

## REVIEW PENGGUNAAN MACHINE LEARNING DALAM OPTIMALISASI PENGELOLAAN SAMPAH PERKOTAAN: STUDI LITERATUR TERKINI

Bagus Irawan<sup>1\*</sup>, Syafrudin Syafrudin<sup>2</sup> Mochamad Arief Budihardjo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Diponegoro, Semarang

<sup>2,3</sup>Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Diponegoro, Semarang

\*Penulis korespondensi: [bagusirawan.mt@gmail.com](mailto:bagusirawan.mt@gmail.com)

### ABSTRAK

Pengelolaan sampah perkotaan merupakan isu global yang mendesak seiring dengan meningkatnya populasi dan urbanisasi. Teknologi pengelolaan sampah tradisional memiliki keterbatasan yang signifikan, sehingga diperlukan pendekatan baru yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penggunaan teknologi machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan semakin mendapat perhatian karena dapat membantu dalam berbagai aspek keberlanjutan seperti pemilahan otomatis, prediksi volume sampah, dan optimasi rute pengangkutan. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau literatur terkini mengenai penggunaan machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan. Tujuan utama penelitian ini adalah mengidentifikasi tren utama, metodologi yang digunakan, hasil utama, serta tantangan dan peluang yang ada. Hasil review menunjukkan bahwa machine learning menawarkan solusi inovatif dan efektif dalam pengelolaan sampah. Namun, implementasinya memerlukan data berkualitas tinggi dan infrastruktur teknologi yang memadai.

**Kata kunci:** pengelolaan sampah, machine learning, optimasi, studi literatur, perkotaan

### 1 PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah perkotaan merupakan isu global yang mendesak dan kompleks yang dihadapi oleh banyak kota di seluruh dunia. Dengan semakin bertambahnya populasi dan urbanisasi, volume sampah perkotaan meningkat secara signifikan. Di sisi lain, kapasitas pengelolaan sampah yang efektif seringkali tidak mampu mengikuti laju peningkatan tersebut, sehingga menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan dan Kesehatan masyarakat (Ameer et al., 2024; Anshassi & Townsend, 2024; Ayeleru et al., 2021).

Teknologi pengelolaan sampah tradisional yang sering digunakan, seperti pembuangan di tempat pembuangan akhir (TPA) dan pembakaran, memiliki keterbatasan dan dampak negatif tersendiri, termasuk emisi gas rumah kaca dan pencemaran tanah serta air (Al-Hazmi et al., 2024; Baghel et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang lebih efisien dan berkelanjutan untuk mengelola sampah perkotaan.

Salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian adalah penggunaan teknologi machine learning dalam optimalisasi pengelolaan sampah perkotaan. Machine learning dapat membantu dalam berbagai aspek pengelolaan sampah, mulai dari pemilahan otomatis, prediksi volume sampah, hingga optimasi rute pengangkutan sampah (Chen et al., 2024; Giri & Roy, 2024). Teknologi ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat berdasarkan

analisis data yang besar dan kompleks, yang sulit dilakukan dengan metode konvensional (Bibri et al., 2024; Darıcı et al., 2024).

Dengan semakin berkembangnya teknologi machine learning dan ketersediaan data yang lebih baik, penelitian ini bertujuan untuk meninjau literatur terkini mengenai penggunaan machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan. Melalui studi literatur ini, diharapkan dapat diidentifikasi tren, metodologi yang digunakan, hasil utama, serta tantangan dan peluang yang ada dalam penerapan machine learning di bidang ini (Ding et al., 2021; Kurniawan et al., 2024).

Pengelolaan sampah perkotaan telah menjadi fokus penelitian yang intensif, mengingat dampak negatifnya terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat jika tidak dikelola dengan baik. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa teknologi tradisional seperti tempat pembuangan akhir (TPA) dan pembakaran sampah memiliki keterbatasan signifikan, termasuk emisi gas rumah kaca dan pencemaran tanah serta air (Al-Hazmi et al., 2024; Baghel et al., 2024). Selain itu, pendekatan ini seringkali tidak dapat mengimbangi peningkatan volume sampah yang terus bertambah seiring dengan urbanisasi dan pertumbuhan populasi (Almulhim & Cobbinah, 2024; Ayeleru et al., 2021).

