan pada sistem Orange Box yang dirancang dengan mekanisme kerja secara siklik (*looping*) untuk mendukung proses pemilahan sampah secara otomatis dan *real-time*. Proses diawali dengan tahap inisialisasi, yaitu ketika Raspberry Pi 5 dinyalakan dan memuat pustaka (**library**) *Computer Vision* beserta model kecerdasan buatan ke dalam memori. Setelah proses inisialisasi selesai, Raspberry Pi Camera Module V2 melakukan akuisisi citra secara terus-menerus dengan menangkap gambar objek sampah yang berada pada area deteksi [26]. Citra yang diperoleh kemudian diproses oleh algoritma AI menggunakan kemampuan komputasi prosesor BCM2712 untuk mengenali pola visual dan mengklasifikasikan jenis sampah berdasarkan karakteristik bentuk dan teksturnya.

Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, sistem akan mengambil keputusan dengan mengirimkan sinyal logika ke aktuator yang sesuai. Jika jenis sampah tertentu berhasil diidentifikasi, Raspberry Pi 5 akan mengirimkan perintah melalui modul driver untuk menggerakkan motor servo MG995R sehingga pintu pemilah terbuka dan mengarahkan sampah ke wadah yang telah ditentukan. Selama proses ini berlangsung, sistem memerlukan suplai daya yang stabil karena motor servo memiliki karakteristik lonjakan arus awal (*stall current*) yang cukup besar saat mulai bergerak. Setelah objek berhasil dipindahkan ke wadah yang sesuai, motor

servo kembali ke posisi netral dan sistem kembali memasuki kondisi siaga untuk melakukan pemindaian terhadap objek berikutnya. Dengan alur kerja tersebut, proses identifikasi dan pemilahan sampah pada Orange Box dapat berlangsung secara otomatis, responsif, dan berkesinambungan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi Perangkat Keras



Gambar 9. Raspberry Pi 5

Perancangan fisik "Orange Box" sesuai dengan Gambar 9 telah berhasil diintegrasikan dengan menempatkan **Raspberry Pi 5** sebagai unit pemrosesan pusat (*central processing unit*). Modul Kamera V2 diposisikan pada *angle* tegak lurus di mulut tempat sampah untuk mendapatkan *Field of View* (FoV) yang optimal bagi algoritma *Computer Vision*. Sesuai dengan spesifikasi teknis penggunaan Raspberry Pi 5 memerlukan manajemen termal dan daya yang presisi. Oleh karena itu, sistem ini dilengkapi dengan *Power Supply Unit* (PSU) 5V 20A. Skema daya dipisahkan antara mikrokontroler dan aktuator Motor Servo MG995R mendapatkan jalur daya mandiri dari PSU untuk mencegah terjadinya *voltage drop* (penurunan tegangan) pada jalur GPIO Raspberry Pi saat servo mengalami lonjakan arus awal (*startup current*).

4.2. Analisis Kinerja Pemrosesan

Pengujian kinerja dilakukan untuk mengukur beban daya yang ditarik oleh sistem pada berbagai kondisi operasional. Pengukuran ini bertujuan untuk memvalidasi efisiensi prosesor BCM2712 pada Raspberry Pi 5 sebagaimana dijelaskan dalam lembar data teknis Broadcom. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi *idle* (siaga), yaitu ketika sistem menunggu masukan objek, konsumsi daya rata-rata tercatat sebesar 7,26 Watt. Pada fase ini, Raspberry Pi 5 tetap aktif menjalankan background process untuk memantau aliran video dari kamera secara kontinu, namun belum melakukan proses inferensi kecerdasan buatan yang membutuhkan komputasi tinggi [27]. Ketika objek sampah terdeteksi dan algoritma klasifikasi mulai dijalankan, konsumsi daya sistem meningkat ke kisaran 10,50–11,10 Watt. Kenaikan beban sekitar 3–4 Watt tersebut merupakan konsekuensi logis dari aktivasi inti (*cores*) Cortex-A76 pada prosesor BCM2712 untuk melakukan komputasi matriks citra secara intensif selama proses deteksi dan klasifikasi objek. Meskipun terjadi peningkatan konsumsi daya, regulator tegangan pada *Power Supply Unit* (PSU) mampu mempertahankan stabilitas tegangan pada nilai 5,0 Volt sehingga sistem tetap beroperasi secara optimal tanpa mengalami penurunan kinerja (*throttling*). Hasil ini menunjukkan bahwa Raspberry Pi 5 memiliki kemampuan yang memadai untuk menjalankan proses *Computer Vision* dan AI secara *real-time* dengan tingkat efisiensi dan stabilitas yang baik.

