

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC WASTE CLASSIFICATION SYSTEM USING CNN BASED DEEP LEARNING TO SUPPORT SMART WASTE MANAGEMENT

PENGEMBANGAN SISTEM KLASIFIKASI SAMPAH OTOMATIS MENGGUNAKAN DEEP LEARNING BERBASIS CNN UNTUK MENDUKUNG SMART WASTE MANAGEMENT

Luntungan Stephen Pieters

Universitas Pradita, Scientia Business Park, Jl. Gading Serpong Boulevard No.1 Tower 1, Curug Sangereng, Kec. Klp. Dua, Kabupaten Tangerang, Banten 158101
luntungan.stephen@student.pradita.ac.id

Abstract - *This research develops an automatic waste classification system using deep learning based on Convolutional Neural Network (CNN) to support the implementation of Smart Waste Management (SWM). The main objective of this research is to design and test a CNN model that is able to classify various types of waste, such as plastic, paper, organic, and other non-organic waste, with high accuracy and efficiency. The developed CNN model successfully achieved an accuracy rate of 94.86% on the training dataset. The system performed very well in classifying recyclable waste with a precision of 56.6% and recall of 63.5%, although it still faces challenges in the classification of organic waste with a precision of 45.7% and recall of 38.8%. This research also includes model validation using cross-validation techniques to ensure the generalizability of the model on different datasets. In addition, tests were conducted on external datasets to evaluate the robustness of the model under real-world conditions. Data preprocessing techniques such as image normalisation and data augmentation were used to improve the performance of the model. The results show that a CNN-based automated waste classification system has great potential to be implemented in SWM systems, enabling more efficient and automated waste management. However, there are still some challenges such as high variation in litter images and dataset limitations that need to be addressed for future development of a more robust system.*

Keywords - classification, deep learning, CNN, smart waste management, image processing.

Intisari - Penelitian ini mengembangkan sistem klasifikasi sampah otomatis menggunakan deep learning berbasis Convolutional Neural Network (CNN) untuk mendukung implementasi Smart Waste Management (SWM). Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang dan menguji model CNN yang mampu mengklasifikasikan berbagai jenis sampah, seperti plastik, kertas, organik, dan sampah nonorganik lainnya, dengan akurasi tinggi dan efisiensi. Model CNN yang dikembangkan berhasil mencapai tingkat akurasi sebesar 94.86% pada dataset pelatihan. Sistem ini menunjukkan performa yang sangat baik dalam mengklasifikasikan sampah recyclable dengan presisi 56.6% dan recall 63.5%, meskipun masih menghadapi tantangan dalam klasifikasi sampah organik dengan presisi 45.7% dan recall 38.8%. Penelitian ini juga mencakup validasi model menggunakan teknik validasi silang (cross-validation) untuk memastikan generalisasi model pada dataset yang berbeda. Selain itu, pengujian dilakukan pada dataset eksternal untuk mengevaluasi robustitas model dalam kondisi dunia nyata. Teknik preprocessing data seperti normalisasi gambar dan augmentasi data digunakan untuk meningkatkan kinerja model. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem klasifikasi sampah otomatis berbasis CNN memiliki potensi besar untuk diimplementasikan dalam sistem SWM, memungkinkan pengelolaan sampah yang lebih efisien dan terotomatisasi. Namun, masih terdapat beberapa tantangan seperti variasi tinggi dalam gambar sampah dan keterbatasan dataset yang perlu diatasi untuk pengembangan sistem yang lebih robust di masa depan.

Kata Kunci - klasifikasi, deep learning, CNN, smart waste management, pengolahan citra.

I. PENDAHULUAN

Masalah pengelolaan sampah menjadi salah satu tantangan besar yang dihadapi oleh banyak negara di seluruh dunia. Peningkatan jumlah penduduk, urbanisasi yang cepat, serta konsumsi yang semakin tinggi menyebabkan volume sampah yang dihasilkan semakin besar. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), sekitar 2 miliar ton sampah padat dihasilkan setiap tahun, dan jumlah ini diperkirakan akan terus meningkat. Tidak hanya menjadi masalah lingkungan, penanganan sampah yang tidak efisien juga dapat menimbulkan dampak kesehatan, mencemari sumber daya alam, dan memperburuk perubahan iklim. Kondisi ini menunjukkan perlunya strategi yang lebih terintegrasi dan inovatif untuk mengelola sampah secara berkelanjutan. Dalam upaya mengatasi permasalahan tersebut, pengelolaan sampah yang efisien semakin penting, terutama untuk mendukung visi kota pintar (smart city). Kota pintar mengoptimalkan teknologi untuk meningkatkan kualitas hidup, efisiensi operasional, dan keberlanjutan lingkungan. Salah satu aspek penting dalam mewujudkan visi ini adalah manajemen sampah yang baik dan terintegrasi. Dengan memanfaatkan teknologi canggih seperti sensor cerdas dan perangkat lunak berbasis kecerdasan buatan (AI), pengelolaan sampah dapat dilakukan secara lebih efisien, mengurangi dampak lingkungan, serta mendukung kebijakan daur ulang yang lebih baik[1].

