

Systematic Literature Review terhadap Model Deep Learning untuk Smart Waste Classification

Erwin Dwika Putra^{*1}, Anita Septiani Putri²

Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Bengkulu, Bengkulu, Indonesia^{1,2}

erwindwikap@gmail.com¹, asputri22@gmail.com²

*Corresponding author : erwindwikap@gmail.com¹

Abstrak— Perkembangan teknologi *Deep Learning* telah mendorong peningkatan penelitian mengenai *Smart Waste Classification* sebagai solusi otomatis untuk mendukung pengelolaan sampah yang lebih efektif dan berkelanjutan. Meskipun berbagai model telah dikembangkan, kajian komprehensif yang memetakan perkembangan arsitektur, dataset, metode evaluasi, dan arah penelitian masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menyusun *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap model *Deep Learning* pada *Smart Waste Classification* dengan mengikuti pedoman PRISMA 2020. Proses pencarian literatur dilakukan menggunakan aplikasi *Publish or Perish* pada beberapa basis data ilmiah dengan rentang publikasi tahun 2020–2025. Sebanyak 100 artikel berhasil diidentifikasi, kemudian melalui tahapan identifikasi, penyaringan, evaluasi kelayakan, dan seleksi hingga diperoleh 40 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Hasil sintesis menunjukkan bahwa *Convolutional Neural Network* (CNN) masih menjadi model yang paling banyak digunakan, diikuti oleh ResNet, MobileNet, EfficientNet, YOLO, dan *Vision Transformer*. Dataset TrashNet merupakan dataset yang paling dominan, sedangkan metrik evaluasi yang paling sering digunakan adalah *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, dan mAP. Penelitian juga mengidentifikasi bahwa tren terkini mengarah pada penerapan *transfer learning*, model ringan, serta integrasi dengan IoT dan *edge computing*. Kajian ini memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan *Smart Waste Classification* sekaligus menjadi referensi bagi pengembangan penelitian pada masa mendatang.

Abstract— The rapid advancement of *Deep Learning* has significantly contributed to the development of *Smart Waste Classification* systems for improving automated waste sorting and sustainable waste management. However, comprehensive studies that systematically summarize the evolution of *Deep Learning* models, datasets, evaluation methods, and future research directions remain limited. This study aims to conduct a *Systematic Literature Review* (SLR) on *Deep Learning* models applied to *Smart Waste Classification* by following the PRISMA 2020 guidelines. The literature search was performed using *Publish or Perish* across several scientific databases, covering publications from 2020 to 2025. A total of 100 studies were initially identified, and after the identification, screening, eligibility, and inclusion processes, 40 studies were selected for qualitative synthesis. The findings indicate that *Convolutional Neural Network* (CNN) remains the most widely adopted architecture, followed by ResNet, MobileNet, EfficientNet, YOLO, and *Vision Transformer*. TrashNet is the most frequently used dataset, while *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, and mean Average Precision (mAP) are the dominant evaluation metrics. Current research trends emphasize *transfer learning*, lightweight architectures, and the integration of *Deep Learning* with the Internet of Things (IoT) and *edge computing*. This review provides comprehensive insights into recent developments and identifies research opportunities for developing more accurate, efficient, and practical *Smart Waste Classification* systems.

Keywords— *Systematic Literature Review* (SLR); *Deep Learning*; *Smart Waste Classification*; *Convolutional Neural Network* (CNN); *Computer Vision*; *Transfer Learning*; *Waste Management*.

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



1. Pendahuluan

Permasalahan sampah merupakan salah satu tantangan global yang terus meningkat seiring pertumbuhan jumlah penduduk, urbanisasi, dan perkembangan sektor industri. Laporan berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan volume sampah tanpa pengelolaan yang baik menyebabkan pencemaran tanah, air, dan udara serta mengurangi efektivitas proses daur ulang. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi keberhasilan pengelolaan sampah adalah proses pemilahan berdasarkan jenis material. Hanya saja, proses pemilahan yang masih dilakukan secara manual memiliki berbagai keterbatasan, seperti membutuhkan waktu yang lama, biaya operasional yang tinggi, serta rentan terhadap kesalahan manusia (*human error*). Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem klasifikasi sampah yang mampu bekerja secara otomatis, cepat, dan akurat untuk mendukung konsep *Smart Waste Management* dan *Circular Economy* [1], [2], [3], [4], [5].

Perkembangan teknologi *Artificial Intelligence* (AI) telah memberikan solusi terhadap berbagai permasalahan klasifikasi citra, termasuk pada bidang pengelolaan sampah. Salah satu pendekatan yang menunjukkan performa terbaik adalah *Deep Learning*, khususnya *Convolutional Neural Network* (CNN) yang mampu melakukan ekstraksi fitur secara otomatis tanpa memerlukan proses *feature engineering* secara manual [2]. Dibandingkan metode *Machine Learning* konvensional, *Deep Learning* mampu menghasilkan tingkat akurasi yang lebih tinggi pada proses identifikasi berbagai jenis sampah seperti plastik, logam, kaca, kertas, karton, dan sampah organik [5]. Oleh karena itu, teknologi ini semakin banyak diimplementasikan pada sistem pengelolaan sampah pintar berbasis *Internet of Things* (IoT), robotika, maupun perangkat bergerak (*edge devices*) [6].

