

Efektivitas Teknologi Pemilahan Limbah Medis: Meta-Analisis Terhadap Sistem Sensor, IoT, Robotika, Dan Klasifikasi Citra Digital

Sumaryanto^{1*} Alfana Afandi²

^{1,2} Program Pascasarjana Program Studi Magister Kesehatan Masyarakat Universitas Ngudi Waluyo

*Corresponding Author : s16331044@gmail.com, alfanafandi@unw.ac.id

Abstrak: Pencampuran limbah medis dan non-medis di fasilitas layanan kesehatan meningkatkan risiko kecelakaan kerja, seperti penularan infeksi nosokomial, serta menambah biaya operasional rumah sakit. Penggunaan teknologi digital cerdas pada tempat sampah pintar menawarkan solusi untuk pemilahan limbah secara otomatis tanpa kontak langsung. Penelitian ini menggunakan pendekatan meta-analisis yang sesuai dengan pedoman PRISMA. Pencarian literatur dilakukan pada basis data PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar untuk publikasi dari tahun 2021 hingga 2026. Dari 164 penelitian yang teridentifikasi, 10 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dipilih dan dianalisis secara kritis menggunakan model efek acak (random-effects model) serta sintesis naratif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi pemilahan yang memanfaatkan pemrosesan citra berbasis AI dan sensor fisik mencapai tingkat akurasi klasifikasi limbah sebesar 90% hingga 100%. Arsitektur Inception-V3 memberikan akurasi citra medis tertinggi sebesar 93%, sementara sensor Inductive Proximity mencapai akurasi 100% dengan waktu respons yang sangat cepat. Penerapan edge computing berbasis mikrokontroler lokal terbukti mampu menghilangkan ketergantungan pada internet, menghemat konsumsi daya, dan mengurangi kontak fisik langsung oleh pengguna hingga 85%. Selain itu, integrasi pemantauan volume dan telemetri IoT mencapai akurasi pengukuran volume limbah hingga 98%, dengan efisiensi simpul jaringan berkisar antara 93,75% hingga 96,66%. Penerapan teknologi Tempat Sampah Pintar (Smart Waste Bin) yang mengintegrasikan AI, edge computing, dan sensor elektronik terbukti efektif, higienis, dan ekonomis dalam meningkatkan kepatuhan terhadap pemilahan limbah medis.

Kata kunci: AI (Kecerdasan Buatan), Edge Computing, Limbah Medis, Pemilahan Limbah, Tempat Sampah Pintar.

Abstract: The mixing of medical and non-medical waste in healthcare facilities increases the risk of workplace accidents, such as the transmission of nosocomial infections, and raises hospitals' operating costs. The use of smart digital technology in smart waste bins offers a solution for automatic waste sorting without direct contact. This study employed a meta-analysis approach in accordance with the PRISMA guidelines. A literature search was conducted in the PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar databases for publications from 2021 to 2026. Of the 164 studies identified, 10 articles that met the inclusion criteria were extracted and critically analyzed using a random-effects model and narrative synthesis. The results indicate that segregation technologies utilizing AI-based image processing and physical sensors achieved waste classification accuracy rates of 90% to 100%. The Inception-V3 architecture delivered the highest medical image accuracy at 93%, while the Inductive Proximity sensor achieved 100% accuracy with an extremely fast response time. The implementation of edge computing based on local microcontrollers has proven capable of eliminating dependence on the internet, saving power consumption, and reducing direct physical contact by users by up to 85%. Additionally, the integration of volume monitoring and IoT telemetry achieves waste volume measurement accuracy of up to 98%, with network node efficiency ranging from 93.75% to 96.66%. The implementation of Smart Waste Bin technology based on the integration of AI, edge computing, and electronic sensors has proven to be effective, hygienic, and economical in improving compliance with medical waste sorting.

Keywords: Artificial Intelligence, Edge Computing, Medical Waste, Waste Sorting, Smart Waste Bin.