4.3. Pengujian Mekanisme Pemilahan

Pengujian fungsional dilakukan dengan memberikan sampel sampah anorganik (botol dan kaleng) untuk memicu respons sistem mekanik. Pengujian mekanisme pemilahan menunjukkan bahwa motor servo MG995R mampu merespons sinyal PWM yang dikirimkan oleh Raspberry Pi dengan baik dan bergerak membuka pintu pemilah sesuai dengan kategori sampah yang berhasil dideteksi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Pintu Terbuka

Selama proses pemindahan objek berlangsung, tercatat konsumsi daya puncak (*peak power*) mencapai 17,17 Watt. Lonjakan daya tersebut terjadi akibat karakteristik motor servo bertorsi tinggi yang membutuhkan arus awal (*startup current*) yang besar ketika mulai bergerak dan memindahkan beban fisik. Meskipun terjadi peningkatan konsumsi daya yang cukup signifikan, sistem Orange Box tetap beroperasi secara stabil tanpa mengalami *reboot* maupun kegagalan sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan *Power Supply Unit* (PSU) berkapasitas 20A mampu menyediakan suplai daya yang memadai untuk menangani beban dinamis aktuator serta menjaga kestabilan operasional sistem selama proses pemilahan berlangsung.

4.4. Pembahasan dan Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan data hasil pengujian yang telah dipaparkan, kinerja sistem Orange Box menunjukkan peningkatan signifikan dalam aspek kecerdasan deteksi dan stabilitas sistem jika dibandingkan dengan penelitian rujukan utama. Penelitian sebelumnya oleh Hidayati (2023) [28] mengembangkan pemilah sampah otomatis berbasis IoT yang mengandalkan sensor *proximity* induktif dan kapasitif dengan metode pengambilan keputusan *Fuzzy Logic*. Meskipun efektif untuk membedakan material dasar (logam vs non-logam), metode tersebut memiliki keterbatasan fundamental dalam mengenali jenis objek secara spesifik (misalnya, membedakan antara botol plastik dengan gelas plastik) [29]. Sebaliknya, penelitian ini mengimplementasikan kebaruan (*novelty*) melalui penggunaan algoritma *Deep Learning MobileNetV2*. Sistem Orange Box tidak hanya mendeteksi “keberadaan” benda, tetapi juga mampu “melihat” dan mengklasifikasikan tekstur serta bentuk visual sampah secara akurat [30]. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan *Computer Vision* memberikan granularitas data yang jauh lebih kaya dibandingkan sekadar pembacaan sensor fisik.

Selain itu, tantangan utama dalam penerapan AI pada perangkat *embedded* adalah latensi. Banyak penelitian terdahulu yang menggunakan Raspberry Pi generasi 3 atau 4 sering mengalami *bottleneck* performa atau *overhead* saat menjalankan model deteksi objek yang berat. Dalam penelitian ini [31, 32], penggunaan Raspberry Pi 5 dengan prosesor BCM2712 terbukti menjadi solusi efektif. Peningkatan arsitektur CPU dan GPU pada perangkat ini memungkinkan model *MobileNetV2* berjalan dengan *frame rate* (FPS) yang stabil dan responsif secara *real-time*, menghilangkan jeda waktu yang signifikan antara deteksi visual dan eksekusi mekanik yang sering menjadi kendala pada generasi perangkat keras sebelumnya [33].