Sebagai alternatif, teknologi berbasis machine learning telah mulai diterapkan untuk mengatasi masalah ini. Machine learning menawarkan solusi yang lebih efisien dalam berbagai aspek pengelolaan sampah, termasuk pemilahan otomatis, prediksi volume sampah, dan optimasi rute pengangkutan (Bibri et al., 2024; Giri & Roy, 2024). Penelitian menunjukkan bahwa machine learning dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam pemilahan sampah, yang merupakan langkah penting dalam proses daur ulang (Chen et al., 2024; Li & Chen, 2023). Selain itu, studi oleh Darıcı et al. (2024) menyoroti penggunaan machine learning untuk memprediksi tren volume sampah, memungkinkan perencanaan yang lebih baik dan alokasi sumber daya yang optimal.

Metodologi yang digunakan dalam penelitian-penelitian ini bervariasi, mulai dari penggunaan algoritma supervised learning seperti decision trees dan random forests, hingga teknik unsupervised learning seperti clustering (Chen et al., 2024; Ding et al., 2021; Li & Chen, 2023). Studi-studi ini menunjukkan bahwa penerapan machine learning dapat menghasilkan hasil yang signifikan dalam peningkatan efisiensi dan efektivitas pengelolaan sampah perkotaan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis penerapan teknologi machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan. Dengan melakukan review literatur terkini, penelitian ini berusaha untuk:

- Mengidentifikasi tren utama dalam penggunaan machine learning untuk pengelolaan sampah.
- Mengevaluasi metodologi yang umum digunakan dalam penelitian ini.
- Mengidentifikasi hasil utama dari studi-studi sebelumnya.
- Menyoroti tantangan dan peluang dalam penerapan machine learning di bidang ini.
- Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi pengembangan teknologi pengelolaan sampah yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan.

## **2 METODE**

### **2.1 Metode Pengumpulan Data**

Proses pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui identifikasi dan seleksi literatur yang relevan dari berbagai sumber. Tahap pertama melibatkan pencarian literatur menggunakan basis data akademik seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan Scopus. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi "machine learning," "pengelolaan sampah perkotaan," "teknologi pengelolaan sampah," dan "optimasi sampah." Setelah literatur yang relevan ditemukan, artikel-artikel tersebut dianalisis berdasarkan relevansi dan kontribusinya terhadap topik penelitian ini. Literatur yang terpilih kemudian disimpan dan dikelola menggunakan perangkat lunak manajemen referensi Mendeley.

### **2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi**

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk memastikan bahwa hanya studi yang relevan dan berkualitas tinggi yang dimasukkan dalam review ini. Kriteria inklusi meliputi:

- Studi yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2020-2024) untuk memastikan informasi yang diperoleh adalah yang terbaru.
- Artikel yang membahas penerapan machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan.
- Studi yang dipublikasikan dalam jurnal terindeks dan prosiding konferensi terkemuka.
- Artikel yang ditulis dalam bahasa Inggris dan/atau bahasa Indonesia.

Kriteria eksklusi meliputi:

- Studi yang tidak secara eksplisit membahas penerapan machine learning dalam konteks pengelolaan sampah.
- Artikel yang hanya berfokus pada teknologi pengelolaan sampah tanpa menyertakan komponen machine learning.
- Studi yang tidak peer-reviewed atau diterbitkan dalam jurnal yang tidak terindeks.

### **2.3 Analisis Data**

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan beberapa tahapan. Pertama, data dikategorikan berdasarkan tema utama yang ditemukan dalam literatur, seperti jenis algoritma machine learning yang digunakan, aplikasi spesifik dalam pengelolaan sampah, dan hasil serta temuan utama dari studi-studi tersebut. Kedua, analisis kualitatif dilakukan untuk mengidentifikasi tren dan pola dalam penggunaan machine learning untuk pengelolaan sampah perkotaan. Teknik coding manual digunakan untuk mengidentifikasi tema dan subtema dalam literatur yang direview (Darıcı et al., 2024; Ding et al., 2021). Terakhir, analisis kuantitatif dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak analisis data seperti NVivo untuk menghitung frekuensi kemunculan tema-tema tertentu dan mengidentifikasi hubungan antar tema (Ayeleru et al., 2021; Bibri et al., 2024).