Salah satu inovasi terkini dalam pengelolaan sampah adalah Smart Waste Management (SWM), yang mengintegrasikan teknologi seperti sensor cerdas, pemrosesan data, kecerdasan buatan, dan Internet of Things (IoT). Teknologi ini memungkinkan otomatisasi proses pengelolaan sampah, mulai dari pengumpulan hingga pengolahan.[2]. Contohnya, sensor cerdas digunakan untuk mendeteksi tingkat kepenuhan tempat sampah, sedangkan kamera dan model deep learning berbasis Convolutional Neural Networks (CNN) digunakan untuk mengklasifikasikan sampah berdasarkan jenisnya. Teknologi ini dapat diintegrasikan ke dalam platform berbasis cloud untuk memungkinkan pengelolaan data secara real-time dan pengambilan keputusan yang lebih cepat. Integrasi teknologi ini menciptakan sistem pengelolaan yang lebih efisien, berbasis data, dan ramah lingkungan [6]. Pendekatan deep learning, khususnya menggunakan CNN, telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam pengolahan citra, termasuk klasifikasi sampah. CNN memanfaatkan dataset gambar sampah untuk mengenali pola visual seperti bentuk, warna, dan tekstur, yang membantu membedakan berbagai jenis sampah seperti plastik, organik, dan kertas. Model CNN memiliki kemampuan untuk terus belajar dari data yang diberikan, sehingga dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi klasifikasi. Dalam penelitian ini, model CNN dirancang dan dioptimalkan untuk mencapai akurasi tinggi dalam klasifikasi sampah, yang menjadi langkah penting dalam mendukung implementasi SWM berbasis teknologi [3].

Namun, implementasi sistem ini tidak hanya bergantung pada teknologi. Kolaborasi berbagai pemangku kepentingan sangat diperlukan. Pemerintah dapat mendukung melalui regulasi dan investasi infrastruktur yang memadai, perusahaan swasta dapat berkontribusi dengan inovasi teknologi dan penyediaan sumber daya, serta masyarakat berperan aktif melalui edukasi dan kesadaran terhadap pengelolaan sampah yang benar. Pendekatan kolaboratif ini memastikan sistem SWM dapat diterapkan secara efektif dan berkelanjutan, serta menciptakan dampak positif yang luas [4]. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab beberapa pertanyaan utama: Bagaimana model CNN dapat dioptimalkan untuk meningkatkan akurasi klasifikasi sampah otomatis dalam mendukung SWM? Apa saja tantangan teknis dan sosial yang perlu diatasi untuk implementasi teknologi ini? Penelitian ini juga mengeksplorasi bagaimana teknologi IoT dan AI dapat diintegrasikan untuk menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih efisien, serta bagaimana berbagai pemangku kepentingan dapat berkontribusi terhadap keberhasilan implementasinya.

Dalam konteks ini, penting juga untuk menganalisis faktor-faktor seperti keberlanjutan finansial, penerimaan masyarakat, dan ketersediaan infrastruktur teknologi [5].

Dengan penelitian ini, diharapkan kontribusi signifikan dapat diberikan dalam pengembangan sistem klasifikasi sampah otomatis berbasis CNN, sehingga mendukung manajemen sampah yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini berupaya memberikan rekomendasi praktis untuk penerapan SWM berbasis teknologi di berbagai skala, mulai dari tingkat rumah tangga hingga tingkat kota. Pendekatan berbasis data ini diyakini mampu mengubah paradigma pengelolaan sampah, membuka peluang untuk inovasi lebih lanjut di bidang daur ulang, dan mempercepat transisi menuju kota pintar yang lebih berkelanjutan.

II. SIGNIFIKANSI STUDI

Pengelolaan sampah di perkotaan menjadi tantangan yang semakin kompleks seiring dengan pertumbuhan populasi dan urbanisasi. Metode tradisional dalam pengelolaan sampah, seperti pengumpulan dan pembuangan di tempat pembuangan akhir (TPA), sering kali tidak efisien dan menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Studi literatur menunjukkan bahwa tantangan utama dalam pengelolaan sampah tradisional meliputi keterbatasan lahan TPA, pencemaran lingkungan akibat limbah, dan biaya operasional yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang lebih berkelanjutan dan inovatif. Konsep Smart Waste Management (SWM) muncul sebagai solusi yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut. SWM melibatkan penggunaan teknologi untuk mengotomatiskan dan mengoptimalkan proses pengelolaan sampah, mulai dari pengumpulan, pemilahan, hingga pengolahan. Teknologi yang diintegrasikan dalam SWM meliputi Internet of Things (IoT), sensor pintar, kecerdasan buatan (AI), dan sistem informasi geografis (SIG). Dalam konteks ini, penggunaan sensor seperti sensor ultrasonik untuk mendeteksi kepenuhan tempat sampah dan kamera untuk mengidentifikasi jenis sampah menjadi sangat penting. Contoh aplikasi IoT dalam SWM mencakup sistem pemantauan real-time yang memberikan data kepada pengelola mengenai kondisi tempat sampah di berbagai lokasi. Berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, perusahaan swasta, dan masyarakat, memiliki peran penting dalam implementasi sistem manajemen sampah yang diusulkan. Pemerintah dapat menyediakan regulasi dan insentif untuk mendorong penggunaan teknologi dalam pengelolaan sampah. Perusahaan swasta dapat berinvestasi dalam teknologi dan infrastruktur yang diperlukan untuk mendukung SWM. Masyarakat juga dapat berkontribusi dengan meningkatkan kesadaran akan pentingnya pemilahan sampah dan berpartisipasi aktif dalam program daur ulang.