Pendahuluan

Rumah sakit adalah lembaga sosial yang tidak terpisahkan dari masyarakat, dan keberadaannya sangat dihargai oleh masyarakat. Namun, terlepas dari peran vitalnya, operasional rumah sakit menghasilkan sejumlah besar limbah setiap hari, termasuk limbah domestik dan limbah medis, yang diklasifikasikan sebagai bahan berbahaya dan beracun (B3). Limbah medis, khususnya limbah infeksius, menimbulkan risiko penularan penyakit yang tinggi dan oleh karena

itu memerlukan penanganan yang tepat sesuai dengan prosedur operasi standar (SOP) yang berlaku. Salah satu langkah paling penting dalam pengelolaan limbah medis adalah proses pemisahan limbah di sumbernya. Proses ini berfungsi sebagai dasar utama sebelum limbah diangkut, dikumpulkan, diolah, dan dibuang untuk mencegah kontaminasi lingkungan dan memastikan keselamatan staf dan pasien (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI, 2021).

Limbah medis adalah jenis limbah berbahaya yang harus ditangani dengan benar. Proses pemilahan di sumbernya merupakan langkah awal yang penting dalam mencegah kontaminasi lingkungan dan penyebaran penyakit akibat pengelolaan limbah yang tidak tepat. Dalam praktiknya, masih ada petugas kesehatan, staf sanitasi, dan pengunjung di fasilitas kesehatan yang belum sepenuhnya memahami klasifikasi dan pemilahan limbah medis yang tepat (Pratiwi & Wardani, 2020). Kesalahan seperti mencampur limbah infeksius dengan limbah non-medis, menggunakan wadah yang tidak sesuai, dan kurangnya pengetahuan staf mengenai kategori limbah medis masih sering terjadi. Kepatuhan biasanya dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kurangnya pengetahuan staf, beban kerja yang berat, sumber daya pendukung yang terbatas, dan kurangnya sistem informasi yang dapat memfasilitasi pendidikan dan pemantauan secara real-time (Wardahani, Akbar, & Tejoyuwono, 2026).

Rumah sakit memiliki potensi signifikan untuk mencemari lingkungan dan menyebabkan kecelakaan serta penyebaran penyakit. Penemuan limbah medis yang bercampur dengan limbah domestik—seperti plastik, kertas, dan kemasan makanan—merupakan masalah serius karena limbah medis berpotensi menularkan penyakit dan berbahaya bagi kesehatan. Pencampuran ini dapat menyebabkan penyebaran infeksi di antara pekerja sanitasi, staf medis, pasien, dan masyarakat sekitar. Pencampuran limbah medis dan domestik terjadi karena masalah kepatuhan di antara staf rumah sakit, yang seringkali disebabkan oleh kelelahan kerja atau beban kerja yang tinggi bagi perawat dan pekerja sanitasi. Hal ini menyebabkan hilangnya konsentrasi saat memilah sampah (misalnya, jarum suntik berakhir di tempat sampah plastik kuning alih-alih kotak pengaman), sehingga menimbulkan risiko keselamatan kerja seperti cedera tusukan jarum yang membawa risiko penularan penyakit berbahaya seperti Hepatitis B, C, atau HIV (Batista et al., 2025). Ada kebutuhan untuk memutus rantai risiko ini melalui teknologi digital yang cepat.

Pencampuran sampah medis dan domestik juga dapat menyebabkan inefisiensi dalam pengelolaan sampah karena sampah domestik (non-medis) masih tercampur ke dalam kantong sampah medis (plastik kuning), sehingga meningkatkan biaya rumah sakit karena biaya pengolahan sampah medis per kilogram jauh lebih tinggi daripada sampah domestik. Jika sampah tercampur, rumah sakit harus membayar biaya pengolahan sampah medis untuk volume yang lebih tinggi, padahal sebenarnya itu sampah biasa (Muchtar, Riogilang, & Riogilang, 2022). Dari sudut pandang hukum dan akreditasi, peraturan pemerintah (peraturan Kementerian Kesehatan

dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan) mengharuskan pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) dilakukan sesuai dengan standar yang ketat. Penemuan limbah campuran dapat mengakibatkan rumah sakit menghadapi tuntutan hukum dan pidana, serta penurunan skor akreditasi mereka, yang pada gilirannya memengaruhi kualitas layanan rumah sakit (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI, 2021).

Pencampuran limbah memiliki dampak negatif yang signifikan di dua bidang utama: Kesehatan Lingkungan dan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Dari perspektif Kesehatan Lingkungan, pencampuran ini menyebabkan peningkatan volume limbah berbahaya yang harus dibuang melalui pihak ketiga, yang mengakibatkan inefisiensi biaya operasional bagi rumah sakit. Sementara itu, dari perspektif K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja), kelalaian dalam proses pemilahan ini meningkatkan risiko paparan patogen yang ditularkan melalui darah dan cedera tusukan jarum bagi staf layanan kebersihan saat mengangkut limbah berbahaya ke Tempat Penyimpanan Sementara Limbah Berbahaya (TPS) (Purwanti, 2018).