Seiring berkembangnya penelitian di bidang computer vision, berbagai arsitektur *Deep Learning* telah dikembangkan untuk meningkatkan performa klasifikasi sampah [2]. Beberapa model yang banyak digunakan antara lain AlexNet, VGG16, GoogLeNet, ResNet, DenseNet, MobileNet, EfficientNet, EfficientNetV2, hingga *Vision Transformer* (ViT) [6]. Selain model klasifikasi citra, beberapa penelitian terbaru juga mengimplementasikan algoritma object detection seperti YOLO, SSD, dan Faster R-CNN sehingga sistem mampu mendeteksi beberapa objek sampah secara bersamaan dalam kondisi nyata. Penggunaan transfer learning juga menjadi pendekatan yang banyak diterapkan karena mampu meningkatkan akurasi model meskipun jumlah data pelatihan relatif terbatas [7], [8], [9], [10].

Selain perkembangan model, penelitian mengenai klasifikasi sampah juga mengalami peningkatan dari sisi implementasi. Berbagai sistem telah dikembangkan dengan mengintegrasikan *Deep Learning* bersama IoT, *cloud computing*, sensor ultrasonik, *embedded system*, Raspberry Pi, serta robot pemilah sampah otomatis. Integrasi tersebut memungkinkan proses identifikasi, pemantauan kapasitas tempat sampah, hingga proses pemilahan dilakukan secara otomatis dan *real-time* [5]. Pendekatan ini menjadi salah satu implementasi penting dalam pembangunan *smart city* karena mampu meningkatkan efisiensi proses daur ulang sekaligus mengurangi biaya operasional pengelolaan sampah [8], [10], [11], [12], [13].

Walaupun berbagai model *Deep Learning* telah berhasil mencapai tingkat akurasi di atas 90%, implementasi sistem klasifikasi sampah masih menghadapi berbagai tantangan [14], [15]. Beberapa penelitian melaporkan bahwa variasi pencahayaan, sudut pengambilan gambar, objek yang saling bertumpuk (*occlusion*), latar belakang yang kompleks, serta ketidakseimbangan jumlah data pada setiap kelas masih menjadi faktor utama yang menurunkan performa model [1], [2], [16], [17], [18]. Selain itu, sebagian besar penelitian masih menggunakan dataset laboratorium sehingga kemampuan generalisasi model pada kondisi lingkungan nyata belum sepenuhnya optimal [7], [19], [20]. Oleh karena itu, pengembangan model yang ringan, cepat, dan memiliki kemampuan generalisasi tinggi masih menjadi fokus utama penelitian saat ini [21], [22], [23], [24].

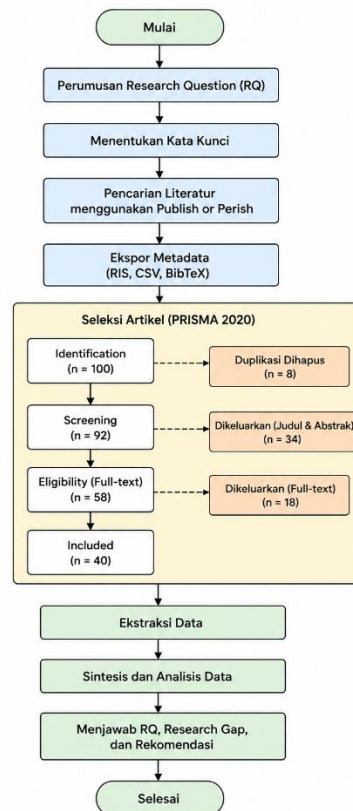
Dalam beberapa tahun terakhir, tren penelitian juga mulai mengarah pada penggunaan model yang lebih efisien seperti MobileNetV3, EfficientNet, *Vision Transformer*, serta pendekatan *ensemble learning* [2], [25], [26], [27]. Selain mengejar peningkatan akurasi, penelitian terbaru juga mulai mempertimbangkan ukuran model, kecepatan inferensi, konsumsi energi, serta kemampuan implementasi pada perangkat *edge computing* [5], [28], [29], [30]. Berbagai dataset publik seperti TrashNet, TACO, *RealWaste*, *ZeroWaste*, dan *Garbage Classification Dataset* juga semakin banyak digunakan sebagai tolok ukur untuk membandingkan performa berbagai model *Deep Learning* sehingga menghasilkan evaluasi yang lebih objektif [31], [32].