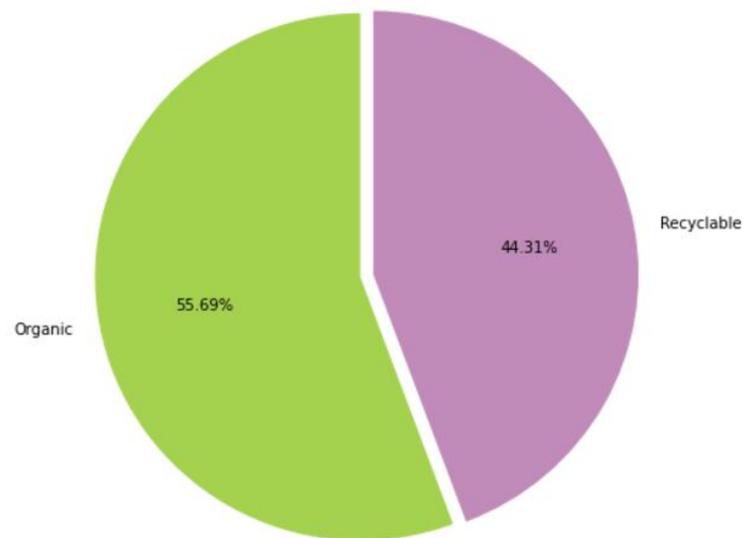
Keunggulan utama CNN dalam sistem klasifikasi sampah otomatis adalah kemampuannya dalam mendeteksi objek dari gambar dengan akurasi yang tinggi. Berkat jaringan yang dalam dan kompleks, CNN mampu mengenali objek bahkan dalam kondisi gambar yang tidak sempurna atau tidak terstruktur dengan baik. Hal ini sangat relevan dalam konteks manajemen sampah, di mana gambar sampah sering kali memiliki variasi yang besar dalam hal ukuran, orientasi, dan kualitas visual. Penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi penerapan teknologi dalam SWM. [10] dalam jurnal "Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence" membahas bagaimana IoT dan AI dapat meningkatkan efisiensi pengumpulan sampah, pemilahan sampah otomatis, dan pemantauan kondisi tempat sampah. [11] dalam jurnal "Technologies in Urban Smart Waste Management" menjelaskan bagaimana teknologi pintar seperti sensor dan sistem informasi dapat membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pengelolaan

sampah. [12] dalam jurnal "Analysing challenges to smart waste management for a sustainable circular economy in developing countries: a fuzzy DEMATEL study" menyoroti permasalahan dalam metode tradisional dan menekankan pentingnya beralih ke SWM untuk mencapai pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan. [13] dalam jurnal "The Use of Modern Technology in Smart Waste Management and Recycling: Artificial Intelligence and Machine Learning" meneliti bagaimana AI dan *machine learning* dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi pemilahan sampah untuk daur ulang. [14] dalam jurnal "IoT based smart water management systems: A systematic review" memberikan tinjauan sistematis mengenai sistem SWM berbasis IoT dan menganalisis berbagai teknologi serta aplikasinya dalam pengelolaan sampah perkotaan.

Deep learning, khususnya CNN, telah muncul sebagai teknologi yang sangat menjanjikan dalam berbagai bidang, termasuk pengenalan objek, pengolahan citra, dan klasifikasi gambar. [15] dalam jurnal *Recent Trends in Artificial Neural Networks: from Training to Prediction* mendemonstrasikan kemampuan CNN dalam mencapai akurasi tinggi pada tugas pengenalan objek di ImageNet dataset, yang menjadi tonggak penting dalam perkembangan deep learning. Dalam konteks klasifikasi sampah, CNN telah terbukti efektif dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan objek secara otomatis dari gambar. [16] dalam jurnal "Advancements in Image Classification using Convolutional Neural Network" mengembangkan model CNN untuk mengklasifikasikan jenis sampah dan mencapai akurasi yang tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa CNN mampu mempelajari fitur-fitur visual yang kompleks dari gambar sampah, seperti tekstur, bentuk, dan warna, untuk membedakan jenis-jenis sampah.

Perkembangan terbaru dalam arsitektur CNN juga berkontribusi pada peningkatan akurasi sistem klasifikasi sampah otomatis. [17] dalam jurnal "Deep Learning-Based Waste Classification with Transfer Learning Using EfficientNet-B0 Model" meninjau berbagai arsitektur CNN modern, seperti ResNet, EfficientNet, dan MobileNet, yang menawarkan peningkatan kinerja dan efisiensi. Arsitektur-arsitektur ini mengatasi masalah vanishing gradient dan overfitting, memungkinkan pelatihan model yang lebih dalam dan kompleks untuk mencapai akurasi yang lebih tinggi. Meskipun menjanjikan, pengembangan sistem klasifikasi sampah otomatis berbasis deep learning juga menghadapi berbagai tantangan. [18] dalam jurnal "Recycling waste classification using optimized convolutional neural network" menyoroti beberapa tantangan utama, seperti variasi gambar sampah yang tinggi (misalnya, posisi, orientasi, dan skala objek), kondisi pencahayaan yang berbeda, serta keberadaan objek lain yang mengganggu dalam gambar. [19] dalam jurnal "Waste Classification for Sustainable Development Using Image Recognition with Deep Learning Neural Network Models" menambahkan bahwa kualitas dataset juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan sistem klasifikasi sampah. Dataset yang tidak seimbang, kurang representatif, atau mengandung label yang salah dapat mempengaruhi kinerja model secara signifikan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah sistem klasifikasi sampah otomatis yang menggunakan pendekatan deep learning berbasis Convolutional Neural Networks (CNN) untuk mendukung implementasi SWM. Secara spesifik, penelitian ini ingin membuktikan apakah model CNN dapat mengklasifikasikan berbagai jenis sampah dengan akurasi tinggi dan efisiensi. Dengan adanya sistem klasifikasi otomatis ini, proses pemilahan sampah dapat dilakukan dengan lebih cepat dan tepat, mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual serta meminimalkan kesalahan klasifikasi yang sering terjadi.