## **3 HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **3.1 Tren Penggunaan Machine Learning**

Penggunaan machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan telah menunjukkan perkembangan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Tren utama yang teridentifikasi meliputi prediksi volume sampah, klasifikasi jenis sampah, optimasi rute pengumpulan sampah,

dan peningkatan efisiensi daur ulang. **Gambar 1** menunjukkan berbagai tren utama dalam penggunaan machine learning untuk pengelolaan sampah perkotaan. Beberapa aplikasi termasuk prediksi volume sampah menggunakan neural network dan support vector machine, klasifikasi jenis sampah dengan convolutional neural network, decision tree, dan random forest, serta optimasi rute pengumpulan menggunakan algoritma genetic dan ant colony optimization.



**Gambar 1.** Tren Penggunaan Machine Learning dalam Pengelolaan Sampah Perkotaan

### 3.1.1 Prediksi Volume Sampah

Salah satu aplikasi utama machine learning adalah dalam prediksi volume sampah yang dihasilkan di perkotaan. Model prediktif seperti neural network dan support vector machine (SVM) digunakan untuk memprediksi volume sampah berdasarkan data historis dan variabel lingkungan lainnya. Studi oleh Ayeleru et al. (2021) menunjukkan bahwa artificial neural network (ANN) dan SVM dapat memberikan akurasi yang tinggi dalam memprediksi jumlah sampah di Johannesburg, Afrika Selatan.

### 3.1.2 Klasifikasi Jenis Sampah

Machine learning juga digunakan untuk klasifikasi jenis sampah. Algoritma seperti decision tree, random forest, dan convolutional neural network (CNN) telah diterapkan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan berbagai jenis sampah secara otomatis. Penelitian oleh Zhang et al. (2023) menggunakan model deep learning untuk klasifikasi sampah padat perkotaan dengan tingkat akurasi yang tinggi.

### 3.1.3 Optimasi Rute Pengumpulan Sampah

Optimasi rute pengumpulan sampah adalah area lain di mana machine learning memberikan kontribusi yang signifikan. Algoritma optimasi seperti genetic algorithms dan ant colony optimization digunakan untuk menentukan rute pengumpulan sampah yang paling efisien, mengurangi waktu dan biaya operasional. Choudhary & Agarwal (2024) menyoroti penggunaan machine learning untuk seleksi rute pengumpulan sampah yang real-time untuk memaksimalkan cakupan spasial dan temporal.

#### 3.1.4 Peningkatan Efisiensi Daur Ulang

Selain itu, machine learning digunakan untuk meningkatkan efisiensi proses daur ulang. Algoritma machine learning membantu dalam segregasi otomatis bahan daur ulang dan mengoptimalkan proses pengolahan limbah. Studi oleh Ma et al. (2023) mengembangkan model sistem dinamis untuk menilai dampak kebijakan pada penawaran dan permintaan agregat daur ulang, menunjukkan peningkatan efisiensi daur ulang dengan bantuan machine learning.

Secara keseluruhan, penerapan machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi tantangan pengelolaan sampah yang kompleks. Namun, tantangan teknis dan operasional seperti kebutuhan data berkualitas tinggi, integrasi teknologi, dan penerimaan masyarakat tetap harus diatasi untuk memaksimalkan manfaat dari teknologi ini (Bibri et al., 2024; Sharifi et al., 2024).

### 3.2 Metodologi yang Digunakan

Dalam pengelolaan sampah perkotaan, beberapa metodologi machine learning yang umum digunakan meliputi regresi, klasifikasi, clustering, dan algoritma optimasi. Masing-masing metode ini memiliki keunggulan dan aplikasi spesifik dalam konteks pengelolaan sampah.