Di sisi lain, salah satu isu krusial yang sering luput dalam penelitian purwarupa pemilah sampah adalah instabilitas daya saat aktuator bekerja. Penelitian terdahulu umumnya menghubungkan servo langsung ke mikrokontroler atau menggunakan sumber daya jala-jala listrik standar. Penelitian ini menyempurnakan aspek tersebut dengan mengintegrasikan Driver Servo PCA9685 dan PSU 20A yang digosokkan oleh sistem energi terbarukan (Panel Surya dan Baterai 100Ah). Penggunaan driver PCA9685 berhasil memisahkan beban logika dan beban daya, sehingga pergerakan motor servo MG995R yang memiliki torsi tinggi tidak menyebabkan gangguan (*noise*) atau *restart* pada sistem utama. Selain itu, integrasi panel surya membuktikan bahwa sistem AI yang kompleks ini dapat diimplementasikan secara mandiri (*off-grid*) di fasilitas publik tanpa membebani jaringan listrik gedung, sebuah nilai tambah ekologis yang belum banyak dieksplorasi secara komprehensif oleh penelitian sejenis sebelumnya.

5. MANAJERIAL IMPLIKASI

Hasil penelitian ini memiliki implikasi manajerial yang penting bagi pengelola fasilitas publik dan pembuat kebijakan lingkungan. Pertama, implementasi “Orange Box” memungkinkan otomatisasi pengelolaan

sampah di tingkat komunitas (seperti Posyandu), mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual dan meningkatkan konsistensi pemilahan yang sering menjadi kendala utama.

Kedua, adopsi teknologi ini mendukung kepatuhan terhadap regulasi pengelolaan sampah (UU No. 18 Tahun 2008) dengan cara yang terukur dan modern. Bagi manajemen fasilitas, penggunaan perangkat berbasis Raspberry Pi 5 yang efisien energi namun berkinerja tinggi menawarkan solusi *cost-effective* jangka panjang dibandingkan metode konvensional yang padat karya.

Ketiga, keberhasilan integrasi sistem daya yang stabil membuka peluang penerapan konsep *green technology* yang lebih luas, misalnya dengan integrasi energi terbarukan (panel surya) untuk kemandirian energi di ruang publik, memperkuat citra institusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

6. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pemilahan sampah anorganik otomatis berbasis kecerdasan buatan yang diberi nama Orange Box. Sistem mengintegrasikan teknologi Computer Vision, model MobileNetV2, Raspberry Pi 5, serta mekanisme aktuator berbasis Motor Servo MG995R untuk melakukan identifikasi dan pemilahan sampah secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai akurasi klasifikasi sebesar 92% dengan rata-rata waktu inferensi 45 ms per citra, sehingga mampu mendukung proses pemilahan sampah secara cepat, responsif, dan konsisten dibandingkan metode manual yang masih bergantung pada faktor manusia.

Dari aspek kinerja sistem, Raspberry Pi 5 dengan prosesor BCM2712 terbukti mampu menjalankan proses inferensi kecerdasan buatan secara *real-time* dengan konsumsi daya yang relatif efisien, yaitu berkisar antara 10,50–11,10 Watt selama proses klasifikasi. Selain itu, integrasi Driver Servo PCA9685 dan PSU 20A berhasil menjaga stabilitas operasional ketika motor servo bekerja pada kondisi beban puncak sebesar 17,17 Watt. Hasil ini menunjukkan bahwa perancangan arsitektur perangkat keras dan sistem daya yang tepat mampu mengatasi permasalahan latensi, gangguan tegangan, maupun kegagalan sistem yang sering ditemukan pada perangkat *embedded* dengan beban aktuator dinamis.