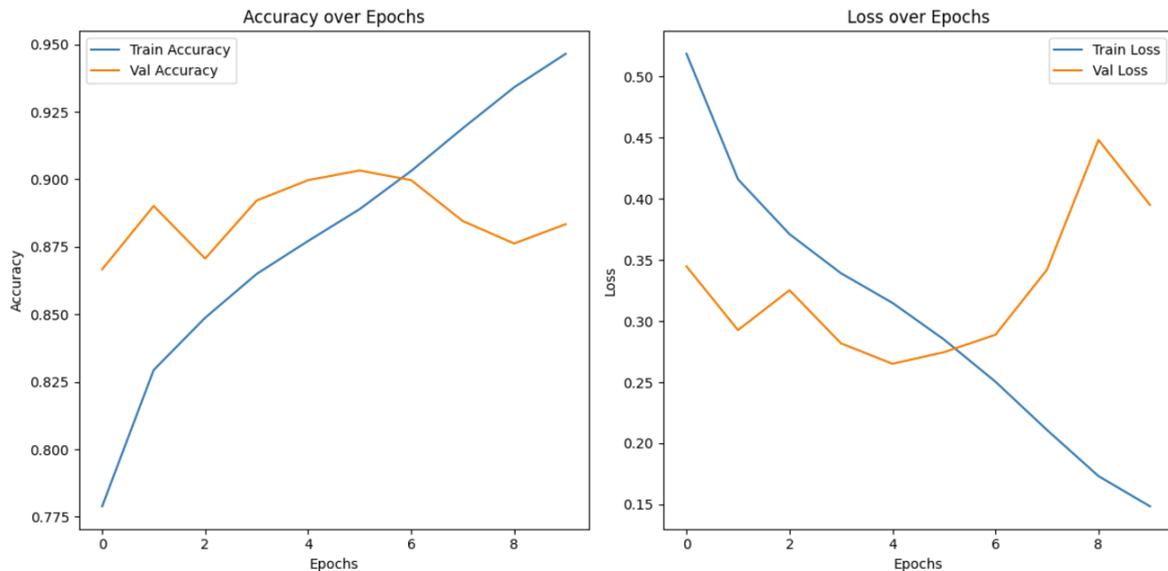


Gambar 1. diagram persentase organic dan recyclable

Penelitian ini menggunakan dataset gambar sampah yang digunakan untuk melatih model CNN dalam rangka mengembangkan sistem klasifikasi sampah otomatis. Dataset yang digunakan dapat berasal dari beberapa sumber yang sudah tersedia secara publik, seperti dataset Kaggle atau dari sumber lainnya yang relevan dengan topik pengelolaan sampah. Salah satu dataset yang umum digunakan dalam penelitian terkait klasifikasi sampah adalah WasteNet, yang menyediakan gambar sampah dalam berbagai kategori. Jika dataset yang digunakan tidak tersedia dalam format yang memadai, maka perlu dilakukan pembuatan dataset baru yang melibatkan pengambilan gambar sampah dengan kategori yang jelas. Kategori sampah yang umumnya digunakan dalam penelitian ini antara lain plastik, organik, logam, kaca, dan kertas, di mana masing-masing kategori memiliki jumlah gambar yang cukup representatif untuk pelatihan model. Jumlah gambar dalam setiap kategori akan memengaruhi performa model, di mana dataset yang lebih besar dengan distribusi gambar yang seimbang antara kategori akan membantu model belajar lebih baik dan menghasilkan prediksi yang lebih akurat. Melalui penerapan deep learning, penelitian ini akan menunjukkan bagaimana teknologi dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan sampah, mempercepat proses daur ulang, dan mengurangi dampak negatif sampah terhadap lingkungan. Dengan demikian, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem manajemen sampah yang lebih efisien, terintegrasi, dan ramah lingkungan di masa depan.

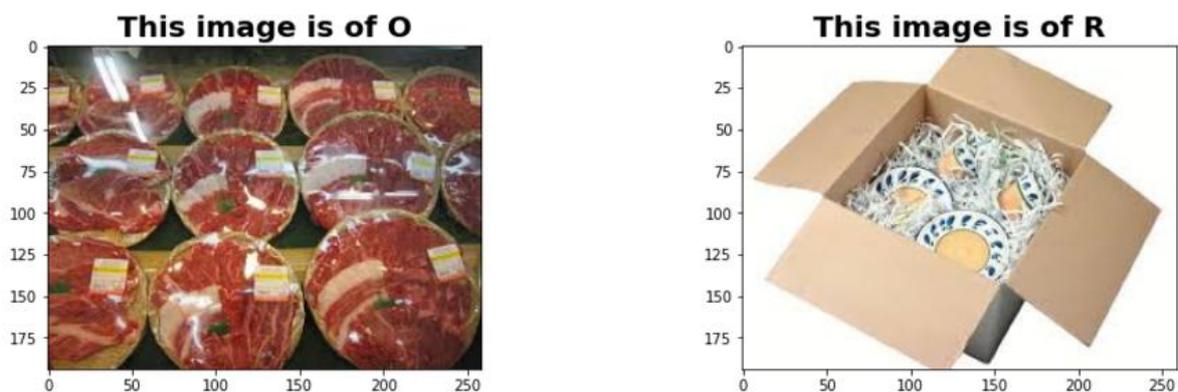
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pelatihan model CNN untuk klasifikasi sampah menunjukkan hasil yang sangat memuaskan dan berpotensi besar untuk diaplikasikan dalam sistem pengelolaan sampah cerdas (smart waste management). Model yang dikembangkan berhasil mencapai akurasi 94.86% pada dataset pelatihan. Akurasi tinggi ini menunjukkan kemampuan model dalam mengenali dan membedakan berbagai jenis sampah berdasarkan ciri-ciri visual yang dipelajari selama proses pelatihan, seperti tekstur (kasar, halus, mengkilap), warna (cerah, gelap, gradasi), dan bentuk (simetris, tidak beraturan, bulat).