#### 3.2.1 Regresi

Regresi adalah teknik prediktif yang digunakan untuk memperkirakan nilai berkelanjutan dari data sampah berdasarkan variabel input. Contoh penerapannya adalah model regresi linier dan regresi logistik yang digunakan untuk memprediksi volume sampah yang dihasilkan berdasarkan data historis dan faktor-faktor lingkungan. Penelitian oleh Ayeleru et al. (2021) menggunakan regresi untuk memprediksi jumlah sampah di Johannesburg dengan akurasi yang memadai.

#### 3.2.2 Klasifikasi

Klasifikasi digunakan untuk mengidentifikasi dan mengategorikan jenis sampah. Algoritma seperti decision tree, random forest, dan support vector machines (SVM) sering digunakan dalam aplikasi ini. Misalnya, Zhang et al. (2023) menggunakan model deep learning untuk klasifikasi jenis sampah dengan tingkat akurasi yang tinggi, memungkinkan proses daur ulang yang lebih efisien.

#### 3.2.3 Clustering

Clustering adalah teknik unsupervised learning yang digunakan untuk mengelompokkan data sampah berdasarkan kesamaan karakteristik. Algoritma seperti k-means dan hierarchical clustering dapat digunakan untuk mengelompokkan daerah dengan pola pengumpulan sampah yang serupa. Hal ini membantu dalam merancang strategi pengelolaan sampah yang lebih efektif dan efisien (Kurniawan et al., 2023).

#### 3.2.4 Algoritma Optimasi

Algoritma optimasi digunakan untuk memaksimalkan efisiensi dalam proses pengumpulan dan pengelolaan sampah. Algoritma seperti genetic algorithms dan ant colony optimization dapat digunakan untuk merancang rute pengumpulan sampah yang paling efisien. Choudhary & Agarwal (2024) menunjukkan bagaimana machine learning dapat digunakan untuk optimasi rute pengumpulan sampah real-time, sehingga mengurangi biaya operasional dan emisi karbon.