Meskipun telah banyak penelitian mengenai klasifikasi sampah menggunakan *Deep Learning*, sebagian besar artikel hanya berfokus pada pengembangan satu model tertentu atau membandingkan beberapa algoritma pada satu dataset [33], [34], [35], [36]. Sementara itu, kajian yang secara sistematis memetakan perkembangan arsitektur *Deep Learning*, karakteristik dataset, metode evaluasi, performa model, tantangan implementasi, serta arah penelitian masa depan masih relatif terbatas. Beberapa artikel survei yang tersedia juga masih menggabungkan *Machine Learning* dan *Deep Learning* secara umum sehingga belum memberikan gambaran khusus mengenai evolusi model *Deep Learning* untuk *Smart Waste Classification* [37], [38], [39], [40].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menyusun *Systematic Literature Review* (SLR) mengenai perkembangan model *Deep Learning* pada *Smart Waste Classification* dengan mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020). Kajian ini diharapkan mampu mengidentifikasi tren publikasi, model *Deep Learning* yang paling banyak digunakan, dataset yang dominan, metrik evaluasi yang diterapkan, tingkat performa model, tantangan implementasi, serta peluang penelitian di masa mendatang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti dalam menentukan model *Deep Learning* yang sesuai untuk pengembangan sistem klasifikasi sampah otomatis yang lebih akurat, efisien, dan siap diimplementasikan pada lingkungan nyata.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian mengenai penerapan model Deep Learning pada *Smart Waste Classification*. Metode SLR dipilih karena mampu memberikan kajian yang sistematis, objektif, transparan, dan dapat direplikasi sehingga menghasilkan sintesis pengetahuan yang komprehensif mengenai perkembangan penelitian pada suatu bidang. Pelaksanaan penelitian mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020) yang terdiri atas tahapan identifikasi (*identification*), penyaringan (*screening*), penilaian kelayakan (*eligibility*), dan inklusi (*inclusion*). Alur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur penelitian

Penelitian diawali dengan penyusunan *Research Question* (RQ) sebagai dasar dalam menentukan ruang lingkup kajian literatur. *Research Question* dirumuskan berdasarkan permasalahan yang telah diidentifikasi pada bagian pendahuluan, yaitu perkembangan model *Deep Learning* pada klasifikasi sampah cerdas, karakteristik dataset yang digunakan, metode evaluasi, performa model, serta tantangan dan peluang penelitian di masa mendatang. Keberadaan *Research Question* menjadi pedoman dalam menentukan strategi pencarian literatur, proses seleksi artikel, ekstraksi data, hingga sintesis hasil penelitian.

Proses pencarian literatur dilakukan menggunakan aplikasi *Publish or Perish* (PoP) dengan memanfaatkan beberapa basis data ilmiah, yaitu *Google Scholar*, *Crossref*, dan sumber publikasi yang terindeks pada *Scopus*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, serta *Wiley Online Library*. Pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci yang disusun dengan operator Boolean, yaitu ("*smart waste classification*" OR "*waste classification*" OR "*garbage classification*") AND ("*deep learning*" OR "*convolutional neural network*" OR *CNN* OR *ResNet* OR *MobileNet* OR *EfficientNet* OR *YOLO* OR *Vision Transformer*). Artikel yang dipertimbangkan merupakan artikel yang dipublikasikan pada rentang tahun 2020–2025, ditulis dalam bahasa Inggris, tersedia dalam bentuk full text, serta membahas penerapan *Deep Learning* pada klasifikasi sampah berbasis citra.

Hasil pencarian literatur kemudian diekspor ke dalam format RIS, CSV, dan BibTeX untuk memudahkan proses pengelolaan referensi, identifikasi artikel duplikat, serta dokumentasi data penelitian. Berdasarkan

proses identifikasi diperoleh sebanyak 100 artikel yang relevan dengan kata kunci penelitian. Selanjutnya dilakukan penghapusan artikel duplikat sehingga diperoleh 92 artikel yang memasuki tahap penyaringan. Proses *screening* dilakukan berdasarkan judul dan abstrak untuk menyeleksi artikel yang sesuai dengan fokus penelitian. Artikel yang tidak membahas klasifikasi sampah menggunakan *Deep Learning*, berupa artikel non-penelitian, atau tidak sesuai dengan tujuan penelitian dieliminasi pada tahap ini.

Artikel yang lolos tahap *screening* selanjutnya dievaluasi melalui pembacaan teks lengkap (*full-text assessment*) berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Kriteria inklusi meliputi artikel yang membahas penerapan model *Deep Learning* pada klasifikasi sampah berbasis citra, menjelaskan arsitektur model yang digunakan, menyajikan hasil evaluasi menggunakan metrik seperti *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, atau *mean Average Precision (mAP)*, serta dipublikasikan pada jurnal maupun prosiding ilmiah. Sementara itu, artikel yang hanya membahas pengelolaan sampah secara umum, menggunakan metode *Machine Learning* konvensional tanpa *Deep Learning*, tidak menyajikan hasil evaluasi model, atau tidak tersedia dalam bentuk teks lengkap dikeluarkan dari proses analisis. Berdasarkan proses tersebut diperoleh sebanyak 40 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan digunakan sebagai sumber utama dalam proses sintesis literatur.