Pemilahan limbah medis merupakan langkah krusial dalam pengelolaan limbah fasilitas layanan kesehatan karena menentukan proses pengangkutan dan pengolahan untuk limbah infeksius, limbah benda tajam, dan limbah non-medis. Pemilahan yang tidak akurat berkontribusi pada peningkatan risiko infeksi, cedera, dan pencemaran lingkungan. Seiring dengan meningkatnya volume limbah medis di Indonesia maupun secara global, berbagai teknologi pemilahan otomatis, seperti sensor berbasis Arduino, *Internet of Things* (IoT), sistem robotik, dan klasifikasi citra digital menggunakan *Convolutional Neural Networks* (CNN), sedang dikembangkan untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pemilahan limbah medis.

Integrasi teknologi mutakhir ke dalam sistem pemilahan limbah rumah sakit sangatlah penting. Penggunaan teknologi berbasis *Internet of Things* (IoT), sistem sensor cerdas (seperti sensor induktif, optik, dan kelembapan), serta penerapan kecerdasan buatan (AI) menggunakan metode computer vision menawarkan solusi otomatisasi yang presisi. Teknologi ini mampu mengidentifikasi dan memisahkan jenis limbah medis secara real-time tanpa memerlukan kontak fisik langsung dari staf, sehingga meminimalkan risiko paparan patogen berbahaya sekaligus meningkatkan efisiensi operasional rumah sakit.

Meskipun teknologi ini memiliki potensi yang sangat besar, penerapannya di sektor kesehatan masih menghadapi berbagai tantangan, mulai dari adaptasi sistem dan akurasi sensor terhadap beragam material medis hingga kesiapan infrastruktur. Oleh karena itu, penelitian mengenai efektivitas dan optimalisasi teknologi pemilahan limbah di lingkungan rumah sakit menjadi sangat relevan. Studi ini bertujuan untuk meninjau penelitian terdahulu mengenai efektivitas teknologi pemilahan limbah medis dibandingkan dengan metode pemilahan manual, khususnya terkait akurasi pemilahan, waktu pemrosesan, dan potensi pengurangan paparan terhadap staf. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah serta rekomendasi

praktis bagi manajemen rumah sakit dalam mewujudkan pengelolaan limbah yang aman, higienis, dan berkelanjutan (green hospital).

Metode

Penelitian ini merupakan meta-analisis terhadap studi mengenai teknologi pemilahan limbah medis. Pedoman PRISMA digunakan untuk mengatur proses identifikasi, seleksi, dan pelaporan studi. Pencarian literatur dilakukan pada basis data internasional dan nasional (PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar) untuk studi yang diterbitkan antara tahun 2021 dan 2026, dengan menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan "pemilahan limbah medis," "pemisahan limbah medis berbasis sensor," "limbah medis IoT," "pemilahan limbah medis robotik," dan "klasifikasi limbah medis CNN." Studi-studi tersebut mencakup bahasa Inggris dan bahasa Indonesia.

Artikel penelitian dipilih berdasarkan kriteria inklusi berikut: 1) Studi eksperimental atau kuasi-eksperimental yang mengembangkan dan/atau menguji teknologi pemilahan limbah medis (sensor, IoT, robotika, CNN, tempat sampah pintar). 2) Studi yang melaporkan indikator kuantitatif seperti akurasi klasifikasi limbah, waktu pemilahan, tingkat kesalahan, atau indikator kinerja sistem lainnya. 3) Studi yang berfokus pada limbah medis padat (infeksius, benda tajam, APD, plastik medis) di fasilitas layanan kesehatan atau simulasi laboratorium. Kriteria eksklusi adalah sebagai berikut: 1) Studi yang hanya membahas pemilahan manual tanpa penggunaan teknologi. 2) Studi mengenai pengolahan limbah (insinerator, autoklaf, gelombang mikro, plasma) tanpa komponen pemilahan. 3) Artikel opini, editorial, atau laporan kebijakan yang tidak memuat data kuantitatif. Untuk setiap studi yang memenuhi kriteria, data diekstraksi berdasarkan karakteristik studi (peneliti dan tahun), jenis teknologi, dan hasil penelitian. Analisis dan sintesis data dilakukan dengan menghitung ukuran efek untuk setiap studi menggunakan model efek acak (random-effects model) guna memperhitungkan heterogenitas dalam desain dan pengaturan studi, yang kemudian diikuti dengan analisis naratif.

