

Pemanfaatan Teknologi IoT pada Smart Trash Bin untuk Pemilahan dan Monitoring Sampah

1st Mohammad Rizki Ramdhan
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
rizkiramdhan@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Meta Kallista
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
metakallista@telkomuniversity.ac.id

3rd Ig. Prasetya Dwi Wibawa
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
prasdwiwibawa@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Indonesia menghadapi tantangan serius dalam pengelolaan sampah, dengan jutaan ton sampah dihasilkan setiap hari. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemilahan sampah otomatis berbasis teknologi machine learning di lingkungan kampus, khususnya di Telkom University. Metode yang digunakan melibatkan pengembangan sistem perangkat keras dan perangkat lunak yang mengintegrasikan Raspberry Pi, kamera, dan sensor ultrasonik untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis sampah secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini berhasil meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam pemilahan sampah, dengan tingkat akurasi deteksi yang tinggi dan respons cepat terhadap perubahan tingkat sampah. Kesimpulan utama adalah bahwa teknologi ini dapat menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan pengelolaan sampah yang lebih baik dan ramah lingkungan di kampus.

Kata kunci— Pengelolaan sampah, machine learning, pemilahan sampah otomatis, teknologi ramah lingkungan.

I. PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, menghadapi tantangan besar dalam pengelolaan sampah. Dengan populasi yang mencapai lebih dari 270 juta jiwa, Indonesia menghasilkan jutaan ton sampah setiap harinya, menjadikannya salah satu negara penghasil sampah terbesar di dunia [1]. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) [2], pada tahun 2022, Indonesia menghasilkan sedikitnya 36 juta ton timbunan sampah. Dari jumlah ini, sekitar 37% tidak dikelola sama sekali, menyebabkan dampak signifikan terhadap lingkungan. Penelitian yang dilakukan di berbagai kota di Indonesia pada tahun 2012 mengungkapkan bahwa sampah dikelola dengan berbagai cara: 69% diangkut dan ditimbun di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), 10% dikubur, 7% dikompos dan didaur ulang, 5% dibakar, dan 7% lainnya tidak dikelola [3]. Tingginya persentase sampah yang ditimbun di TPA menimbulkan masalah besar terkait kebutuhan lahan yang luas, yang semakin terbatas di kota-kota besar di Indonesia seiring meningkatnya jumlah penduduk [4]. Hal ini menunjukkan bahwa TPA, sebagai langkah terakhir dalam pengelolaan sampah, masih menjadi andalan meskipun menghadapi banyak kendala, terutama dalam hal efektivitas dan efisiensi.

Masalah pengelolaan sampah di Indonesia bukan hanya soal volume, tetapi juga terkait dengan jenis dan klasifikasi sampah yang kurang dipahami oleh masyarakat. Sampah didefinisikan sebagai bahan sisa yang tidak diinginkan setelah suatu proses selesai atau dihentikan [5]. Pertumbuhan populasi di kawasan perkotaan yang pesat telah menyebabkan peningkatan volume sampah, yang terdiri dari sampah organik, anorganik, dan bahkan sampah berbahaya (B3). Sampah organik, yang biodegradable, mudah terurai, sedangkan sampah anorganik, yang non-biodegradable, sulit untuk diuraikan. Sampah organik sebagian besar terdiri dari sisa makanan, kayu, dan sampah kebun, sementara sampah anorganik meliputi kaca, logam, dan debu [6]. Sayangnya, pemahaman masyarakat tentang kategori-kategori ini masih sangat kurang. Hal ini terlihat dari kondisi di tempat-tempat umum seperti di Telkom University, di mana sampah seringkali tercampur dan dibuang tidak sesuai dengan klasifikasinya.