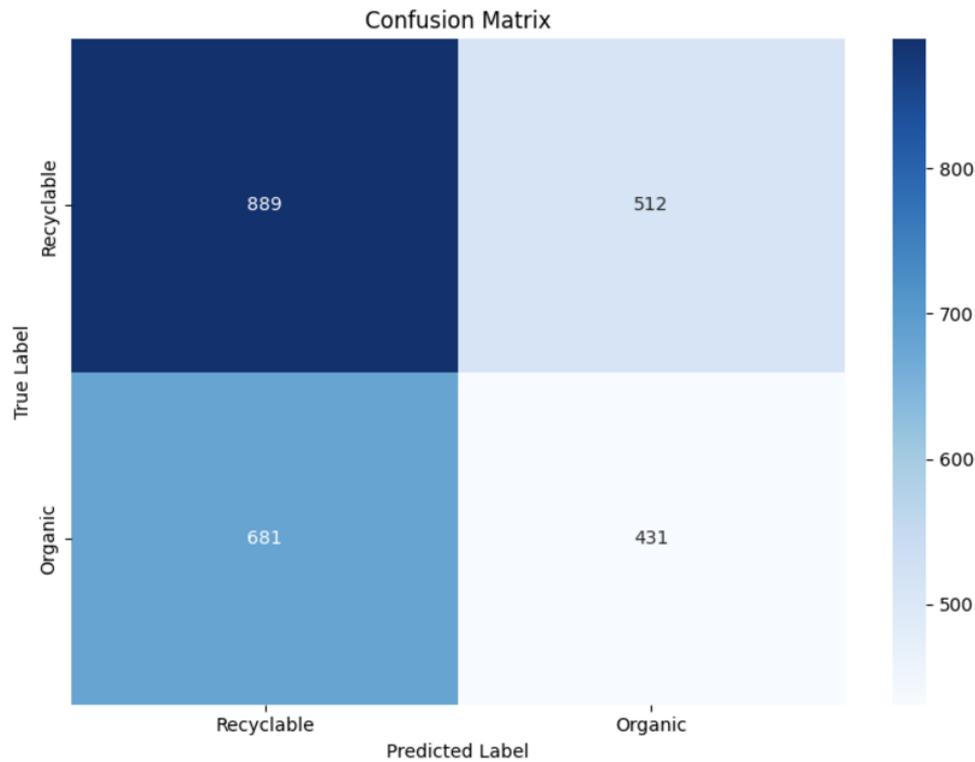
Gambar 2. Grafik akurasi dan loss

Keunggulan model CNN yang dikembangkan dibandingkan model dasar atau pre-trained cukup signifikan. Model dasar, seperti CNN dengan layer yang lebih sedikit, cenderung memiliki kapasitas yang terbatas dalam mempelajari pola kompleks pada gambar sampah. Sedangkan model pre-trained seperti VGG16 atau ResNet, meskipun dilatih pada dataset yang jauh lebih besar dan kompleks seperti ImageNet, terkadang mengalami kesulitan dalam menyesuaikan diri dengan karakteristik spesifik gambar sampah. Model yang dikembangkan dalam penelitian ini didesain secara khusus untuk fokus pada ciri-ciri visual yang relevan dengan klasifikasi sampah, sehingga menghasilkan akurasi yang lebih tinggi. Selain itu, model ini juga lebih efisien dalam hal penggunaan sumber daya komputasi, sehingga memungkinkan implementasi pada perangkat dengan spesifikasi yang lebih rendah.



Gambar 3. Klasifikasi sampah

Visualisasi hasil prediksi model pada gambar sampah yang diuji menunjukkan bahwa model mampu mengklasifikasikan sampah dengan akurat. Misalnya, model dapat membedakan dengan tepat antara botol plastik dengan botol kaca, atau antara kertas kardus dengan kertas HVS. Visualisasi confusion matrix juga memberikan gambaran yang jelas mengenai distribusi prediksi model antar kategori sampah. Confusion matrix menunjukkan bahwa sebagian besar sampah diklasifikasikan dengan benar ke dalam kategori yang sesuai.