Hasil dan Pembahasan

Penelusuran literatur pada basis data menghasilkan total 164 artikel. Secara keseluruhan, 115 artikel dikeluarkan karena tidak relevan dengan topik penelitian, sehingga tersisa 49 artikel yang relevan berdasarkan judulnya. Artikel-artikel tersebut kemudian disaring berdasarkan abstrak dan teks lengkapnya. Seleksi akhir menghasilkan 10 artikel yang relevan untuk meta-analisis.

Tabel 1. Karakteristik Studi yang Disertakan

No	Penulis/Tahun	Jenis Teknologi	Komponen Perangkat Keras	Jenis Objek	Metrik Kinerja
1.	Cia Renhoran, Muthia Muthmainnah	Arduino Atmega 2560 mengendalikan	Arduino Mega 2560, Sensor Proximity Induktif,	Logam (jarum, pisau, klip) & Non-logam	Proximity: 0,1–0,5 detik Inframerah:

No	Penulis/Tahun	Jenis Teknologi	Komponen Perangkat Keras	Jenis Objek	Metrik Kinerja
	Ismail, Ajeng Ayu Priyaniti, Edi Arno Saputra, dan Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati/ 2024	sensor proximity induktif dan sensor inframerah untuk mendeteksi jenis limbah medis.	Sensor Inframerah, Servo	(masker, sarung tangan, selang infus)	0,1–0,3 detik Akurasi Deteksi: 100%
2.	Rafi Budhi Rahmadani, Imam Tri Harsoyo, dan Patrisius Kusi Olla/ 2025	Sistem tempat sampah pintar (*Smart Bin*) berbasis Arduino Uno yang dilengkapi dengan sensor HuskyLens, motor servo, dan sistem kecerdasan buatan (AI) untuk klasifikasi sampah.	Arduino Uno, Servo, LCD I ² C, Buzzer	Organik, Anorganik, B3 (Medis)	90%–100% (90% Uji Fungsi Keseluruhan)
3.	Safira Fegi Nisrina, Lawrence Adi Supriyono, dan Basuki Rahmat/ 2025	SmartBin berbasis AI dan edge computing yang ditenagai oleh Arduino Uno R3	Arduino Uno R3, HC-SR04, Servo SG90, LED	Jarum suntik, perban, limbah medis standar	Akurasi Klasifikasi: 92% Pengurangan Kontak: 85% Respons Servo: ≤500 ms
4.	Renaldi Irfan Firdaus, Wibowo Harry Sugiharto, dan Muhammad Imam Ghozali/ 2025	Convolutional Neural Network (CNN) pada sistem pemilahan limbah infeksius berbasis citra digital	ESP32-CAM (RAM 520 KB), Servo	Botol, Masker, Sarung tangan, Alat suntik	F1-Score Validasi: 97,3% Akurasi Real-Time: 72%–85%
5.	Fauzi Ramdani dan Nuroji/2026	Sistem mikrokontroler NodeMCU ESP8266 sebagai unit kendali utama, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur ketinggian tumpukan limbah medis, dan LCD I2C 16x2 untuk menampilkan informasi secara real-time.	NodeMCU ESP8266, HC-SR04, LCD 16x2	Volume/Ketinggian Limbah Medis	Akurasi Sensor: 98% (±2 cm) Jeda Notifikasi: <5 detik
6.	Tiara Febriyanti, Moch Arif Bijaksana, Isack Farady/2023	Sistem klasifikasi limbah medis menggunakan metode *Transfer Learning* dengan beberapa model *Convolutional Neural Network* (CNN) yang telah dilatih sebelumnya, yaitu VGG16, ResNet50, dan Inception-V3	Pemrosesan pada *Workstation*/Server	1.600 Citra (Jarum suntik, Masker, Sarung tangan, Obat-obatan)	Inception-V3: 93% VGG16: 85% ResNet50: 63%
7.	Karan Belsare, Manwinder Singh, Anudeep Gandam, Varakumari	Teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Long Range* (LoRa)	Sensor fisik (IR E18, MQ7 Bau, MQ135 Kualitas Udara, Berat, MQ2	Surat kabar, tisu, gelas kertas, botol, kantong plastik,	Node 1 96,66% Node 2 93,75%