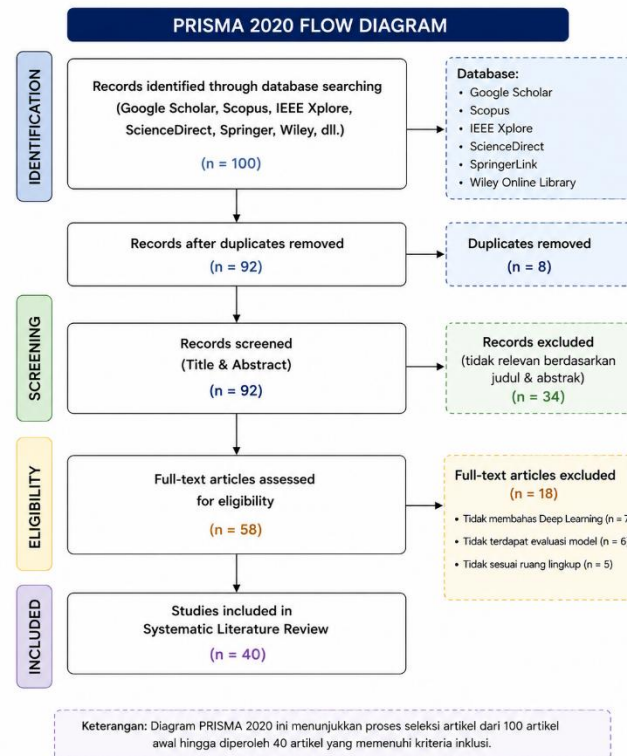
Tahap berikutnya adalah ekstraksi data terhadap 40 artikel terpilih. Informasi yang dikumpulkan meliputi nama penulis, tahun publikasi, tujuan penelitian, model *Deep Learning* yang digunakan, jenis dataset, metode pelatihan, metrik evaluasi, serta hasil utama yang dilaporkan pada masing-masing penelitian. Seluruh informasi tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam tabel sintesis untuk memudahkan proses analisis dan perbandingan antarpenelitian.

Data hasil ekstraksi selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi tren publikasi berdasarkan tahun, perkembangan arsitektur *Deep Learning* yang digunakan, karakteristik dataset, metode evaluasi, serta kecenderungan performa model pada berbagai skenario klasifikasi sampah. Selain itu, analisis juga difokuskan pada identifikasi tantangan implementasi, keterbatasan penelitian terdahulu, serta peluang pengembangan model *Deep Learning* yang lebih akurat, efisien, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan nyata. Hasil sintesis kemudian digunakan untuk menjawab setiap *Research Question*, mengidentifikasi *research gap*, serta merumuskan rekomendasi penelitian pada masa mendatang.

Seluruh tahapan penelitian didokumentasikan dan disajikan sesuai pedoman PRISMA 2020 agar proses seleksi artikel dapat ditelusuri secara sistematis dan transparan. Hasil penelitian selanjutnya disajikan dalam bentuk diagram PRISMA, tabel sintesis literatur, grafik tren publikasi, serta pembahasan naratif mengenai perkembangan model *Deep Learning* pada *Smart Waste Classification*, sehingga dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi penelitian terkini sekaligus menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan proses pencarian literatur menggunakan aplikasi *Publish or Perish* pada beberapa basis data ilmiah, diperoleh sebanyak 100 artikel yang berkaitan dengan penerapan *Deep Learning* pada klasifikasi sampah (*Smart Waste Classification*). Seluruh artikel yang diperoleh kemudian diekspor ke dalam format RIS, CSV, dan BibTeX untuk memudahkan proses pengelolaan referensi dan seleksi artikel. Tahapan seleksi dilakukan berdasarkan pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses (PRISMA 2020)* sebagaimana dijelaskan pada bagian metode penelitian. Pada tahap awal dilakukan identifikasi terhadap seluruh artikel, kemudian dilakukan penghapusan artikel duplikat sehingga tersisa 92 artikel. Selanjutnya dilakukan proses *screening* berdasarkan judul dan abstrak yang mengakibatkan 34 artikel dieliminasi karena tidak sesuai dengan ruang lingkup penelitian, seperti membahas sistem pengelolaan sampah secara umum, metode *Machine Learning* konvensional, atau topik yang tidak berfokus pada klasifikasi sampah berbasis citra. Sebanyak 58 artikel kemudian memasuki tahap penilaian kelayakan melalui pembacaan teks lengkap (*full-text assessment*). Setelah dilakukan evaluasi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, sebanyak 18 artikel dikeluarkan karena tidak menjelaskan metode *Deep Learning* secara rinci, tidak menyajikan hasil evaluasi model, atau tidak memiliki keterkaitan langsung dengan topik penelitian. Dengan demikian, diperoleh 40 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan digunakan sebagai sumber utama dalam proses sintesis literatur. Proses seleksi tersebut ditunjukkan pada **Gambar 2** menggunakan diagram PRISMA 2020.