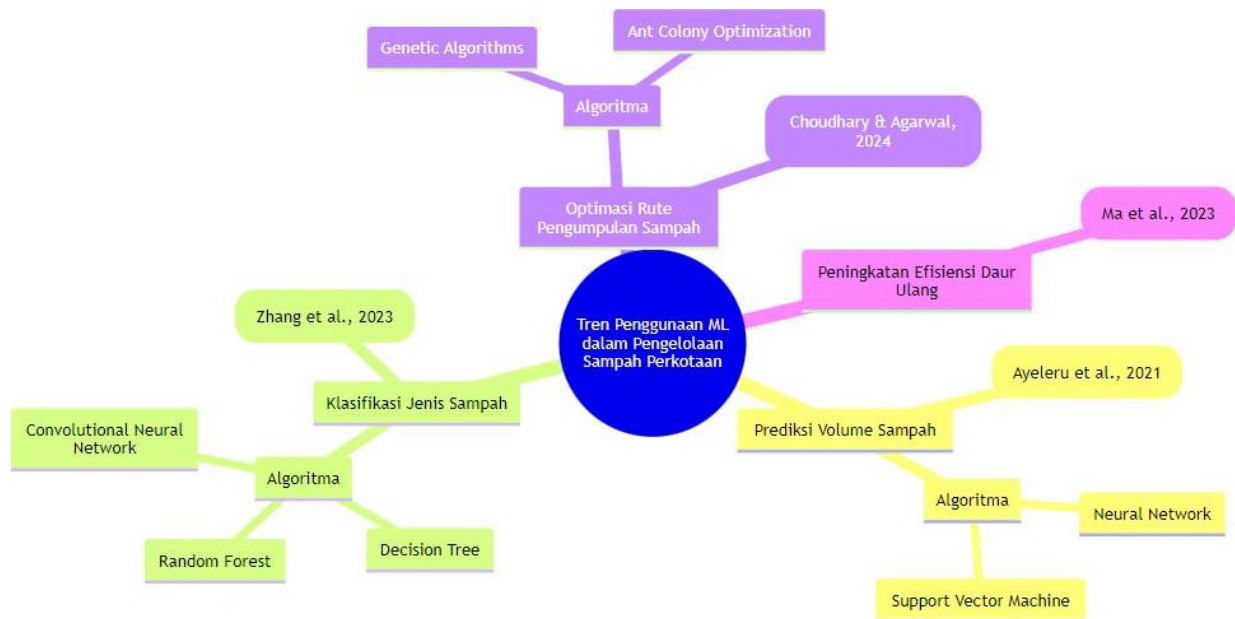
### 3.2.5 Reinforcement Learning

Reinforcement learning adalah metode yang digunakan untuk mengoptimalkan keputusan dalam proses pengelolaan sampah melalui trial and error. Algoritma ini dapat digunakan untuk mengembangkan sistem pengelolaan sampah yang adaptif, yang dapat meningkatkan kinerja dari waktu ke waktu berdasarkan umpan balik dari lingkungan (Li & Chen, 2023).

Metodologi machine learning yang digunakan dalam pengelolaan sampah perkotaan menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi berbagai tantangan. Namun, implementasinya memerlukan data berkualitas tinggi dan infrastruktur teknologi yang memadai. Tantangan lainnya termasuk integrasi teknologi dengan sistem pengelolaan yang sudah ada dan penerimaan oleh masyarakat (Bibri et al., 2024; Sharifi et al., 2024).

### 3.3 Hasil Utama dari Studi

Literatur yang direview menunjukkan bahwa penggunaan machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan telah menghasilkan berbagai temuan kunci yang signifikan. **Gambar 2** menunjukkan berbagai algoritma machine learning yang diterapkan dalam pengelolaan sampah perkotaan, termasuk neural network, decision tree, random forest, genetic algorithms, ant colony optimization, dan reinforcement learning. Aplikasi dari algoritma ini meliputi prediksi volume sampah, klasifikasi jenis sampah, dan optimasi rute pengumpulan.



**Gambar 2.** Algoritma Machine Learning untuk Pengelolaan Sampah

#### 3.3.1 Peningkatan Akurasi Prediksi Volume Sampah

Berbagai studi telah menunjukkan bahwa algoritma machine learning seperti neural networks dan support vector machines dapat digunakan untuk memprediksi volume sampah dengan akurasi yang tinggi. Ayeleru et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan artificial neural networks (ANN) dan support vector machines (SVM) dalam memprediksi jumlah sampah di Johannesburg menghasilkan prediksi yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional.

### 3.3.2 Optimalisasi Rute Pengumpulan Sampah

Penggunaan algoritma optimasi seperti genetic algorithms dan ant colony optimization telah terbukti efektif dalam merancang rute pengumpulan sampah yang lebih efisien. Choudhary & Agarwal (2024) mengemukakan bahwa optimasi rute pengumpulan sampah secara real-time dapat mengurangi biaya operasional dan emisi karbon secara signifikan.

### 3.3.3 Peningkatan Efisiensi dalam Klasifikasi Sampah

Algoritma klasifikasi seperti decision trees, random forests, dan deep learning telah digunakan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses klasifikasi sampah. Zhang et al. (2023) menunjukkan bahwa model deep learning dapat mengklasifikasikan jenis sampah dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi, yang membantu dalam proses daur ulang yang lebih efisien.

### 3.3.4 Identifikasi Pola dan Tren dalam Pengelolaan Sampah

Studi literatur juga menunjukkan bahwa teknik clustering seperti k-means dan hierarchical clustering dapat mengidentifikasi pola dan tren dalam data sampah, yang dapat digunakan untuk merancang strategi pengelolaan yang lebih efektif. Kurniawan et al. (2023) menunjukkan bagaimana clustering dapat digunakan untuk mengelompokkan daerah dengan pola pengumpulan sampah yang serupa, sehingga mempermudah dalam pengelolaan sumber daya.