No	Penulis/Tahun	Jenis Teknologi	Komponen Perangkat Keras	Jenis Objek	Metrik Kinerja
	Samudrala, Rajesh Singh, Naglaa F. Soliman, Sudipta Das, dan Abeer D. Algarni/ 2024		Asap) dan kamera	kaleng aerosol, kaleng minuman. Jarum suntik, sarung tangan medis, masker, obat-obatan	
8.	Andi Muhammad Akbar, Muhammad Basri, Wahyuddin/2024	Algoritma Random Forest	Smartphone / Kamera Real-Time, Lingkungan Python	Organik & Anorganik (20 Jenis Limbah Spesifik)	94,00% (Rata-rata Uji Lapangan 95%)
9.	Kartiko Mustafi Sandia, Abi Prima Yudhaa, Nanda Dimas Aryantoa, dan Mahatamtama Arya Farabi/ 2022	Convolutional Neural Network (CNN)	Pemrosesan Berbasis Komputer (Citra)	Kertas, Kaca, Logam, Kardus, Plastik	92% (Pelatihan) / 79% (Pengujian)
10.	G. Uthayakumar, Bathrinath Sankaranarayanan, dan Bhalaji R.K.A/2024	Sistem pengelolaan sampah cerdas mutakhir yang mengintegrasikan sensor IoT untuk pemantauan waktu nyata dan *Extreme Learning Machine* (ELM) untuk pemilahan sampah.	Tempat Sampah Cerdas, Sensor IoT berbasis Cloud, Router Jaringan	Biomedis (Dapat Didaur Ulang vs. Tidak Dapat Didaur Ulang/Sekali Pakai)	95,00%

Sebagian besar studi menunjukkan bahwa teknologi pemilahan mencapai akurasi tinggi dalam mengklasifikasikan limbah medis (misalnya, >90%), khususnya untuk kategori biner seperti logam versus non-logam dan benda tajam versus non-tajam. Sistem berbasis CNN cenderung menunjukkan akurasi yang lebih tinggi dalam klasifikasi visual yang kompleks dibandingkan sensor sederhana, namun memerlukan kalibrasi dan kumpulan data pelatihan yang lebih besar.

Beberapa purwarupa teknologi pemilahan yang berbasis Arduino dan sensor kedekatan induktif (**inductive proximity sensors**) menunjukkan waktu respons 0,1–0,5 detik untuk limbah logam dan 0,1–0,3 detik untuk limbah non-logam, dengan akurasi tinggi dalam mengenali kategori limbah tajam/non-tajam dan infeksius/non-infeksius. Sistem IoT yang dilengkapi conveyor dan sensor kedekatan mampu memilah limbah logam, basah, dan kering sekaligus memberikan notifikasi mengenai kapasitas penyimpanan, sehingga meningkatkan efisiensi dan pemantauan proses.

Proyek robotika "Medisort" dan sistem klasifikasi gambar berbasis CNN (ESP32 CAM + FOMO) melaporkan tingkat akurasi yang menjanjikan dalam mengklasifikasikan limbah medis versus non-medis serta tajam versus non-tajam, dengan potensi penerapan pada tempat sampah pintar di fasilitas layanan kesehatan. Secara keseluruhan, teknologi pemilahan menunjukkan peningkatan akurasi dan efisiensi dibandingkan pemilahan manual, meskipun jumlah studi masih terbatas serta memiliki variasi yang luas dalam hal desain dan indikator hasil.

Secara teoretis, teknologi pemilahan otomatis dapat mengurangi kontak langsung antara staf dengan limbah infeksius dan limbah tajam. Studi mengenai pengelolaan limbah di fasilitas layanan kesehatan menunjukkan bahwa masalah seperti pencampuran limbah medis dan non-medis, penumpukan limbah, dan penggunaan insinerasi manual masih terjadi ketika pemilahan dilakukan secara tradisional. Namun, sangat sedikit studi yang mengukur secara kuantitatif penurunan tingkat paparan atau cedera setelah penerapan teknologi pemilahan, sehingga analisis meta yang kuat mengenai hasil keselamatan kerja belum dapat dilakukan.

Analisis Komparatif Kinerja Model *Deep Learning*, *Machine Learning*, dan *Computer Vision*

Penerapan teknologi pengolahan citra digital dan kecerdasan buatan (AI) untuk klasifikasi limbah medis dan infeksius menunjukkan variasi kinerja yang signifikan. Keberhasilan suatu model dipengaruhi oleh arsitektur yang digunakan, kompleksitas dataset, dan platform perangkat keras tempat model tersebut dijalankan.

