

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manajemen sampah modern saat ini menghadapi tantangan besar dalam hal efisiensi pemilahan material di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Keberhasilan proses daur ulang sangat bergantung pada klasifikasi material yang cepat dan akurat untuk memaksimalkan pengalihan (*diversion*) sampah dari penumpukan yang tidak terkendali. Namun, metode konvensional yang mengandalkan inspeksi visual manual oleh tenaga kerja manusia memiliki keterbatasan yang signifikan, seperti subjektivitas penilaian, biaya operasional yang tinggi, risiko kesehatan bagi pekerja, serta ketidakefektifan dalam menangani volume sampah yang terus meningkat setiap harinya.

Dalam satu dekade terakhir, teknologi *Deep Learning*, khususnya *Convolutional Neural Networks (CNN)*, telah menjadi solusi standar (*state-of-the-art*) dalam otomatisasi tugas *computer vision*, termasuk klasifikasi objek sampah. Meskipun demikian, penerapan CNN di lapangan seringkali terbentur pada masalah *Generalization Gap*. Penelitian menunjukkan bahwa model yang dilatih menggunakan dataset citra sampah yang bersih dan terisolasi mampu mencapai akurasi tinggi pada kondisi laboratorium, namun performanya merosot tajam saat dihadapkan pada citra dunia nyata (*real-world*). Kondisi sampah di TPA yang kotor, tumpang tindih, serta pencahayaan yang tidak konsisten menciptakan variabilitas data yang sulit digeneralisasi oleh model CNN standar.

Pemilihan arsitektur CNN dalam penelitian ini didasarkan pada kemampuannya yang superior dalam melakukan ekstraksi fitur secara otomatis langsung dari piksel citra melalui lapisan konvolusi. CNN mampu menangkap hirarki fitur mulai dari tepi (*edges*), tekstur, hingga bentuk kompleks dari objek sampah tanpa memerlukan rekayasa fitur manual. Namun, lapisan *fully connected* pada bagian akhir CNN standar sering kali memiliki kelemahan dalam menentukan garis pemisah (*decision boundary*) yang paling optimal jika data memiliki variansi yang sangat tinggi.

Oleh karena itu, *Support Vector Machine (SVM)* dipilih sebagai pengganti lapisan klasifikasi terakhir karena ketangguhannya dalam menangani masalah klasifikasi pada ruang fitur berdimensi tinggi. Dengan menggunakan prinsip *Structural Risk Minimization (SRM)*, SVM mencari *hyperplane* dengan margin maksimal yang memberikan kemampuan

generalisasi lebih baik dibandingkan fungsi *softmax* pada CNN konvensional. Integrasi antara CNN sebagai pengekstraksi fitur dan SVM sebagai klasifikator telah terbukti menjadi pendekatan dengan performa tinggi (*high performance*) dalam berbagai implementasi klasifikasi citra [2]. Efektivitas ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa sinergi tersebut mampu menghasilkan akurasi yang lebih unggul dibandingkan model tunggal karena memanfaatkan kekuatan lapisan konvolusi dalam mereduksi dimensi citra secara otomatis serta ketangguhan SVM dalam melakukan klasifikasi dengan margin maksimal [3], [4].

Selain itu, integrasi mekanisme atensi seperti *Convolutional Block Attention Module* (CBAM) menjadi krusial untuk menonjolkan fitur penting pada objek sampah dan menekan gangguan latar belakang (*noise*) yang sering muncul pada citra dunia nyata. Melalui penggunaan berbagai arsitektur CNN *pre-trained* seperti VGG16, ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, dan InceptionResNetV2, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kombinasi model hibrida yang paling efektif dalam meningkatkan akurasi dan ketangguhan klasifikasi citra sampah dunia nyata.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dilakukan penelitian dengan judul "ANALISIS ALGORITMA HYBRID CNN-SVM UNTUK KLASIFIKASI CITRA JENIS SAMPAH" untuk menguji efektivitas penggabungan kedua metode ini guna memberikan rekomendasi teknis bagi pengembangan sistem pemilahan sampah otomatis di masa depan.

Penggunaan berbagai arsitektur CNN *pre-trained* seperti VGG16, ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, dan InceptionResNetV2 memungkinkan pemanfaatan fitur generik yang telah dipelajari dari jutaan citra sehingga lebih adaptif terhadap variasi citra kompleks. Di sisi lain, algoritma Support Vector Machine (SVM) dikenal memiliki kinerja klasifikasi yang baik pada ruang fitur berdimensi tinggi serta kemampuan generalisasi yang kuat melalui konsep *maximum-margin classifier*. Kombinasi CNN sebagai *feature extractor* dan SVM sebagai klasifikator telah terbukti efektif di berbagai domain, termasuk klasifikasi medis dan pertanian.