### 3.3.5 Implementasi Sistem Pengelolaan Sampah yang Adaptif

Reinforcement learning telah digunakan untuk mengembangkan sistem pengelolaan sampah yang adaptif, yang dapat meningkatkan kinerja dari waktu ke waktu berdasarkan umpan balik dari lingkungan. Li & Chen (2023) menunjukkan bahwa reinforcement learning dapat digunakan untuk mengoptimalkan keputusan dalam pengelolaan sampah, yang menghasilkan sistem yang lebih efisien dan adaptif.

Secara keseluruhan, hasil dari studi literatur ini menunjukkan bahwa machine learning menawarkan solusi inovatif dan efektif dalam mengatasi berbagai tantangan dalam pengelolaan sampah perkotaan. Namun, implementasinya memerlukan data berkualitas tinggi dan infrastruktur teknologi yang memadai. Selain itu, tantangan dalam integrasi teknologi dengan sistem pengelolaan yang sudah ada serta penerimaan oleh masyarakat juga perlu diperhatikan (Bibri et al., 2024; Sharifi et al., 2024).

## 3.4 Tantangan dan Peluang

Dalam penerapan machine learning (ML) untuk pengelolaan sampah perkotaan, terdapat beberapa tantangan dan peluang yang perlu diperhatikan untuk memaksimalkan efektivitas teknologi ini. Berikut adalah beberapa tantangan utama serta peluang masa depan yang diidentifikasi dari literatur yang direview:

### 3.4.1 Tantangan:

#### Kualitas dan Ketersediaan Data:

Salah satu tantangan terbesar dalam penerapan ML adalah kualitas dan ketersediaan data yang memadai. Data yang diperlukan seringkali tersebar di berbagai sumber dan mungkin tidak lengkap atau akurat. Ayeleru et al. (2021) menyoroti pentingnya memiliki data yang berkualitas tinggi untuk model ML agar dapat memberikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan.

#### Kompleksitas Algoritma:

Algoritma ML seringkali kompleks dan memerlukan pemahaman teknis yang mendalam untuk implementasi dan pengoperasiannya. Pengelola sampah perkotaan mungkin tidak memiliki sumber daya atau keahlian yang diperlukan untuk mengelola sistem ini secara efektif (Chen et al., 2024; Li & Chen, 2023).

#### Biaya Implementasi:

Biaya awal untuk implementasi sistem berbasis ML bisa sangat tinggi. Ini termasuk biaya perangkat keras, perangkat lunak, serta pelatihan staf. Anshassi & Townsend (2024) mencatat bahwa investasi awal yang signifikan diperlukan, yang dapat menjadi penghalang bagi banyak kota, terutama di negara berkembang.

#### Keamanan dan Privasi Data:

Penggunaan data dalam jumlah besar untuk melatih model ML menimbulkan kekhawatiran tentang keamanan dan privasi data. Campodonico Avendano et al. (2024) menekankan perlunya protokol keamanan yang kuat untuk melindungi data sensitif dari penyalahgunaan dan kebocoran.

#### 3.4.2 Peluang:

##### Efisiensi Operasional:

Meskipun tantangan ada, peluang untuk meningkatkan efisiensi operasional dalam pengelolaan sampah sangat besar. Algoritma ML dapat digunakan untuk mengoptimalkan rute pengumpulan sampah, yang dapat mengurangi biaya operasional dan emisi karbon (Choudhary & Agarwal, 2024).

##### Pengembangan Kebijakan yang Berbasis Data:

Dengan analisis data yang lebih canggih, pembuat kebijakan dapat mengembangkan strategi pengelolaan sampah yang lebih efektif dan berbasis data. Liang et al. (2024) menunjukkan bahwa ML dapat membantu mengidentifikasi tren dan pola yang sebelumnya tidak terlihat, yang dapat mempengaruhi pengambilan keputusan kebijakan.

##### Inovasi Teknologi:

Terus berkembangnya teknologi ML menawarkan peluang untuk inovasi yang lebih lanjut. Misalnya, pengembangan model hybrid yang menggabungkan ML dengan teknologi lainnya seperti Internet of Things (IoT) dapat menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih pintar dan adaptif (Eusufzai et al., 2024).