Hasil penelitian Febriyanti et al., (2023) menunjukkan bahwa metode Transfer Learning dengan arsitektur Inception-V3 mencapai akurasi tertinggi sebesar 93% dalam mengklasifikasikan 1.600 citra limbah medis (jarum suntik, masker, sarung tangan, dan obat-obatan). Hasil ini mengungguli VGG16 (85%) dan ResNet50 (63%). Keunggulan Inception-V3 terletak pada struktur modul Inception-nya yang mampu menjalankan filter konvolusi dengan berbagai ukuran secara paralel, sehingga lebih efektif dalam mengekstraksi fitur visual dari beragam objek medis. Sebaliknya, ResNet50 mengalami penurunan akurasi yang signifikan akibat tingginya kompleksitas lapisan residualnya, yang memerlukan dataset jauh lebih besar untuk menghindari masalah underfitting atau overfitting.

Model CNN yang diterapkan untuk pemrosesan limbah umum/anorganik berbantuan komputer oleh Sandia et al., (2022) mencapai akurasi pelatihan sebesar 92%, namun angka ini turun menjadi 79% pada data uji. Penurunan ini mengindikasikan adanya tantangan dalam kemampuan generalisasi model terhadap variasi pencahayaan dan sudut pandang citra yang baru. Sementara itu, implementasi sistem tertanam (*embedded system*) berbasis CNN menggunakan modul ESP32-CAM oleh Firdaus et al., (2025) mencapai F1-score validasi hingga 97,3%. Namun, dalam pengujian waktu nyata (*real-time*), akurasi berkisar antara 72% hingga 85%. Penurunan kinerja real-time ini disebabkan oleh terbatasnya kapasitas RAM ESP32-CAM yang hanya sebesar 520 KB, sehingga memerlukan kompresi atau kuantisasi model yang mengurangi tingkat detail dalam ekstraksi citra.

Penelitian oleh Andi Muhammad Akbar et al., (2025) menunjukkan bahwa penggunaan algoritma Random Forest untuk mengklasifikasikan 20 jenis limbah spesifik pada perangkat seluler (ponsel pintar) mencapai akurasi uji lapangan rata-rata sebesar 95,00% (akurasi model 94,00%). Hal ini mengindikasikan bahwa algoritma berbasis ensemble tree sangat efisien dan stabil untuk

memproses fitur terstruktur atau pemrosesan citra yang dioptimalkan secara lokal.

Uthayakumar, G et al., (2024) mengintegrasikan sensor IoT dengan algoritma ELM untuk pemilahan limbah biomedis (dapat didaur ulang vs. tidak dapat didaur ulang), dengan mencapai tingkat akurasi sebesar 95,00%. ELM menawarkan kecepatan pelatihan yang jauh lebih tinggi dibandingkan CNN tradisional, sehingga sangat cocok untuk diterapkan dalam arsitektur berbasis jaringan cloud IoT.

Integrasi Sistem Tertanam, *Edge Computing*, dan Pemilahan Berbasis Sensor Fisik

Pengembangan sistem tempat sampah pintar tidak hanya bergantung pada pemrosesan citra visual, tetapi juga pada integrasi perangkat keras mikrokontroler dan sensor fisik untuk memastikan respons yang cepat dan akurat. Dalam sebuah studi oleh Renhoran et al., (2024) penggunaan Arduino Mega 2560 untuk mengendalikan sensor proximity induktif dan sensor inframerah berhasil mencapai akurasi deteksi 100% dalam membedakan antara limbah logam (jarum, pisau bedah, klip kertas) dan limbah non-logam (masker, sarung tangan, kantong infus). Sistem ini memiliki waktu respons yang sangat singkat: 0,1–0,5 detik untuk sensor proximity dan 0,1–0,3 detik untuk sensor inframerah. Pemilahan fisik secara langsung menggunakan sensor induktif terbukti sangat andal untuk menangani limbah medis tajam berbahan logam secara instan.