Gambar 2. Diagram PRISMA

Hasil analisis terhadap 40 artikel menunjukkan bahwa penelitian mengenai *Smart Waste Classification* mengalami perkembangan yang cukup pesat dalam lima tahun terakhir. Berdasarkan distribusi tahun publikasi, penelitian mulai meningkat sejak tahun 2020 dan mencapai jumlah publikasi tertinggi pada tahun 2022. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa klasifikasi sampah berbasis *Deep Learning* menjadi salah satu topik yang semakin mendapatkan perhatian dari para peneliti, terutama seiring berkembangnya konsep *Smart City*, *Internet of Things (IoT)*, dan *Circular Economy*. Setelah tahun 2022, jumlah publikasi masih relatif stabil meskipun mengalami sedikit penurunan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa fokus penelitian mulai bergeser dari sekadar meningkatkan akurasi klasifikasi menuju pengembangan model yang lebih efisien, ringan, dan mampu diimplementasikan pada perangkat dengan sumber daya terbatas.

Berdasarkan karakteristik metode yang digunakan, mayoritas penelitian masih didominasi oleh *Convolutional Neural Network (CNN)* beserta berbagai pengembangannya. Model CNN digunakan sebagai dasar klasifikasi citra karena memiliki kemampuan yang baik dalam mengekstraksi fitur visual secara otomatis. Seiring berkembangnya penelitian, penggunaan arsitektur yang lebih dalam seperti ResNet, DenseNet, MobileNet, dan EfficientNet mulai meningkat karena mampu menghasilkan performa klasifikasi yang lebih tinggi dibandingkan CNN konvensional. Selain itu, beberapa penelitian juga memanfaatkan pendekatan *transfer learning* dengan memanfaatkan model yang telah dilatih sebelumnya (*pre-trained model*) sehingga mampu meningkatkan akurasi meskipun jumlah data pelatihan relatif terbatas. Pendekatan tersebut menjadi salah satu solusi yang banyak diterapkan karena proses pelatihan menjadi lebih cepat serta membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih rendah.

Selain model klasifikasi citra, hasil sintesis juga menunjukkan adanya peningkatan penggunaan metode *object detection*, khususnya keluarga algoritma YOLO (*You Only Look Once*) dan *Single Shot Detector (SSD)*. Berbeda dengan CNN yang hanya mengklasifikasikan satu objek pada sebuah citra, algoritma *object detection* mampu mengenali beberapa objek sampah secara bersamaan beserta posisi masing-masing objek. Kemampuan tersebut sangat penting dalam implementasi sistem pemilahan sampah otomatis karena kondisi nyata umumnya terdiri atas beberapa jenis sampah yang saling bertumpuk dengan latar belakang yang kompleks. Pada penelitian yang lebih baru, mulai ditemukan penggunaan *Vision Transformer (ViT)* dan model hibrida yang mengombinasikan CNN dengan mekanisme attention untuk meningkatkan kemampuan model dalam mengenali objek dengan variasi bentuk, warna, dan ukuran yang lebih beragam. Hasil analisis terhadap *dataset* menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian menggunakan dataset publik sebagai media pelatihan dan pengujian model. Dataset TrashNet masih menjadi dataset yang paling banyak

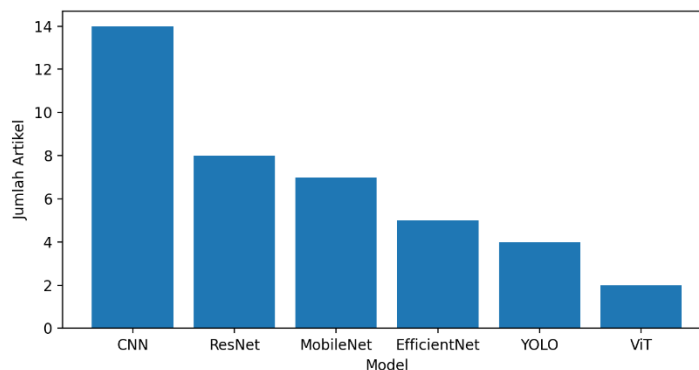
digunakan karena menyediakan citra berbagai jenis sampah yang telah diberi label secara terstruktur. Selain itu, beberapa penelitian mulai menggunakan dataset TACO (*Trash Annotations in Context*), *RealWaste*, *ZeroWaste*, serta dataset yang dikembangkan secara mandiri sesuai kondisi lingkungan penelitian. Penggunaan dataset yang lebih beragam menunjukkan adanya upaya untuk meningkatkan kemampuan generalisasi model agar mampu bekerja pada kondisi nyata dengan variasi pencahayaan, sudut pengambilan gambar, dan latar belakang yang berbeda. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih menggunakan dataset dengan jumlah kelas yang relatif sedikit sehingga kemampuan model dalam mengidentifikasi jenis sampah yang lebih kompleks masih menjadi tantangan.

Ditinjau dari metode evaluasi, hampir seluruh penelitian menggunakan *accuracy* sebagai metrik utama untuk mengukur performa model. Selain itu, beberapa penelitian juga menggunakan *precision*, *recall*, *F1-score*, dan mean Average Precision (mAP) terutama pada penelitian yang menerapkan metode *object detection*. Penggunaan beberapa metrik evaluasi secara bersamaan memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kemampuan model dalam melakukan klasifikasi maupun deteksi objek. Berdasarkan hasil sintesis, model-model *Deep Learning modern* secara umum mampu menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan metode *Machine Learning* konvensional, khususnya pada dataset dengan jumlah data yang besar dan kualitas citra yang baik. Penerapan *transfer learning* juga terbukti mampu meningkatkan performa klasifikasi sekaligus mempercepat proses pelatihan model.