Kondisi ini diperparah dengan minimnya kesadaran dan tanggung jawab civitas akademika dalam menjaga kebersihan lingkungan. Di Telkom University, meskipun telah disediakan tempat sampah yang ditandai dengan jenis sampah yang dapat dibuang ke dalamnya, masih saja terjadi pencampuran sampah yang mengganggu proses daur ulang. Misalnya, sampah plastik, kotak makanan berbahan styrofoam, dan kardus sering kali dibuang ke tempat sampah organik, begitu pula sebaliknya, sisa makanan dibuang ke tempat sampah non-organik. Selain itu, masalah lain adalah kebiasaan membuang sampah ke tempat sampah yang sudah penuh, menyebabkan sampah jatuh berserakan di sekitarnya atau bahkan dibuang di luar tempat sampah. Kondisi ini tidak hanya mengganggu estetika lingkungan universitas tetapi juga mempersulit proses pengelolaan sampah secara keseluruhan. Berdasarkan hasil pengamatan, survei telah dilakukan untuk memahami lebih dalam permasalahan ini dan merumuskan solusi yang tepat. Survei ini melibatkan 30 responden yang terdiri dari pengawas cleaning service, anggota *cleaning service*, mahasiswa, dan beberapa petugas keamanan di Telkom University. Hasil survei menunjukkan bahwa mayoritas responden berada dalam rentang usia 18-35 tahun, yang mendominasi dengan persentase 90%. Survei ini memperlihatkan bahwa 60% dari responden sangat sering melihat tempat sampah berisi sampah yang tidak sesuai dengan jenisnya, sementara 20% sering melihatnya, dan

16.7% jarang melihatnya. Temuan ini menunjukkan bahwa masalah pencampuran sampah merupakan hal yang sangat umum terjadi di lingkungan kampus.

Selain itu, 40% responden mengaku sering melihat tempat sampah penuh dan sampah berserakan di sekitarnya, sementara 36.7% melihatnya sering, dan hanya 23.3% yang jarang melihatnya. Hal ini menunjukkan bahwa masalah sampah yang meluap dari tempat sampah adalah pemandangan sehari-hari di Telkom University. Lebih lanjut, survei ini juga menunjukkan bahwa 53.3% responden tidak mengetahui tentang teknologi *machine learning*, sementara 46.7% lainnya mengetahui teknologi tersebut. Meskipun demikian, mayoritas responden setuju dengan penggunaan AI untuk pemilah sampah otomatis, dengan 42.9% responden sangat mendukung penerapan teknologi ini. Survei ini juga menunjukkan bahwa mayoritas responden (57.1%) sangat setuju dengan pentingnya fitur monitoring untuk memantau kapasitas tempat sampah, dan 35.7% lainnya mendukung penggunaan fitur ini. Hanya 7.1% yang memberikan skor 3 dalam hal pentingnya fitur ini. Selain itu, 85.7% responden menyatakan kesiapan mereka untuk menggunakan tempat sampah pintar, yang menunjukkan minat yang tinggi terhadap adopsi teknologi dalam pengelolaan sampah.

Masalah pengelolaan sampah di Telkom University merupakan cerminan dari masalah yang lebih besar di Indonesia. Tidak adanya pemahaman yang memadai tentang klasifikasi sampah dan rendahnya kesadaran masyarakat terhadap pentingnya pemilahan sampah berdampak negatif terhadap lingkungan. Sampah yang tidak dipilah dengan benar dan dibiarkan tercampur di TPA dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang serius. Sampah organik yang terdekomposisi menghasilkan gas metana, yang merupakan salah satu kontributor utama pemanasan global. Setiap kilogram sampah yang terdekomposisi dapat menghasilkan 0.5 m³ gas metana, yang kemudian menyebar dan dilepaskan ke atmosfer, berkontribusi pada penipisan lapisan ozon [8]. Selain dampak lingkungan, masalah pengelolaan sampah yang tidak efisien juga berdampak pada aspek ekonomi. Inefisiensi biaya dan sumber daya terjadi dalam proses pengangkutan sampah, di mana rute pengangkutan yang tidak optimal dan pengelolaan tenaga kerja yang tidak efisien mengakibatkan peningkatan biaya operasional. Selain itu, pengelolaan sampah yang tidak optimal juga meningkatkan biaya pemrosesan sampah di TPA, yang berdampak langsung pada biaya yang harus dikeluarkan oleh universitas [10].

Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan berbagai langkah strategis. Edukasi dan kesadaran masyarakat menjadi langkah awal yang sangat penting. Civitas akademika perlu diberikan pelatihan dan edukasi tentang pentingnya pemilahan sampah dan cara melakukannya dengan benar. Hal ini bisa dilakukan melalui seminar, workshop, dan kampanye kesadaran lingkungan yang intensif. Selain itu, fasilitas pengelolaan sampah yang memadai juga harus disediakan. Penambahan jumlah tempat sampah yang sesuai dengan jenis-jenis sampah di setiap sudut kampus sangat penting untuk mencegah terjadinya penumpukan sampah. Tempat sampah dengan desain yang memudahkan pemilahan juga

perlu disediakan, termasuk pengosongan yang dilakukan secara rutin dan teratur.