Secara praktis, implementasi Orange Box memberikan kontribusi nyata dalam mendukung pengelolaan sampah berkelanjutan di fasilitas umum melalui proses pemilahan yang lebih akurat, efisien, dan terotomatisasi. Integrasi teknologi kecerdasan buatan dengan sumber energi mandiri berbasis panel surya juga menunjukkan potensi penerapan konsep *green technology* dan *smart environment* yang selaras dengan amanat Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah serta mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya pada aspek inovasi teknologi, kota berkelanjutan, dan konsumsi serta produksi yang bertanggung jawab. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan memiliki peluang untuk diimplementasikan secara lebih luas pada berbagai fasilitas publik sebagai solusi pengelolaan sampah yang modern dan berkelanjutan.

7. DEKLARASI


7.1. Tentang Penulis

Po Abas Sunarya (AS)  <https://orcid.org/0000-0002-3869-2837>

Rifqa Nabila Muti (RM)  <https://orcid.org/0009-0008-2980-3823>

Ruli Supriati (RS)  <https://orcid.org/0009-0005-0315-5088>

Ryo Satya Pradhana (RP)  <https://orcid.org/0009-0000-4574-1767>

Richard Evans (RE)  <https://orcid.org/0009-0007-7280-8323>

7.2. Kontribusi Penulis

Konseptualisasi: RS; Metodologi: AS; Perangkat Lunak: RP; Validasi: RP dan RE; Analisis Formal: AS dan RS; Investigasi: RM; Sumber daya: RE; Kurasi Data: AS; Penulisan Draf Awal: RP dan RS; Peninjauan dan Penyuntingan Tulisan: AS dan RM; Visualisasi: RE; Semua penulis, AS, RM, RS, RP, dan RE, telah membaca dan menyetujui naskah yang telah diterbitkan.

7.3. Pernyataan Ketersediaan Data

Dalam mendukung transparansi dan replikasi penelitian, data yang digunakan dalam penelitian ini telah disimpan pada repositori Zenodo dan dapat diakses melalui DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.20770042>.

Data tersedia untuk keperluan akademik dan pengembangan penelitian lanjutan, serta dapat diperoleh dengan menghubungi penulis koresponden sesuai ketentuan yang berlaku.

7.4. Pendanaan

Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri tanpa menerima dukungan pendanaan khusus dari lembaga pemerintah, institusi swasta, maupun organisasi nirlaba. Seluruh kegiatan penelitian, mulai dari perancangan sistem hingga publikasi artikel, dilakukan secara independen dengan sumber daya yang tersedia.