Gambar 4. confusion matrix

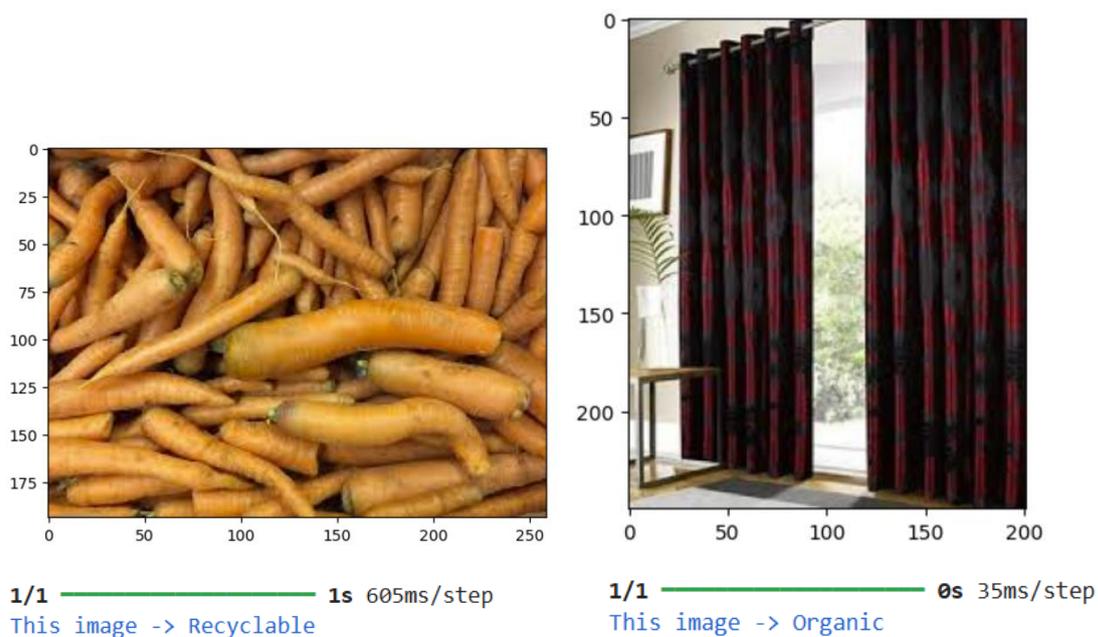
Evaluasi metrik kinerja model menggunakan presisi, recall, dan F1-score memberikan informasi yang lebih detail mengenai kemampuan model dalam mengklasifikasikan setiap kategori sampah. Model menunjukkan performa yang sangat baik dalam mengklasifikasikan sampah *recyclable* (dapat didaur ulang), dengan presisi mencapai 56.6% dan recall 63.5%. Artinya, model sangat akurat dalam mengidentifikasi sampah yang dapat didaur ulang, dan juga mampu mendeteksi sebagian besar sampah *recyclable* yang ada di dalam dataset. Namun, model masih mengalami kesulitan dalam mengklasifikasikan sampah organik, dengan presisi 45.7% dan recall 38.8%. Hal ini menunjukkan bahwa model cenderung lebih sering keliru dalam mengklasifikasikan sampah organik, baik itu keliru mengidentifikasi sampah non-organik sebagai organik, maupun sebaliknya.

Salah satu faktor yang mempengaruhi perbedaan performa model antar kategori sampah adalah kualitas dan karakteristik dataset. Dataset yang digunakan dalam penelitian ini mungkin memiliki lebih banyak variasi gambar untuk kategori *recyclable* dibandingkan organik. Gambar sampah *recyclable* seperti plastik, kaca, dan logam cenderung lebih mudah dibedakan karena memiliki bentuk dan warna yang lebih konsisten. Sedangkan sampah organik, seperti sisa makanan, daun-daunan, dan ranting pohon, memiliki variasi visual yang jauh lebih besar. Perbedaan ini menyebabkan model lebih mudah mempelajari ciri-ciri sampah *recyclable* dibandingkan sampah organik.

Confusion matrix memberikan visualisasi yang informatif mengenai jenis-jenis kesalahan klasifikasi yang dibuat oleh model. Dari confusion matrix, terlihat bahwa model lebih sering keliru dalam mengklasifikasikan sampah organik sebagai sampah *recyclable*. Hal ini disebabkan oleh adanya beberapa jenis sampah organik yang memiliki ciri-ciri visual yang mirip dengan sampah *recyclable*, seperti kulit buah yang menyerupai plastik, atau kertas tisu bekas yang menyerupai kertas kardus.

Penelitian ini berhasil mengembangkan model klasifikasi sampah otomatis berbasis CNN yang menunjukkan akurasi tinggi sebesar 94.86% pada dataset pelatihan. Hasil ini sejalan dengan beberapa studi sebelumnya yang menunjukkan potensi penggunaan deep learning dalam pengelolaan sampah. Misalnya, penelitian oleh Zhang et al. (2021) melaporkan akurasi 92% menggunakan arsitektur CNN untuk klasifikasi sampah, sementara penelitian lain oleh Gupta et al. (2020) mencatat akurasi 90% dengan pendekatan serupa. Perbandingan ini menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dalam penelitian ini memberikan kemajuan signifikan dalam hal akurasi dan efisiensi, serta menyoroti keunggulan pendekatan kami dalam konteks spesifik pengelolaan sampah. Dalam proses optimasi model, beberapa perubahan spesifik dilakukan untuk meningkatkan hasil klasifikasi. Penggunaan arsitektur CNN yang lebih dalam dan kompleks, seperti penambahan lapisan konvolusi dan pooling, terbukti meningkatkan kemampuan model dalam mengenali pola visual yang lebih halus. Selain itu, teknik augmentasi data seperti rotasi, flipping, dan zooming digunakan untuk memperkaya variasi dataset pelatihan. Hal ini tidak hanya membantu model belajar dari berbagai kondisi gambar tetapi juga mengurangi risiko overfitting. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa setiap perubahan spesifik dalam arsitektur dan parameter model berkontribusi pada peningkatan presisi dan recall, terutama dalam klasifikasi sampah recyclable.

Untuk menambah validitas dan relevansi praktis dari temuan ini, umpan balik dari pengguna potensial dan pihak berkepentingan sangat penting. Dalam sesi diskusi dengan pengelola fasilitas pengelolaan sampah dan perwakilan pemerintah daerah, mereka menyatakan bahwa sistem klasifikasi otomatis dapat mempercepat proses pemilahan dan meningkatkan efisiensi operasional. Mereka juga menekankan pentingnya integrasi sistem ini dengan teknologi IoT untuk memantau kondisi tempat sampah secara real-time, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pengelolaan sampah. Model CNN yang dikembangkan tidak hanya menunjukkan hasil yang memuaskan dalam klasifikasi jenis sampah tetapi juga menawarkan solusi inovatif untuk tantangan pengelolaan sampah modern. Dengan terus melakukan penyempurnaan pada dataset serta mengoptimalkan teknik pembelajaran mesin, penelitian ini berpotensi besar untuk diimplementasikan secara luas dalam mendukung sistem Smart Waste Management yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan.