Penggunaan teknologi dalam pengelolaan sampah juga perlu ditingkatkan. Implementasi teknologi seperti sensor dan alat pemilah otomatis dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam pengelolaan sampah di Telkom University. Selain itu, pengembangan aplikasi pemantauan sampah yang dapat memantau kondisi tempat sampah secara real-time juga akan sangat membantu dalam memastikan bahwa tempat sampah tidak penuh dan dapat segera diambil tindakan jika diperlukan. Program edukasi dan kampanye kesadaran yang berkelanjutan juga sangat penting untuk memastikan keberhasilan pengelolaan sampah.

Pengelolaan sampah di Telkom University memerlukan solusi yang komprehensif dan berkelanjutan. Kombinasi antara edukasi, penggunaan teknologi, dan kebijakan yang ketat akan sangat penting dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah di kampus dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Solusi sistem yang lebih modern dan terintegrasi, seperti implementasi sistem pemilahan sampah otomatis, pengembangan aplikasi pemantauan, dan penyediaan tempat sampah pintar, akan membantu universitas dalam mencapai tujuan tersebut.

II. KAJIAN TEORI

A. Spesifikasi Produk

Spesifikasi produk tempat sampah di Indonesia telah diatur oleh regulasi yang ketat, seperti yang tercantum dalam Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah. Tempat sampah harus memenuhi beberapa kriteria, termasuk ukuran dan kapasitas yang sesuai dengan jenis dan volume sampah, warna yang berbeda untuk memudahkan pemilahan sampah, memiliki tutup yang rapat, lubang drainase, serta label yang menunjukkan jenis sampah yang dapat dibuang ke dalamnya. Meskipun saat ini belum ada regulasi spesifik mengenai penggunaan smart trash bin, namun regulasi seperti Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.22/MENLHK/SETJEN/KUM.1/2/2022 dan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 14/PRT/M/2020 dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi ini [11]. Penggunaan *smart trash bin* diharapkan dapat memenuhi standar teknis seperti ukuran dan kapasitas, serta dilengkapi dengan fitur-fitur inovatif seperti pemilahan sampah otomatis, monitoring kepenuhan, dan pengiriman pesan peringatan kepada petugas kebersihan. Selain spesifikasi umum, *smart trash bin* ini juga memerlukan spesifikasi khusus untuk komponen mikrokontroler dan sensor yang digunakan [12]. Mikrokontroler dengan RAM 8GB akan memberikan kapasitas yang cukup untuk menjalankan tugas-tugas *machine learning* dan pengolahan citra menggunakan *framework* seperti TensorFlow dan OpenCV. Untuk konektivitas, mikrokontroler dengan kemampuan WiFi dan Bluetooth sangat cocok untuk aplikasi IoT, yang memungkinkan smart trash bin berinteraksi dengan jaringan dan perangkat lain [13]. Namun, meskipun mikrokontroler ini memiliki kelebihan dalam mengolah tugas ringan, perangkat

keras dengan daya pemrosesan yang lebih tinggi mungkin diperlukan untuk aplikasi yang lebih kompleks.