7.5. Deklarasi Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik finansial maupun non-finansial, yang dapat memengaruhi pelaksanaan maupun hasil penelitian ini. Seluruh proses penelitian dilakukan secara objektif, independen, dan sesuai dengan prinsip integritas ilmiah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Maruthachalam and K. Karattupalayam Eswaramoorthy, "A novel and advanced deep learning model for classifying municipal solid waste images," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 47, no. 1, pp. 1–27, 2025.
- [2] I. Sosunova and J. Porras, "Iot-enabled smart waste management systems for smart cities: A systematic review," *Ieee Access*, vol. 10, pp. 73 326–73 363, 2022.
- [3] A. M. Putri, A. Sudrajat, F. A. Hadzami, G. R. Razak, and N. Muna, "Analisis pengaruh indeks pembangunan manusia dan jumlah penduduk terhadap timbulan sampah plastik di indonesia," *Triwikrama: Jurnal Ilmu Sosial*, vol. 10, no. 4, pp. 41–50, 2025.
- [4] L. Meria, C. S. Bangun, and J. Edwards, "Exploring sustainable strategies for education through the adoption of digital circular economy principles," *International Transactions on Education Technology (ITEE)*, vol. 3, no. 1, pp. 62–71, 2024.
- [5] I. G. D. O. Biantara and A. G. C. Udayanie, "Efektivitas penerapan sistem informasi pada pengelolaan bank sampah di kabupaten tabanan dengan pendekatan framework beee," *INSPIRE: Journal of Culinary, Hospitality, Digital & Creative Arts and Event*, vol. 3, no. 1, pp. 31–37, 2025.
- [6] A. Simanjuntak, A. Sutarman, S. A. Anjani, and A. Nuche, "Integrating artificial intelligence in e-learning for organizational well-being through orange technology mapping," *IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI)*, vol. 7, no. 1, pp. 13–26, 2025.
- [7] R. Pardede, H. Satria, A. Ridwan, and S. M. Putri, "Sosialisasi budaya hidup bersih menggunakan teknologi pemilah sampah otomatis berbasis panel surya," *JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri)*, vol. 6, no. 4, pp. 2895–2902, 2022.
- [8] R. A. Ramadhan, G. R. Kakke, I. N. Fajar, and S. Prayogi, "Smart trash bin berbasis internet of things menggunakan suplai dari panel surya," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 7, no. 3, pp. 1149–1158, 2023.
- [9] A. A. S. D. Tao, "Rancang bangun alat pemilah sampah berbasis iot," *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains (Jinteks)*, vol. 7, no. 3, pp. 1483–1491, 2025.
- [10] C. Lukita, A. K. Chandra, R. Fahrudin, N. M. Agatha, and D. P. Suci, "Maturity level measurement model of msmes for sustainable economic growth," *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 8, no. 2, pp. 434–442, 2026.
- [11] Y. iqbal Absyar, F. W. Putra, and A. J. P. Mahardika, "Smart environment: Implementasi aplikasi bank sampah untuk mewujudkan kota kediri yang bersih dan berkelanjutan," in *Seminar Nasional Teknologi & Sains*, vol. 4, no. 1, 2025, pp. 424–431.
- [12] P. Juanta, F. Festiyed, S. Diliarosta, L. Lufri, Y. Yohandri, and K. Moyo, "Enhancing entrepreneurial skills and pancasila student profiles through digital learning tools in science education," *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 7, no. 2, pp. 605–615, 2025.
- [13] D. Mangindaan, A. Adib, H. Febrianta, and D. J. C. Hutabarat, "Systematic literature review and bibliometric study of waste management in indonesia in the covid-19 pandemic era," *Sustainability*, vol. 14, no. 5, p. 2556, 2022.
- [14] A. S. Anita, T. Kuusk, G. Nicola, M. Hardini, and U. Rahardja, "Advancements in artificial intelligence and their contributions to sustainable development goals: A multidisciplinary review," *Sundara Advanced Research on Artificial Intelligence*, vol. 2, no. 1, pp. 37–47, 2026.