Selain pemilihan arsitektur CNN, dibutuhkan pula mekanisme atensi yang mampu menonjolkan fitur penting dan menekan noise visual. Salah satu pendekatan yang relevan adalah penggunaan Convolutional Block Attention Module (CBAM) yang menggabungkan channel attention dan spatial attention untuk menyoroti kanal fitur dan lokasi piksel yang paling informatif bagi tugas klasifikasi. Integrasi CBAM di atas backbone CNN diharapkan dapat

meningkatkan kualitas fitur yang diberikan kepada SVM, khususnya pada citra sampah dunia nyata yang kompleks.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan dan analisis model hybrid CNN-SVM untuk klasifikasi citra jenis sampah dunia nyata menggunakan Real-World Waste Image Dataset dengan 9 kelas sampah, serta melakukan komparasi beberapa arsitektur CNN-SVM untuk mengidentifikasi model yang paling efektif dan efisien untuk diusulkan pada sistem pemilahan sampah otomatis.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan utama dalam penelitian ini berfokus pada rendahnya tingkat akurasi dan ketangguhan model klasifikasi citra sampah standar saat diimplementasikan pada data dunia nyata yang memiliki tingkat variabilitas visual yang tinggi, seperti kondisi objek yang kotor, tumpang tindih, serta pencahayaan yang tidak konsisten. Ketidakmampuan arsitektur model tunggal dalam menghasilkan batas pemisah yang optimal pada ruang fitur berdimensi tinggi menyebabkan terjadinya *generalization gap* yang signifikan antara hasil pengujian di laboratorium dengan performa di lapangan. Selain itu, terdapat kendala dalam menyeimbangkan antara peningkatan performa akurasi dengan efisiensi waktu komputasi yang dibutuhkan, sehingga diperlukan analisis mendalam untuk mengidentifikasi skema klasifikasi yang paling efektif dalam menangani karakteristik data citra sampah yang kompleks.

1.3. Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada aspek berikut.

- a. Dataset yang digunakan adalah Real-World Waste Image Dataset dengan 9 kategori kelas sampah dunia nyata.
- b. Model deep learning yang digunakan sebagai feature extractor terbatas pada arsitektur VGG16, DenseNet121, InceptionV3, InceptionResNetV2, dan ResNet50 yang telah dilatih sebelumnya (pre-trained) pada ImageNet.
- c. Modul atensi yang digunakan adalah Convolutional Block Attention Module (CBAM) yang disisipkan pada arsitektur CNN untuk memperkuat representasi fitur.
- d. Algoritma klasifikasi yang digunakan setelah ekstraksi fitur adalah Support Vector Machine (SVM).
- e. Evaluasi kinerja model menggunakan metrik accuracy, precision, recall, dan F1-score (rata-rata makro), sesuai dengan hasil yang disajikan pada Bab IV.

- f. Penelitian ini berfokus pada masalah klasifikasi citra (*image classification*), bukan deteksi objek (*object detection*) maupun segmentasi citra (*image segmentation*).

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

- Mengembangkan dan menguji implementasi algoritma hybrid CNN-SVM untuk klasifikasi citra jenis sampah dunia nyata.
- Melakukan analisis komparatif performa beberapa kombinasi arsitektur CNN-SVM untuk menentukan keunggulan model hibrida terhadap model tunggal dalam menghadapi kompleksitas dan variasi dataset citra sampah.
- Mengidentifikasi arsitektur CNN dan konfigurasi hyperparameter SVM yang menghasilkan kinerja terbaik, baik dari sisi akurasi tertinggi maupun trade-off antara akurasi, waktu komputasi, dan kebutuhan memori (misalnya membandingkan InceptionResNetV2-SVM dan DenseNet121-SVM).

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut.

- Kontribusi Data Science. Memberikan bukti empiris mengenai keunggulan pendekatan hybrid CNN-SVM dalam meningkatkan robustness model terhadap dataset citra yang kompleks dan noise pada domain computer vision, khususnya klasifikasi citra sampah dunia nyata.
- Rekomendasi Teknis. Menyediakan rekomendasi teknis mengenai kombinasi arsitektur CNN dan SVM yang paling efektif (misalnya rekomendasi Hybrid DenseNet121-SVM sebagai model paling seimbang antara kinerja dan efisiensi) untuk diintegrasikan ke dalam prototipe sistem pemilahan sampah otomatis di fasilitas pengelolaan sampah.
- Landasan Pengembangan Sistem. Menjadi landasan bagi penelitian lanjutan yang mengarah pada implementasi real-time dan integrasi dengan sistem edge computing atau perangkat tertanam untuk pemilahan sampah otomatis.

1.6. Sistematika Penulisan

Skipri ini akan disusun menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN Menjelaskan urgensi masalah generalization gap data, justifikasi teknis penggunaan algoritma hibrida, rumusan masalah, batasan, tujuan, dan manfaat penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA Menguraikan dasar teori Deep Learning, model arsitektur CNN sebagai feature extractor, prinsip kerja Support Vector Machine (SVM) sebagai klasifikator, serta penelitian terdahulu mengenai komparasi CNN vs. SVM dan model hibrida.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN Menjelaskan tahapan teknis, mulai dari pengumpulan dan pra-pemrosesan dataset citra sampah, perancangan arsitektur Hybrid CNN-SVM, skenario pengujian (komparasi model), hingga parameter evaluasi yang digunakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN Menyajikan hasil eksperimen training dan testing untuk semua model yang diuji. Pembahasan difokuskan pada analisis perbandingan metrik performa (accuracy, precision, recall, F1-score) dan efisiensi komputasi dari setiap model.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN Berisi kesimpulan berdasarkan hasil pengujian untuk menjawab rumusan masalah, serta saran untuk pengembangan penelitian lanjutan, seperti pengujian real-time atau eksplorasi arsitektur Vision Transformer.