Selain itu, spesifikasi sensor juga memainkan peran penting dalam sistem smart trash bin. Modul kamera 2MP dengan kemampuan konektivitas WiFi dan Bluetooth 4.0 dapat digunakan untuk pengambilan dan analisis citra, mendukung tugas seperti deteksi objek dan pengenalan pola. Sensor ultrasonik, di sisi lain, digunakan untuk memantau ketinggian sampah, yang merupakan komponen penting dalam konsep IoT untuk memberikan umpan balik yang relevan dan terukur dalam pengelolaan sampah. *Framework* yang digunakan dalam pemrosesan citra, seperti YOLO dan TensorFlow, memberikan berbagai keunggulan dan kekurangan tergantung pada kebutuhan spesifik aplikasi. YOLO, misalnya, sangat efisien dalam deteksi objek secara real-time, namun kurang akurat dalam mendeteksi objek kecil. Di sisi lain, TensorFlow menawarkan fleksibilitas dan presisi tinggi, meski memiliki kurva pembelajaran yang curam dan memerlukan sumber daya komputasi yang besar [14]. Akhirnya, dalam mengimplementasikan smart trash bin ini, ada beberapa batasan perangkat keras yang perlu diperhatikan, seperti daya komputasi yang terbatas dan kapasitas penyimpanan yang harus dikelola secara efisien. Keterbatasan ini memerlukan optimalisasi algoritma dan manajemen data yang cermat untuk memastikan sistem berjalan dengan efisien dan efektif dalam mendukung pengelolaan sampah yang lebih baik dan berkelanjutan.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen dengan metode pengembangan sistem berbasis perangkat keras dan perangkat lunak untuk menciptakan sebuah sistem pemilahan sampah otomatis. Sistem ini dibangun dengan mengintegrasikan Raspberry Pi sebagai kontroler utama yang bertanggung jawab atas pemrosesan gambar dan klasifikasi objek menggunakan algoritma *machine learning*, khususnya Faster R-CNN dan SSD MobileNet. Kamera Raspberry Pi Camera Module V2 digunakan untuk menangkap gambar sampah, yang kemudian diproses menggunakan TensorFlow untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis sampah. Setelah itu, sistem akan mengarahkan motor servo untuk memisahkan sampah sesuai dengan klasifikasinya. Selain itu, sensor ultrasonik digunakan untuk memantau tingkat sampah, dan bot Telegram digunakan untuk memberikan umpan balik kepada pengguna mengenai status tempat sampah.

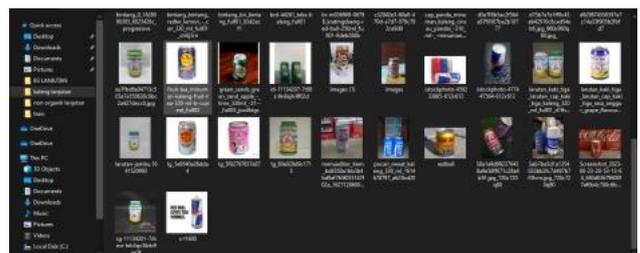
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan utama. Pertama, desain sistem yang mencakup integrasi antara komponen perangkat keras (kamera, motor servo, sensor ultrasonik, dan Raspberry Pi) dan perangkat lunak (algoritma *machine learning* dan protokol komunikasi) dikembangkan dan diuji secara iteratif. Kemudian, algoritma Faster R-CNN dan SSD MobileNet dibandingkan dari segi kecepatan dan akurasi dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan objek sampah. Data yang dihasilkan dari proses klasifikasi ini digunakan untuk menggerakkan motor servo dan mengatur tindakan pemilahan sampah. Terakhir, uji coba dilakukan untuk menilai efektivitas dan efisiensi sistem dalam kondisi lingkungan nyata, dengan fokus pada kecepatan deteksi, akurasi klasifikasi, dan respons sistem terhadap perubahan tingkat sampah. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat

memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi pemilahan sampah yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

Implementasi sistem pengelolaan sampah di lingkungan kampus, seperti di Universitas Telkom, berawal dari hal mendasar, yaitu pembuangan sampah ke tempat sampah sesuai dengan jenisnya. Langkah ini penting karena salah satu masalah utama dalam pengelolaan sampah adalah pembuangan dan pengangkutannya. Solusi inovatif untuk permasalahan ini adalah pengembangan tempat sampah otomatis yang mampu memilah sampah sesuai dengan klasifikasinya, yang bertujuan untuk memudahkan petugas kebersihan kampus dan petugas pengangkut sampah. Tempat sampah otomatis ini memanfaatkan teknologi *machine learning* dengan menggunakan algoritma SSD (*Single Shot Multibox Detector*) dan *framework* TensorFlow. Dalam proses ini, dataset gambar sampah yang mencakup sampah organik, non-organik, B3, dan metal dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk Google, Roboflow, dan foto yang diambil langsung. Dengan total 1.200 gambar, dataset ini kemudian diolah melalui proses pelabelan dan augmentasi untuk meningkatkan variasi dan kualitas data seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengumpulan Dataset Gambar

Proses pengolahan dataset adalah tahap kritis dalam mempersiapkan sistem deteksi objek. Gambar-gambar yang telah terkumpul diunggah ke *platform* Roboflow untuk anotasi manual, yang penting untuk memastikan akurasi pelabelan objek dalam gambar. Setelah itu, dataset dibagi menjadi dua kelompok utama: dataset pelatihan untuk mengajari model dan dataset validasi untuk menguji kinerja model. Proses augmentasi dilakukan untuk memperkaya data, yang penting untuk meningkatkan kemampuan model dalam mendeteksi berbagai jenis sampah.