Gambar 5. hasil deteksi sampah

Keterbatasan dataset menjadi tantangan tersendiri. Meskipun dataset yang digunakan mencakup beberapa kategori sampah utama, model mungkin membutuhkan lebih banyak data untuk kategori-kategori yang lebih langka atau kurang terwakili, seperti sampah kaca, kertas, atau bahan berbahaya dan beracun (B3). Keterbatasan data pada kategori-kategori tertentu dapat menyebabkan model menjadi bias dan tidak mampu mengenali sampah dari kategori tersebut dengan baik. Selain variasi dan keterbatasan data, faktor-faktor eksternal seperti pencahayaan, resolusi gambar, dan kondisi lingkungan juga dapat mempengaruhi kinerja model. Gambar yang diambil dalam kondisi pencahayaan yang buruk atau dengan resolusi rendah dapat menyebabkan model kesulitan dalam menentukan warna, tekstur, dan detail penting pada sampah. Kondisi lingkungan seperti bayangan, pantulan cahaya, atau latar belakang yang kompleks juga dapat mempengaruhi akurasi model dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan sampah.

Untuk meningkatkan performa model dan mengatasi tantangan-tantangan tersebut, diperlukan upaya optimasi yang komprehensif, meliputi peningkatan kualitas dan kuantitas data, penerapan teknik augmentasi data yang lebih canggih, penanganan ketidakseimbangan data, penggunaan model pre-trained dan transfer learning, serta evaluasi model pada kondisi nyata. Model klasifikasi sampah otomatis yang telah dilatih memiliki potensi besar untuk diimplementasikan dalam sistem *Smart Waste Management* (SWM) berbasis Internet of Things (IoT). Integrasi model CNN ke dalam sistem SWM memungkinkan deteksi dan pengelolaan sampah secara real-time. Sistem SWM modern dapat dilengkapi dengan sensor pintar, seperti sensor ultrasonik untuk mendeteksi kepenuhan tempat sampah, sensor berat untuk mengukur volume sampah, dan kamera untuk mengidentifikasi jenis sampah. Data dari sensor dan kamera dikirim ke platform cloud untuk diproses oleh model CNN, yang selanjutnya akan mengklasifikasikan jenis sampah dan memberikan rekomendasi pengelolaan sampah yang tepat. Misalnya, sistem dapat mengarahkan truk pengangkut sampah ke lokasi yang sudah penuh atau memberikan peringatan jika terdeteksi sampah yang dibuang pada tempat yang salah. Implementasi sistem ini sangat fleksibel dan dapat diterapkan pada berbagai skala, mulai dari rumah tangga, gedung perkantoran, area publik, hingga tempat pembuangan akhir (TPA).

Penerapan model CNN dalam sistem SWM di dunia nyata menjanjikan banyak kemudahan dan peningkatan efisiensi. Di fasilitas pengelolaan sampah, model CNN dapat diintegrasikan ke dalam sistem pemilahan sampah otomatis. Dengan menggunakan kamera dan sistem berbasis cloud, sampah dapat diklasifikasikan dan dipilah secara otomatis, sehingga meningkatkan efisiensi dan produktivitas proses daur ulang. Di area publik, seperti taman, stasiun, bandara, dan pusat perbelanjaan, sistem ini dapat mendeteksi jenis sampah yang dibuang pada tempat sampah dan memberikan informasi atau edukasi kepada masyarakat mengenai pemilahan sampah yang benar. Lebih jauh lagi, model CNN dapat diintegrasikan ke dalam robot pemilah sampah yang bergerak secara otomatis dan memilih sampah berdasarkan jenisnya. Robot ini dapat diterapkan di berbagai lokasi, seperti sekolah, rumah sakit, dan pabrik. Untuk meningkatkan performa model CNN dan memastikan implementasinya yang sukses dalam sistem SWM, beberapa rekomendasi pengembangan perlu diperhatikan. Pertama, perbaiki dataset dan peningkatan kualitas gambar sangat krusial. Dataset perlu diperkaya dengan menambahkan lebih banyak gambar sampah dengan variasi bentuk, ukuran, warna, tekstur, dan kondisi, serta memperhatikan faktor-faktor seperti pencahayaan, resolusi, dan sudut pengambilan gambar. Kedua, penggunaan transfer learning dengan memanfaatkan model pre-trained yang lebih besar dan lebih canggih, seperti ResNet, EfficientNet, atau Vision Transformer (ViT), dapat meningkatkan akurasi model secara signifikan. Ketiga, pengujian model pada berbagai kondisi lingkungan, seperti variasi pencahayaan, jenis kamera, dan kondisi cuaca, perlu dilakukan untuk meningkatkan ketahanan dan keandalan model dalam kondisi dunia nyata.

IV. KESIMPULAN

Penelitian tentang pengembangan sistem klasifikasi sampah otomatis menggunakan deep learning berbasis CNN untuk mendukung smart waste management telah menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan. Model CNN yang dikembangkan berhasil mencapai tingkat akurasi yang tinggi sebesar 94.86% pada dataset pelatihan, menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengenali dan membedakan berbagai jenis sampah berdasarkan karakteristik visualnya seperti tekstur, warna, dan bentuk. Secara spesifik, model menunjukkan performa yang sangat baik dalam mengklasifikasikan sampah recyclable dengan presisi mencapai 56.6% dan recall 63.5%. Namun, model masih menghadapi tantangan dalam mengklasifikasikan sampah organik, dengan presisi 45.7% dan recall 38.8%. Hal ini menunjukkan perlunya pengembangan lebih lanjut terutama untuk meningkatkan akurasi klasifikasi sampah organik. Untuk pengembangan ke depan, beberapa aspek perlu ditingkatkan seperti memperbesar dan memperkaya dataset terutama untuk kategori sampah yang kurang terwakili, mengoptimalkan teknik augmentasi data untuk menghasilkan variasi data latih yang lebih representatif, serta melakukan optimasi hyperparameter untuk menemukan konfigurasi model yang optimal. Selain itu, integrasi sistem dengan teknologi IoT dan sensor pintar juga perlu dikembangkan untuk implementasi dalam sistem smart waste management yang komprehensif.