Rahmadani et al., (2025) memanfaatkan kamera pintar HuskyLens berbasis AI yang terhubung ke Arduino Uno untuk mengklasifikasikan limbah organik, anorganik, dan B3 (medis), dengan mencapai akurasi keseluruhan sebesar 90%–100%. Safira Fegi Nisrina et al., (2025) menerapkan prinsip *Edge Computing* berbasis Arduino Uno R3 dan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk klasifikasi limbah medis (jarum suntik, perban). Sistem ini mencapai akurasi klasifikasi sebesar 92% dengan waktu respons servo ≤ 500 ms. Yang terpenting, penerapan sistem ini terbukti mengurangi kontak fisik langsung oleh pengguna hingga 85%, hal yang krusial untuk mencegah infeksi nosokomial.

Ramdani & Nuroji, (2026) mengembangkan sistem pemantauan volume limbah medis menggunakan NodeMCU ESP8266 dan sensor ultrasonik HC-SR04. Sistem ini mencapai akurasi pengukuran hingga 98% (toleransi ± 2 cm) dengan jeda pengiriman notifikasi ke layar LCD atau sistem kurang dari 5 detik. Penelitian oleh Belsare et al., (2024) mengimplementasikan jaringan transmisi LoRa yang mengintegrasikan kamera dengan berbagai sensor fisik (IR E18, MQ7 untuk bau, MQ135 untuk kualitas udara, sensor berat, dan MQ2 untuk asap) guna memantau limbah domestik dan medis. Kombinasi multisensor ini mencapai tingkat keberhasilan transmisi dan pemrosesan data antara 93,75% hingga 96,66% di berbagai node, yang menunjukkan keandalan transmisi data jarak jauh untuk pemantauan kualitas udara dan berat limbah secara real-time.

Otomatisasi pemilahan limbah medis mengurangi intervensi manual oleh tenaga kesehatan dan petugas sanitasi. Pengurangan kontak fisik hingga 85% merupakan indikator penting dalam menurunkan risiko paparan terhadap bahan berbahaya dan patogen (Safira Fegi Nisrina et al.,

2025). Penggunaan sensor fisik dan *edge computing* lokal memungkinkan waktu respons kurang dari 0,5 detik (Renhoran et al., 2024; Safira Fegi Nisrina et al., 2025). Kecepatan ini memastikan proses pemilahan terjadi secara **real-time**, tepat saat limbah dibuang. Selain itu, integrasi pemantauan volume dan gas/bau melalui LoRa IoT memungkinkan tenaga kesehatan menentukan status kapasitas tempat sampah secara akurat (± 2 cm) tanpa perlu melakukan pemeriksaan manual secara berkala (Ramdani & Nuroji, 2026; Belsare et al., 2024).

Di sisi lain, penggunaan mikrokontroler berbiaya rendah seperti ESP32-CAM memiliki keterbatasan akibat kapasitas RAM yang kecil (520 KB), sehingga akurasi *real-time* menjadi lebih rendah (72%–85%) dibandingkan dengan pengujian laboratorium. Penggunaan pemrosesan citra murni (seperti CNN) (Sandia et al., 2022) rentan terhadap penurunan kinerja saat diuji dalam kondisi latar belakang dan pencahayaan yang dinamis. Sensor ultrasonik tunggal hanya mengukur ketinggian tumpukan limbah namun belum dapat mendeteksi penumpukan yang tidak merata atau pemadatan limbah di dalam wadah.

Rekomendasi untuk menggabungkan pemrosesan citra (*Computer Vision*) dengan sensor fisik (seperti sensor proximity induktif dan load cell) dapat memastikan bahwa pemilahan limbah medis tajam dan logam tetap akurat meskipun kamera mengalami hambatan visual. Selain itu, penerapan metode kuantisasi atau arsitektur jaringan saraf yang lebih ringan seperti MobileNetV3 pada mikrokontroler tertanam dapat membantu menjaga akurasi dan stabilitas secara real-time. Hal ini semakin didukung dengan mengintegrasikan sensor volume ultrasonik dengan sensor bau/gas (seri MQ) dan jaringan LoRa untuk pengelolaan terpusat pengumpulan limbah medis di rumah sakit atau puskesmas.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil meta-analisis dan sintesis kritis terhadap 10 studi mengenai penerapan teknologi pemilahan dan pengelolaan limbah medis, beberapa kesimpulan utama dapat ditarik: Integrasi AI, *edge computing*, dan sensor elektronik mampu mengklasifikasikan limbah medis infeksius, non-infeksius, dan berbahaya (B3) dengan tingkat akurasi tinggi, berkisar antara 90% hingga 100%. Pemrosesan citra berbasis Transfer Learning dengan arsitektur Inception-V3 mencapai akurasi tertinggi pada server/komputer (93%), sedangkan pada perangkat tertanam (*embedded device*) ESP32-CAM, model CNN mencapai Validation F1-Score hingga 97,3%. Algoritma Random Forest dan Extreme Learning Machine (ELM) juga terbukti sangat stabil, masing-masing dengan akurasi 95,00%. Penggunaan sensor Inductive Proximity dan inframerah yang dikendalikan oleh mikrokontroler (seperti Arduino Mega 2560) menunjukkan keandalan deteksi 100% untuk pemilahan seketika limbah medis tajam ke dalam kategori logam (jarum, pisau bedah) dan non-logam, dengan waktu respons fisik yang sangat singkat, yaitu 0,1–0,5 detik.