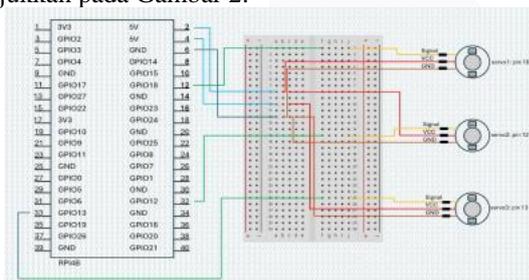
Tahap berikutnya dalam pengembangan sistem adalah pelatihan model deteksi objek menggunakan arsitektur SSD MobileNet V2 FPN Lite. Proses pelatihan dilakukan secara online menggunakan Google Colab, yang memungkinkan penggunaan sumber daya komputasi besar. Setelah pelatihan selesai, model yang dihasilkan dikonversi ke format TensorFlow Lite agar dapat dijalankan pada perangkat keras dengan sumber daya terbatas seperti Raspberry Pi. Pengujian dilakukan untuk mengukur kualitas deteksi objek, memastikan bahwa model dapat berfungsi dengan baik dalam aplikasi nyata. Integrasi perangkat keras dengan Raspberry Pi adalah langkah berikutnya, di mana TensorFlow Lite diterapkan untuk mendeteksi sampah secara real-time. Implementasi ini melibatkan pengembangan skrip Python

yang mengatur interaksi antara model dan perangkat keras, yang penting untuk memastikan kinerja optimal dan efisiensi sistem.

Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan sub-sistem monitoring yang menggunakan ESP 32 dan sensor ultrasonik HC-SR04. Sub-sistem ini dirancang untuk mengirim notifikasi melalui bot Telegram ketika tempat sampah penuh, memberi kemudahan bagi petugas kebersihan untuk segera mengosongkan tempat sampah. Implementasi teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengelolaan sampah di kampus, menjadikan Universitas Telkom sebagai pelopor dalam pengelolaan sampah berbasis teknologi di lingkungan akademik.

B. Analisis Pengerjaan Implementasi Sistem

Skema *hardware* yang dijelaskan dalam rancangan mikrokontroler pada proyek ini menggunakan Raspberry Pi 4 Model B sebagai pusat kendali dengan tiga motor servo yang terhubung untuk menggerakkan komponen mekanik. Komponen yang digunakan meliputi Raspberry Pi 4 Model B dan tiga motor servo (Servo1, Servo2, dan Servo3). Koneksi untuk masing-masing servo adalah sebagai berikut: Servo1 terhubung ke GPIO 18 (Pin 12), VCC ke Pin 4 (5V), dan ground ke Pin 6 (GND); Servo2 terhubung ke GPIO 12 (Pin 32), VCC ke Pin 4 (5V), dan ground ke Pin 6 (GND); serta Servo3 terhubung ke GPIO 13 (Pin 33), VCC ke Pin 2 (5V), dan ground ke Pin 6 (GND). Skema mikro kontroler ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Mikrokontroler

Analisis koneksi menunjukkan bahwa Pin 2 dan Pin 4 pada header GPIO Raspberry Pi menyediakan tegangan 5V yang dibutuhkan oleh servo. Servo1 dan Servo2 berbagi pin 5V yang sama (Pin 4), sementara Servo3 menggunakan pin 5V yang berbeda (Pin 2). Hal ini memastikan bahwa setiap servo mendapatkan daya yang cukup, namun penting untuk memantau total konsumsi daya agar tidak terjadi penurunan tegangan yang signifikan. Semua servo terhubung ke ground yang sama (Pin 6), yang memastikan referensi tegangan yang konsisten di seluruh sistem. Setiap motor servo dikendalikan oleh pin GPIO yang berbeda dengan menggunakan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) untuk mengontrol posisi masing-masing servo. Servo1 dikendalikan oleh GPIO 18, Servo2 oleh GPIO 12, dan Servo3 oleh GPIO 13. Raspberry Pi perlu memiliki sumber daya yang cukup untuk menggerakkan semua servo secara bersamaan, dan jika diperlukan, penggunaan sumber daya eksternal untuk servo bisa dipertimbangkan untuk menghindari beban yang berlebihan pada Raspberry Pi. Penempatan komponen dalam skema ini dirancang dengan teliti; Servo1 ditempatkan di bagian belakang tempat sampah, sementara Servo2 dan Servo3 ditempatkan di sisi kiri dan kanan tempat sampah. Kamera ditempatkan di bagian atas tempat sampah, dan