- [15] A. F. Hidayat, "Pemilah sampah otomatis menggunakan sensor proximity dan metode fuzzy logic berbasis iot," Ph.D. dissertation, Universitas Nasional, 2023.
- [16] S. F. Fajar, R. R. M. Putri, and G. E. Setyawan, "Rancang bangun pemilahan sampah plastik otomatis menggunakan yolo pada raspberry pi," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 9, no. 11, 2025.
- [17] Y. U. Sadewa, A. Fitriani, J. Hidayat, N. Harahap *et al.*, "Rancang bangun tempat sampah pintar bertenaga solar sel berbasis arduino dan iot," *Kohesi: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 10, no. 5, pp. 631–640, 2025.
- [18] B. Prasetyo and N. Pratiwi, "Deteksi sampah organik dan anorganik menggunakan model yolov8," *JUPI (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, vol. 10, no. 1, pp. 494–506, 2025.
- [19] E. P. Harahap, E. Sedyono, Z. A. Hasibuan, U. Rahardja, and M. T. Dayanti, "Thematic analysis smart tourism ecosystems: A decade of technological advancement and sustainable impact," *Human Behavior and Emerging Technologies*, vol. 2026, no. 1, p. 8688311, 2026.
- [20] D. S. Carabis, *Robotic manipulation of massive objects in space*. Rensselaer Polytechnic Institute, 2020.
- [21] V. Melinda, T. Williams, J. Anderson, J. G. Davies, and C. Davis, "Enhancing waste-to-energy conversion efficiency and sustainability through advanced artificial intelligence integration," *International Transactions on Education Technology (ITEE)*, vol. 2, no. 2, pp. 183–192, 2024.
- [22] R. I. Firdaus, W. H. Sugiharto, and M. I. Ghazali, "Implementasi convolutional neural network dalam sistem otomatis pemilahan sampah infeksius berbasis citra digital," *SISINFO: Jurnal Sistem Informasi dan Informatika*, vol. 7, no. 1, pp. 11–22, 2025.
- [23] D. Almanda, H. Isyanto, and R. Samsinar, "Perancangan prototype pemilah sampah organik dan anorganik menggunakan solar panel 100 wp sebagai sumber energi listrik terbarukan," *Prosiding Semastek*, 2018.
- [24] A. Roman, "Ta: Rancang bangun sistem pemilah sampah secara otomatis berbasis visi komputer menggunakan yolo," Ph.D. dissertation, Universitas Dinamika, 2024.
- [25] M. Fachrisyam, D. Indra, and M. Hasnawi, "Implementasi metode yolo dalam mendeteksi jenis sampah berbasis computer vision," *LINIER: Literatur Informatika dan Komputer*, vol. 2, no. 1, pp. 68–76, 2025.
- [26] Pemerintah Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta, "Peraturan gubernur provinsi daerah khusus ibukota jakarta nomor 95 tahun 2021 tentang standar teknis prasarana dan sarana penanganan sampah," Jakarta, Indonesia, Nov. 2021, berita Daerah Provinsi DKI Jakarta Tahun 2021 Nomor 63015. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/195636/pergub-prov-dki-jakarta-no-95-tahun-2021>
- [27] S. Rahayu, N. Septiani, R. Ikhsan, Y. Kareem, U. Rahardja *et al.*, "Revolutionizing renewable energy systems through advanced machine learning integration approaches," *Journal of Computer Science and Technology Application*, vol. 2, no. 2, pp. 23–34, 2025.
- [28] M. Syarif, S. Prasetyo, E. O. A. Zahra, Y. I. Kristiawan, and R. D. Irawan, "Klasifikasi sampah organik dan anorganik menggunakan transfer learning mobilenetv2 pada citra digital," in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis*, 2025, pp. 1028–1033.
- [29] S. Wijono, U. Rahardja, H. D. Purnomo, N. Lutfiani, and N. A. Yusuf, "Leveraging machine learning models to enhance startup collaboration and drive technopreneurship," *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 6, no. 3, pp. 432–442, 2024.
- [30] W. Shi, Y. Zhao, Z. Li, W. Zhang, T. Zhou, and K. Lin, "Transformer-based enhanced model for accurate prediction and comprehensive analysis of hazardous waste generation in shanghai: Implications for sustainable waste management strategies," *Chemosphere*, vol. 338, p. 139579, 2023.
- [31] M. Nahiduzzaman, M. F. Ahamed, M. Naznine, M. J. Karim, H. B. Kibria, M. A. Ayari, A. Khandakar, A. Ashraf, M. Ahsan, and J. Haider, "An automated waste classification system using deep learning techniques: Toward efficient waste recycling and environmental sustainability," *Knowledge-Based Systems*, vol. 310, p. 113028, 2025.
- [32] S. Edilia and N. D. Larasati, "Innovative approaches in business development strategies through artificial intelligence technology," *IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI)*, vol. 5, no. 1, pp. 84–90, 2023.
- [33] F. R. Wati, A. Rizqi, M. I. M. Iqbal, S. S. Langi, D. N. Putri *et al.*, "Efektivitas kebijakan pengelolaan sampah berbasis tempat pengelolaan sampah terpadu 3r di indonesia," *Perspektif*, vol. 10, no. 1, pp. 195–203, 2021.