Tabel 1. Perbandingan Model Deep Learning

Model	Karakteristik	Kelebihan	Kekurangan	Implementasi Smart Waste Classification
CNN	Ekstraksi fitur otomatis	Arsitektur sederhana, akurasi baik	Membutuhkan dataset cukup besar	Sangat banyak digunakan
ResNet	Residual Learning	Mengatasi vanishing gradient, akurasi tinggi	Parameter lebih banyak	Banyak digunakan pada dataset kompleks
MobileNet	Lightweight CNN	Ringan, cepat, cocok perangkat mobile	Akurasi sedikit di bawah ResNet	Cocok untuk Smart Bin dan IoT
EfficientNet	Compound Scaling	Akurasi tinggi dengan parameter lebih sedikit	Proses tuning lebih kompleks	Banyak digunakan sejak 2022
YOLO	Object Detection	Deteksi real-time banyak objek	Membutuhkan anotasi bounding box	Cocok untuk conveyor dan robot sortir
Vision Transformer (ViT)	Attention Mechanism	Mampu mengenali objek kompleks	Membutuhkan dataset besar	Masih mulai berkembang

Meskipun perkembangan penelitian menunjukkan hasil yang sangat baik, hasil kajian ini juga mengidentifikasi beberapa tantangan yang masih sering ditemukan. Permasalahan yang paling banyak dilaporkan adalah ketidakseimbangan jumlah data pada setiap kelas (*class imbalance*), keterbatasan ukuran dataset, variasi kondisi pencahayaan, objek yang saling bertumpuk (*occlusion*), serta kompleksitas latar belakang citra. Selain itu, sebagian besar penelitian masih melakukan pengujian pada lingkungan laboratorium sehingga kemampuan model ketika diimplementasikan pada lingkungan nyata belum sepenuhnya dapat dibuktikan. Tantangan lain adalah kebutuhan komputasi yang relatif tinggi pada model *Deep Learning* berukuran besar sehingga implementasinya pada perangkat bergerak (*edge devices*) masih memerlukan proses optimasi.



Gambar 3. Grafik model deeplearning

Berdasarkan sintesis terhadap 40 artikel yang memenuhi kriteria inklusi, model *Convolutional Neural Network* (CNN) masih menjadi arsitektur yang paling banyak digunakan, yaitu sebanyak 14 artikel (35%). Dominasi CNN disebabkan oleh kemampuannya dalam melakukan ekstraksi fitur citra secara otomatis dengan kompleksitas yang relatif rendah dibandingkan arsitektur yang lebih baru. Seiring perkembangan penelitian, penggunaan model berbasis ResNet, MobileNet, dan EfficientNet mengalami peningkatan karena mampu memberikan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi. Sementara itu, algoritma YOLO lebih banyak digunakan pada penelitian yang berfokus pada deteksi objek secara real-time, sedangkan *Vision Transformer* (ViT) mulai diterapkan pada penelitian terkini sebagai alternatif arsitektur berbasis mekanisme *attention*.

Analisis terhadap dataset menunjukkan bahwa TrashNet merupakan dataset yang paling banyak digunakan pada penelitian klasifikasi sampah karena menyediakan citra berbagai jenis sampah dengan label yang terstruktur. Selain itu, beberapa penelitian memanfaatkan TACO, RealWaste, dan ZeroWaste untuk meningkatkan kemampuan generalisasi model pada kondisi lingkungan nyata. Sebagian peneliti juga mengembangkan dataset kustom sesuai dengan karakteristik sampah dan lingkungan penelitian masing-masing. Keberagaman dataset tersebut menunjukkan adanya upaya meningkatkan robustnes model *Deep Learning* agar mampu bekerja pada berbagai kondisi pencahayaan, latar belakang, dan variasi objek sampah.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menyusun Systematic Literature Review terhadap perkembangan model *Deep Learning* pada *Smart Waste Classification* berdasarkan 40 artikel yang lolos proses seleksi PRISMA 2020. Hasil kajian menunjukkan bahwa CNN masih menjadi arsitektur yang paling banyak digunakan, sementara ResNet, MobileNet, EfficientNet, YOLO, dan *Vision Transformer* semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan akurasi maupun efisiensi komputasi. Selain itu, penggunaan *transfer learning* dan dataset publik seperti TrashNet, TACO, RealWaste, dan ZeroWaste menjadi faktor penting dalam meningkatkan performa model. Meskipun sebagian besar penelitian telah menghasilkan performa yang tinggi, masih terdapat berbagai tantangan seperti keterbatasan dataset, ketidakseimbangan kelas, variasi kondisi lingkungan, serta kebutuhan implementasi pada perangkat dengan sumber daya terbatas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan model yang lebih ringan, memiliki kemampuan generalisasi yang lebih baik, serta mampu diimplementasikan secara *real-time* melalui integrasi dengan IoT, *edge computing*, dan sistem *Smart City*. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti dalam menentukan model *Deep Learning* yang sesuai untuk pengembangan sistem klasifikasi sampah otomatis yang lebih akurat, efisien, dan berkelanjutan.