Raspberry Pi ditempatkan di bagian belakang bersama dengan mini-breadboard dalam sebuah kotak pelindung. Penempatan ini tidak hanya mempertimbangkan efisiensi operasional tetapi juga kestabilan sistem secara keseluruhan.

C. Hasil Akhir Sistem

Hasil akhir dari sistem yang dikembangkan mencakup dua komponen utama yaitu pengembangan *machine learning* untuk deteksi objek dan pengembangan tempat sampah otomatis. Proses deteksi kelas sampah dimulai saat kamera mendeteksi objek yang berada di depannya. Gambar input pertama-tama diproses oleh MobileNet, sebuah arsitektur jaringan saraf konvolusi ringan dan efisien yang mengextract fitur dari gambar pada berbagai tingkat resolusi melalui lapisan konvolusi. Fitur-fitur ini kemudian diteruskan ke beberapa detektor, yang biasanya terdiri dari lapisan konvolusi tambahan, untuk menghasilkan prediksi bounding box dan skor keyakinan untuk berbagai kelas objek. Detektor ini menggunakan beberapa skala dan rasio aspek untuk mendeteksi objek dengan ukuran dan bentuk yang berbeda. Proses selanjutnya melibatkan penggunaan "prior box" atau "anchor box" dalam SSD (Single Shot MultiBox Detector), yaitu kotak pembatas default yang telah ditentukan sebelumnya. Model akan menyesuaikan kotak-kotak ini berdasarkan fitur yang diekstraksi dari gambar, menghasilkan bounding box yang lebih akurat. Setelah prediksi bounding box dan skor keyakinan dikumpulkan dari beberapa detektor, teknik NMS (Non-Maximum Suppression) diterapkan untuk menghilangkan duplikasi dan mempertahankan kotak dengan skor keyakinan tertinggi untuk setiap objek. Hasil akhirnya adalah serangkaian bounding box yang dilabeli dengan kelas dan skor keyakinan, menunjukkan lokasi dan jenis objek dalam gambar. Model ini dijalankan di Raspberry Pi menggunakan TFLite, yang dapat divisualisasikan menggunakan alat seperti Netron untuk menampilkan struktur dan lapisan dari model pembelajaran mesin.

Tempat sampah otomatis seperti yang ditunjukkan Gambar 3 yang dikembangkan terintegrasi dengan Raspberry Pi dan sistem *machine learning*. Setelah model *machine learning* mengeluarkan output kelas sampah, sistem ini menggunakan motor servo untuk memindahkan papan penghalang sesuai dengan perintah yang diterima. Papan akan menggiring sampah jatuh ke dalam tempat sampah yang sesuai dengan kelasnya. Setelah proses pemisahan sampah selesai, servo akan mengembalikan papan ke posisi awal dan menunggu untuk sampah berikutnya. Dengan desain ini, tempat sampah tidak hanya mempermudah proses pemisahan sampah tetapi juga meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengelolaan sampah. Penempatan komponen pada tempat sampah, seperti yang terlihat dari berbagai sisi gambar, mendukung integrasi dan fungsionalitas sistem secara keseluruhan, memastikan bahwa setiap komponen bekerja secara harmonis untuk mencapai tujuan sistem pengelolaan sampah otomatis.