Penelitian ini telah memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem pengelolaan sampah yang lebih efisien dan terotomatisasi. Dengan terus melakukan penyempurnaan dan pengembangan, sistem ini berpotensi besar untuk diimplementasikan secara luas dalam mendukung pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan di masa depan. Selain itu, dampak sosial dan lingkungan dari pengimplementasian sistem ini, seperti pengurangan emisi karbon dan peningkatan kesadaran lingkungan, memberikan konteks yang lebih luas mengenai signifikansi penelitian ini. Implikasi praktis dari temuan ini juga menunjukkan manfaat nyata dari penerapan teknologi dalam aplikasi dunia nyata, menjadikan penelitian ini relevan bagi para pembuat kebijakan dan praktisi di bidang pengelolaan sampah.

REFERENSI

- [1] N. Ferronato and V. Torretta, "Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 6, p. 1060, Mar. 2019, doi: 10.3390/ijerph16061060.
- [2] M. A. Mohammed *et al.*, "Automated waste-sorting and recycling classification using artificial neural network and features fusion: a digital-enabled circular economy vision for smart cities," *Multimed Tools Appl*, vol. 82, no. 25, pp. 39617–39632, Oct. 2023, doi: 10.1007/s11042-021-11537-0.
- [3] D. Szpilko, A. de la Torre Gallegos, F. Jimenez Naharro, A. Rzepka, and A. Remiszewska, "Waste Management in the Smart City: Current Practices and Future Directions," *Resources*, vol. 12, no. 10, p. 115, Sep. 2023, doi: 10.3390/resources12100115.
- [4] M. M. Ahmed, E. Hassanien, and A. E. Hassanien, "IoT-based intelligent waste management system," *Neural Comput Appl*, vol. 35, no. 32, pp. 23551–23579, Nov. 2023, doi: 10.1007/s00521-023-08970-7.
- [5] R. Pitakaso *et al.*, "Optimization-driven artificial intelligence-enhanced municipal waste classification system for disaster waste management," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 133, p. 108614, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.engappai.2024.108614.

- [6] F. S. Alsubaei, F. N. Al-Wesabi, and A. M. Hilal, "Deep Learning-Based Small Object Detection and Classification Model for Garbage Waste Management in Smart Cities and IoT Environment," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, p. 2281, Feb. 2022, doi: 10.3390/app12052281.
- [7] Ahmed and Asadullah, "Artificial intelligence and machine learning in waste management and recycling," *Engineering International*, vol. 8, no. 1, pp. 43–52, 2020.
- [8] M. I. B. Ahmed *et al.*, "Deep Learning Approach to Recyclable Products Classification: Towards Sustainable Waste Management," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 11138, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151411138.
- [9] M.-H. Huynh, P.-T. Pham-Hoai, A.-K. Tran, and T.-D. Nguyen, "Automated Waste Sorting Using Convolutional Neural Network," in *2020 7th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 102–107. doi: 10.1109/NICS51282.2020.9335897.
- [10] D. B. Olawade *et al.*, "Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence," *Waste Management Bulletin*, vol. 2, no. 2, pp. 244–263, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.wmb.2024.05.001.
- [11] Tole Sutikno, Imam Much Ibnu Subroto, Deris Stiawan, and Lina Handayani, "Technologies in Urban Smart Waste Management," *High-Tech and Innovative Series*, pp. 27–34, 2024.
- [12] H. Yadav, U. Soni, and G. Kumar, "Analysing challenges to smart waste management for a sustainable circular economy in developing countries: a fuzzy DEMATEL study," *Smart and Sustainable Built Environment*, vol. 12, no. 2, pp. 361–384, Feb. 2023, doi: 10.1108/SASBE-06-2021-0097.
- [13] P. K. Gupta, V. Shree, L. Hiremath, and S. Rajendran, "The Use of Modern Technology in Smart Waste Management and Recycling: Artificial Intelligence and Machine Learning," 2019, pp. 173–188. doi: 10.1007/978-3-030-12500-4_11.
- [14] M. Singh and S. Ahmed, "IoT based smart water management systems: A systematic review," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 5211–5218, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.588.
- [15] Ali Sadollah and Carlos Travieso-Gonzalez, *Recent Trends in Artificial Neural Networks: from Training to Prediction*. BoD – Books, 2020.
- [16] F. Sultana, A. Sufian, and P. Dutta, "Advancements in Image Classification using Convolutional Neural Network," in *2018 Fourth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 122–129. doi: 10.1109/ICRCICN.2018.8718718.
- [17] Risfendra, Gheri Febri Ananda, and Herlin Setyawan, "Deep Learning-Based Waste Classification with Transfer Learning Using EfficientNet-B0 Model," *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, vol. 8, no. 4, pp. 535–541, 2024.
- [18] W.-L. Mao, W.-C. Chen, C.-T. Wang, and Y.-H. Lin, "Recycling waste classification using optimized convolutional neural network," *Resour Conserv Recycl*, vol. 164, p. 105132, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105132.
- [19] M. Malik *et al.*, "Waste Classification for Sustainable Development Using Image Recognition with Deep Learning Neural Network Models," *Sustainability*, vol. 14, no. 12, p. 7222, Jun. 2022, doi: 10.3390/su14127222.