##### Kolaborasi Internasional:

Peluang untuk kolaborasi internasional juga sangat besar. Negara-negara dapat bekerja sama dalam berbagi data dan teknologi, yang dapat membantu mengurangi biaya dan mempercepat implementasi sistem ML untuk pengelolaan sampah (Dwivedi et al., 2022).

Secara keseluruhan, meskipun ada tantangan yang signifikan dalam penerapan machine learning untuk pengelolaan sampah perkotaan, peluang yang ditawarkan oleh teknologi ini juga sangat besar. Dengan pendekatan yang tepat, termasuk investasi dalam infrastruktur dan pelatihan, serta pengembangan kebijakan yang mendukung, ML dapat menjadi alat yang sangat efektif dalam mengatasi tantangan pengelolaan sampah di perkotaan.



#### 4 KESIMPULAN

Penggunaan machine learning dalam pengelolaan sampah perkotaan menawarkan berbagai solusi inovatif untuk mengatasi tantangan yang kompleks dalam bidang ini. Hasil studi literatur menunjukkan bahwa machine learning dapat meningkatkan akurasi prediksi volume sampah, mengoptimalkan rute pengumpulan, dan meningkatkan efisiensi proses daur ulang. Metodologi yang digunakan meliputi regresi, klasifikasi, clustering, dan algoritma optimasi, masing-masing memberikan kontribusi signifikan dalam berbagai aspek pengelolaan sampah. Tantangan utama dalam penerapan teknologi ini meliputi kualitas dan ketersediaan data, kompleksitas algoritma, biaya implementasi, serta keamanan dan privasi data. Meskipun demikian, peluang yang ditawarkan oleh machine learning sangat besar, termasuk peningkatan efisiensi operasional, pengembangan kebijakan berbasis data, inovasi teknologi, dan kolaborasi internasional. Dengan pendekatan yang tepat, termasuk investasi dalam infrastruktur dan pelatihan, serta pengembangan kebijakan yang mendukung, machine learning dapat menjadi alat yang sangat efektif dalam mengatasi masalah pengelolaan sampah perkotaan.. Pengembangan model hybrid yang menggabungkan machine learning dengan teknologi lain seperti IoT juga merupakan arah yang menjanjikan untuk penelitian di masa depan.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pengelola Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Diponegoro, atas akses yang diberikan ke database akademik. Akses ini sangat membantu dalam pengumpulan data dan referensi yang diperlukan untuk penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hazmi, H. E., Hassan, G. K., Kurniawan, T. A., Śniatała, B., Joseph, T. M., Majtacz, J., Piechota, G., Li, X., El-Gohary, F. A., Saeb, M. R., & Maĳinia, J. (2024). Technological solutions to landfill management: Towards recovery of biomethane and carbon neutrality. *Journal of Environmental Management*, 354, 120414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120414>
- Almulhim, A. I., & Cobbinah, P. B. (2024). Framing resilience in Saudi Arabian cities: On climate change and urban policy. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105172>
- Ameer, M., Frigerio, N., & Matta, A. (2024). Common challenges for circular manufacturing industries in recycling. *Procedia CIRP*, 122, 665–670. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.093>
- Anshassi, M., & Townsend, T. G. (2024). Residential Recycling in Florida: A Case Study on Costs, Environmental Impacts, and Improvement Strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, 206, 107627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107627>
- Ayeleru, O. O., Fajimi, L. I., Oboirien, B. O., & Olubambi, P. A. (2021). Forecasting municipal solid waste quantity using artificial neural network and supported vector machine techniques: A case study of Johannesburg, South Africa. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125671. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125671>
- Baghel, N., Manjunath, K., & Kumar, A. (2024). Assessment of solar-biomass hybrid power system for decarbonizing and sustainable energy transition for academic building. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 1201–1212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.004>