Gambar 3. Hasil Akhir Sistem

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pemilahan sampah otomatis dengan memanfaatkan integrasi teknologi machine learning dan perangkat keras yang canggih. Sistem ini memanfaatkan Raspberry Pi sebagai kontroler utama yang memproses gambar menggunakan algoritma machine learning seperti Faster R-CNN dan SSD MobileNet. Kamera Raspberry Pi Camera Module V2 berfungsi untuk menangkap gambar sampah, yang kemudian dianalisis menggunakan TensorFlow untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis sampah. Berdasarkan hasil klasifikasi, motor servo diarahkan untuk memisahkan sampah ke tempat sampah yang sesuai. Selain itu, sistem dilengkapi dengan sensor ultrasonik dan bot Telegram untuk memantau tingkat sampah dan memberikan umpan balik kepada pengguna. Dalam implementasinya, sistem menunjukkan efektivitas dalam pengelolaan sampah melalui pemisahan yang tepat dan otomatis. Proses yang melibatkan pelatihan model deteksi objek dan integrasi perangkat keras dengan Raspberry Pi membuktikan keberhasilan dalam meningkatkan efisiensi pemilahan sampah. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan baik dalam lingkungan nyata, mempercepat proses pemilahan sampah dan memudahkan petugas kebersihan. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi pemilahan sampah yang lebih ramah lingkungan dan efisien, serta memberikan solusi inovatif untuk pengelolaan sampah di lingkungan kampus.

REFERENSI

- [1] Brotosusilo, A., & Handayani, D, "Dataset on waste management behaviors of urban citizens in large cities of Indonesia," *Data in Brief*, 32, 106053, 2020. [sipsn.menlhk.go.id](https://www.sipsn.menlhk.go.id),
- [2] "Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 'SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional,'" [sipsn.menlhk.go.id](https://www.sipsn.menlhk.go.id).

- [3] H. A. Addahlawi, U. Mustaghfiroh, L. K. Ni'mah, A. Sundusiyah, A. F. Hidayatullah, "Implementasi Prinsip Good Environmental Governance Dalam Pengelolaan Sampah di Indonesia," *Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, Vol. 8 No. 2, p. 107, 2019.
- [4] R. P. Mahyudin, "Kajian Permasalahan Pengelolaan Sampah dan Dampak Lingkungan di TPA (Tempat Pemrosesan Akhir)," *Jurnal Teknik Lingkungan*, no. Vol. 3, No. 1, p. 69, 2017.
- [5] A. Kahfi, "Tinjauan Terhadap Pengelolaan Sampah", *Jurisprudentie*, vol. 4, no. 1, p. 12-25, Jun. 2017.
- [6] E. Damanhuri, T. Padi, "Pengelolaan Sampah," in *DIKTAT KULIAH TL-3104 (Versi 2010)*, Bandung, Program Studi Teknik Lingkungan FTSL ITB, 2010.
- [7] D. G. Ambina, "Tinjauan Pemilahan Sampah Menurut Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah," *Bina Hukum Lingkungan*, Vol. 3, no. 2, p. 178, 2019.
- [8] T. Artiningrum, "Potensi Emisi Metana (CH₄) dari Timbulan Sampah Kota Bandung," *Geoplanart*, vol. 1, no. 1, p. 36-37, 2017.
- [9] N. Fauziah, Sukaris, A. R. Rahim, R. Jumadi, N. A. Fachrudin, W. Renedi, "Peningkatan Kepedulian Masyarakat Terhadap Lingkungan Khususnya Dalam Permasalahan Sampah," *DedikasiMU (Journal of Community Service)*, Vol. 2, no. 4, p. 563, 2020.
- [10] M. Ramadhanti, Nahdalina, "Optimalisasi Sistem Angkutan Sampah Menggunakan Vehicle Routing Problem dengan Batasan Kapasitas Angkut," *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, Vol. 21, no. 2, p. 198, 2022.
- [11] Pemerintah Republik Indonesia. (2012). "Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga." Peraturan Perundang-undangan Nomor 81 Tahun 2012, 15 Oktober 2012.
- [12] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2022). "Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga." Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.22/MENLHK/SETJEN/KUM.1/2/2022, 2022.
- [13] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2020). "Standar Teknis Tempat Penampungan Sampah Sementara." Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 14/PRT/M/2020, 2020.
- [14] A. Talele, A. Patil, and B. Barse, "Detection of real time objects using TensorFlow and OpenCV," *Asian Journal For Convergence In Technology (AJCT) ISSN-2350-1146*, 2019.
- [15] E. Erwin et al., "PENGANTAR & PENERAPAN INTERNET OF THINGS: Konsep dasar & Penerapan IoT di berbagai Sektor." PT. Sonpedia Publishing Indonesia, 2023.