5. Daftar Pustaka

- [1] F. Fotovvatikhah, I. Ahmedy, R. M. Noor, and M. U. Munir, "A Systematic Review of AI-Based Techniques for Automated Waste Classification," *Sensors*, vol. 25, no. 10, p. 3181, May 2025, doi: 10.3390/s25103181.
- [2] H. Abdu and M. H. Mohd Noor, "A Survey on Waste Detection and Classification Using Deep Learning," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 128151–128165, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3226682.
- [3] D. V. Yevle and P. S. Mann, "Artificial Intelligence-Based Waste Management: A Review of Classification, Techniques, Issues, and Challenges," *Wiley Interdiscip. Rev. Data Min. Knowl. Discov.*, vol. 15, no. 2, Jun. 2025, doi: 10.1002/widm.70025.
- [4] D. V. Yevle and P. S. Mann, "Artificial intelligence based classification for waste management: A survey based on taxonomy, classification & future direction," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 56, p. 100723, May 2025, doi: 10.1016/j.cosrev.2024.100723.
- [5] C. Wang, J. Qin, C. Qu, X. Ran, C. Liu, and B. Chen, "A smart municipal waste management system based on deep-learning and Internet of Things," *Waste Manag.*, vol. 135, pp. 20–29, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.028.
- [6] Q. Zhang, Q. Yang, X. Zhang, Q. Bao, J. Su, and X. Liu, "Waste image classification based on transfer learning and convolutional neural network," *Waste Manag.*, vol. 135, pp. 150–157, Nov.

- 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.038.
- [7] S. Zhang, Y. Chen, Z. Yang, and H. Gong, "Computer Vision Based Two-stage Waste Recognition-Retrieval Algorithm for Waste Classification," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 169, p. 105543, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105543.
- [8] B. Fu, S. Li, J. Wei, Q. Li, Q. Wang, and J. Tu, "A Novel Intelligent Garbage Classification System Based on Deep Learning and an Embedded Linux System," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 131134–131146, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114496.
- [9] A. Altikat, A. Gulbe, and S. Altikat, "Intelligent solid waste classification using deep convolutional neural networks," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1285–1292, Mar. 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03179-4.
- [10] J. Sousa, A. Rebelo, and J. S. Cardoso, "Automation of Waste Sorting with Deep Learning," in *Proceedings - 15th Workshop of Computer Vision, WVC 2019*, IEEE, Sep. 2019, pp. 43–48. doi: 10.1109/WVC.2019.8876924.
- [11] C. Srinilta and S. Kanharattanachai, "Municipal solid waste segregation with CNN," in *Proceeding - 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ICEAST 2019*, IEEE, Jul. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEAST.2019.8802522.
- [12] S. R., R. P., V. S., K. R., and G. M., "Deep Learning based Smart Garbage Classifier for Effective Waste Management," in *2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, IEEE, Jun. 2020, pp. 1086–1089. doi: 10.1109/iccес48766.2020.9137938.
- [13] L. Ahmed, K. Ahmad, N. Said, B. Qolomany, J. Qadir, and A. Al-Fuqaha, "Active Learning Based Federated Learning for Waste and Natural Disaster Image Classification," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208518–208531, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038676.
- [14] 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," 2022, *mdpi.com*. doi: 10.3390/app12052281.
- [15] M. Malik *et al.*, "Waste Classification for Sustainable Development Using Image Recognition with Deep Learning Neural Network Models," 2022, *mdpi.com*. doi: 10.3390/su14127222.
- [16] N. N. I. Prova, "Garbage Intelligence: Utilizing Vision Transformer for Smart Waste Sorting," *2nd Int. Conf. Intell. Cyber Phys. Syst. Internet Things, ICoICI 2024 - Proc.*, pp. 1213–1219, 2024, doi: 10.1109/ICoICI62503.2024.10696177.
- [17] Y. Zhou *et al.*, "Optimization of automated garbage recognition model based on ResNet-50 and weakly supervised CNN for sustainable urban development," 2024, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.aej.2024.07.066.
- [18] N. Nursetiawati and S. Fuqaha, "Smart Waste Management in Indonesia: A Review of AI and IoT Applications," 2024, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Sameh-Fuqaha-2/publication/406051826_Smart_Waste_Management_in_Indonesia_A_Review_of_AI_and_IoT_Application_Challenges_and_Future_Directions_for_Sustainable_Solutions/links/6a23a8af26f6ce706a7f1fad/Smart-Waste-Management-in-Indonesia-A-Review-of-AI-and-IoT-Application-Challenges-and-Future-Directions-for-Sustainable-Solutions.pdf
- [19] 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.
- [20] S. Jin, Z. Yang, G. Królczyk, X. Liu, P. Gardoni, and Z. Li, "Garbage detection and classification using a new deep learning-based machine vision system as a tool for sustainable waste recycling," *Waste Manag.*, vol. 162, pp. 123–130, 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.02.014.