- Bibri, S. E., Huang, J., & Krogstie, J. (2024). Artificial intelligence of things for synergizing smarter eco-city brain, metabolism, and platform: Pioneering data-driven environmental governance. *Sustainable Cities and Society*, 108, 105516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105516>
- Campodonico Avendano, I. A., Heimar Andersen, K., Erba, S., Moazami, A., Aghaei, M., & Najafi, B. (2024). A novel framework for assessing the smartness and the smart readiness level in highly electrified non-residential buildings: A Norwegian case study. *Energy and Buildings*, 314, 114234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114234>
- Chen, P., Chu, Z., & Zhao, M. (2024). The Road to corporate sustainability: The importance of artificial intelligence. *Technology in Society*, 76, 102440. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102440>
- Choudhary, R., & Agarwal, A. (2024). Route selection for real-time air quality monitoring to maximize spatiotemporal coverage. *Journal of Transport Geography*, 115, 103812. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103812>
- Darıcı, S., Riaz, M., Demir, G., Gencer, Z. T., & Pamucar, D. (2024). How will I break AI? Post-Luddism in the AI age: Fuzzy MCDM synergy. *Technological Forecasting and Social Change*, 202, 123327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123327>
- Ding, Z., Liu, R., Wang, Y., Tam, V. W. Y., & Ma, M. (2021). An agent-based model approach for urban demolition waste quantification and a management framework for stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124897. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124897>
- Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Kar, A. K., Baabdullah, A. M., Grover, P., Abbas, R., Andreini, D., Abumoghli, I., Barlette, Y., Bunker, D., Chandra Kruse, L., Constantiou, I., Davison, R. M., De', R., Dubey, R., Fenby-Taylor, H., Gupta, B., He, W., Kodama, M., ... Wade, M. (2022). Climate change and COP26: Are digital technologies and information management part of the problem or the solution? An editorial reflection and call to action. *International Journal of Information Management*, 63, 102456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102456>
- Eusufzai, F., Bobby, A. N., Shabnam, F., & Sabuj, S. R. (2024). Personal internet of things networks: An overview of 3GPP architecture, applications, key technologies, and future trends. *International Journal of Intelligent Networks*, 5, 77–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijin.2024.02.001>
- Giri, B. K., & Roy, S. K. (2024). Fuzzy-random robust flexible programming on sustainable closed-loop renewable energy supply chain. *Applied Energy*, 363, 123044. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123044>
- Kurniawan, T. A., Haider, A., Mohyuddin, A., Fatima, R., Salman, M., Shaheen, A., Ahmad, H. M., Al-Hazmi, H. E., Othman, M. H. D., Aziz, F., Anouzla, A., & Ali, I. (2023). Tackling microplastics pollution in global environment through integration of applied technology, policy instruments, and legislation. *Journal of Environmental Management*, 346, 118971. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118971>
- Kurniawan, T. A., Meidiana, C., Goh, H. H., Zhang, D., Othman, M. H. D., Aziz, F., Anouzla, A., Sarangi, P. K., Pasaribu, B., & Ali, I. (2024). Unlocking synergies between waste management and climate change mitigation to accelerate decarbonization through circular-economy digitalization in Indonesia. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 522–542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.011>

- Li, N., & Chen, Y. (2023). Municipal solid waste classification and real-time detection using deep learning methods. *Urban Climate*, 49, 101462. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101462>
- Liang, X., Zhan, W., Li, X., & Deng, F. (2024). Unveiling causal dynamics and forecasting of urban carbon emissions in major emitting economies through multisource interaction. *Sustainable Cities and Society*, 105, 105326. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105326>
- Ma, M., Tam, V. W. Y., Le, K. N., & Osei-Kyei, R. (2023). A system dynamics model for assessing impacts of policies on supply and demand of recycled aggregate. *Journal of Building Engineering*, 75, 107050. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107050>
- Sharifi, A., Allam, Z., Bibri, S. E., & Khavarian-Garmsir, A. R. (2024). Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs. *Cities*, 146, 104659. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>
- Zhang, H., Cao, H., Zhou, Y., Gu, C., & Li, D. (2023). Hybrid deep learning model for accurate classification of solid waste in the society. *Urban Climate*, 49, 101485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101485>