-
- [21] S. Thokrairak, K. Thibuy, and P. Jitngernmadan, "Valuable Waste Classification Modeling based on SSD-MobileNet," in *InCIT 2020 - 5th International Conference on Information Technology*, IEEE, Oct. 2020, pp. 228–232. doi: 10.1109/InCIT50588.2020.9310928.
- [22] A. Tehrani and H. Karbasi, "A novel integration of hyper-spectral imaging and neural networks to process waste electrical and electronic plastics," in *2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2017*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/SusTech.2017.8333533.
- [23] A. Wulansari, A. Setyanto, and E. T. Luthfi, "Systematic Literature Review of Waste Classification Using Machine Learning," *J. Informatics Telecommun. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 405–413, Jan. 2022, doi: 10.31289/jite.v5i2.6211.
- [24] W. Liu, J. Jiang, N. Li, Y. Wang, K. Liu, and C. Zhao, "A Garbage Intelligent Classification and Recycling System Based on Deep Learning," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 243, pp. 744–750, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.09.089.
- [25] N. Baker, P. Szabo-Müller, and U. Handmann, "Transfer learning-based method for automated e-waste recycling in smart cities," *EAI Endorsed Trans. Smart Cities*, p. 169337, 2018, doi: 10.4108/eai.16-4-2021.169337.
- [26] A. Lakhout, "Revolutionizing urban solid waste management with AI and IoT: A review of smart solutions for waste collection, sorting, and recycling," 2025, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.rineng.2025.104018.
- [27] P. Suresh, R. H. Aswathy, and M. J. Varma, "Eco Vision: A Deep Learning Framework for Intelligent Waste Classification and Sustainable Management," *Proc. 2025 3rd Int. Conf. Inven. Comput. Informatics, ICICI 2025*, pp. 1171–1175, 2025, doi: 10.1109/ICICI65870.2025.11069569.
- [28] U. K. Lilhore, S. Simaiya, S. Dalal, and R. Damaševičius, "A smart waste classification model using hybrid CNN-LSTM with transfer learning for sustainable environment," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 10, pp. 29505–29529, 2024, doi: 10.1007/s11042-023-16677-z.
- [29] T. J. Sheng *et al.*, "An Internet of Things Based Smart Waste Management System Using LoRa and Tensorflow Deep Learning Model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 148793–148811, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016255.
- [30] M. M. Hossen *et al.*, "A Reliable and Robust Deep Learning Model for Effective Recyclable Waste Classification," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 13809–13821, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3354774.
- [31] J. Wang, "Application research of image classification algorithm based on deep learning in household garbage sorting," *Heliyon*, vol. 10, no. 9, p. e29966, May 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29966.
- [32] K. Demir and O. Yaman, "Projector deep feature extraction-based garbage image classification model using underwater images," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 33, pp. 79437–79451, Mar. 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18731-w.
- [33] N. Li and Y. Chen, "Municipal solid waste classification and real-time detection using deep learning methods," *Urban Clim.*, vol. 49, 2023, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101462.
- [34] 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, 2023, doi: 10.1007/s11042-021-11537-0.
- [35] M. S. Nafiz, S. S. Das, M. K. Morol, A. Al Juabir, and D. Nandi, "ConvoWaste: An Automatic Waste Segregation Machine Using Deep Learning," *Int. Conf. Robot. Electr. Signal Process. Tech.*, vol. 2023-January, pp. 181–186, 2023, doi: 10.1109/ICREST57604.2023.10070078.

- [36] D. Demetriou, P. Mavromatidis, P. M. Robert, H. Papadopoulos, M. F. Petrou, and D. Nicolaides, "Real-time construction demolition waste detection using state-of-the-art deep learning methods; single – Stage vs two-stage detectors," 2023, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.wasman.2023.05.039.
- [37] S. Shahab and M. Anjum, "Solid Waste Management Scenario in India and Illegal Dump Detection Using Deep Learning: An AI Approach towards the Sustainable Waste Management," 2022, *mdpi.com*. doi: 10.3390/su142315896.
- [38] M. W. Rahman, R. Islam, A. Hasan, N. I. Bithi, M. M. Hasan, and M. M. Rahman, "Intelligent waste management system using deep learning with IoT," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, no. 5, pp. 2072–2087, May 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2020.08.016.
- [39] H. Abdu and M. H. Mohd Noor, "A Survey on Waste Detection and Classification Using Deep Learning," *IEEE Access*, vol. 10, no. 4, pp. 128151–128165, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3226682.
- [40] S. M. Cheema, A. Hannan, and I. M. Pires, "Smart Waste Management and Classification Systems Using Cutting Edge Approach," 2022, *mdpi.com*. doi: 10.3390/su141610226.

6. Penulis



Erwin Dwika Putra
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Bengkulu,
Bengkulu, Indonesia
Penulis merupakan tenaga pendidik di Program Studi Teknik Informatika
Universitas Muhammadiyah Bengkulu



Anita Septiani Putri
Fakultas Teknik, Universitas Muhamadiyah Bengkulu,
Bengkulu, Indonesia