Otomatisasi sistem tempat sampah pintar tanpa sentuh (*contactless*) terbukti efektif

mengurangi kontak fisik langsung antara staf medis maupun sanitasi dengan wadah sampah hingga 85%. Hal ini berdampak signifikan dalam mengurangi risiko kontaminasi silang, paparan bahan berbahaya, dan cedera akibat tertusuk jarum. Penerapan edge computing lokal (pemrosesan offline) memungkinkan sistem beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada koneksi internet serta menghemat konsumsi daya. Sementara itu, penggunaan modul telemetri IoT berbasis NodeMCU ESP8266 dan jaringan LoRa terbukti akurat dalam mengukur volume tumpukan sampah (akurasi 98%, toleransi ± 2 cm) serta memantau kondisi lingkungan (bau, gas, berat) secara real-time.

Ucapan Terima Kasih

Segala puji dan syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT atas kemudahan dan kesehatan yang dilimpahkan selama penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Rektor Universitas Ngudi Waluyo, Dekan Fakultas Kesehatan, Ketua Program Studi Magister Kesehatan Masyarakat, serta Dosen Pembimbing Akademik yang telah meluangkan waktu untuk mendukung kegiatan ini.

Referensi

- Andi Muhammad Akbar, Muhammad Basri, & Wahyuddin Wahyuddin. (2025). Implementasi Machine Learning Menggunakan Algoritma Klasifikasi untuk Mendeteksi Jenis Sampah. *Jurnal Publikasi Manajemen Informatika*, 3(3), 152–161. <https://doi.org/10.55606/jupumi.v3i3.3751>
- Batista, T. C., Nappi, I., Xavier, M. V. M., Fiuza, I. O., Vasconcelos, C. B. M. de, & Enohi, R. T. (2025). Burnout in nursing: causal factors and impacts on health and professional performance – a systematic review. *Revista Brasileira de Medicina Do Trabalho*, 23(03), 01–09. <https://doi.org/10.47626/1679-4435-2025-1432>
- Belsare, K., Singh, M., Gandam, A., Samudrala, V., Singh, R., Soliman, N. F., ... Algarni, A. D. (2024). RETRACTED: Wireless sensor network-based machine learning framework for smart cities in intelligent waste management. *Heliyon*, 10(16), e36271. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36271>
- Febriyanti, T., Bijaksana, M. A., & Farady, I. (2023). Klasifikasi Citra Limbah Medis Menggunakan Pre-Trained Model Yang Berdasarkan CNN. *Jurnal Tugas Akhir Fakultas Informatika*.
- Firdaus, R. I., Sugiharto, W. H., & Ghozali, M. I. (2025). Implementasi Convolutional Neural Network Dalam Sistem Otomatis Pemilahan Sampah Infeksius Berbasis Citra Digital. *SisInfo*, 7(1), 11–22. <https://doi.org/10.37278/sisinfo.v7i1.1052>
- G, U., Sankaranarayanan, B., & R K A, B. (2024). Smart Waste Revolution: AI-Powered Biomedical Segregation and Recycling with IoT Integration. *International Journal of Mechanical Engineering*, 11(12), 38–46. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V11I12P104>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. , (2021).
- Muchtar, A. A., Riogilang, H., & Riogilang, H. (2022). Perencanaan Pengelolaan Limbah B3 Medis Padat Di Rumah Sakit Perguruan Tinggi Negeri. *TEKNO*, 20.
- Pratiwi, D., & Wardani, R. S. (2020). Analisis manajemen pengelolaan limbah medis padat B3 di rumah sakit. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 15(2), 112–121.
- Purwanti, A. A. (2018). Pengelolaan Limbah Padat Bahan Berbahaya Dan Beracun (B3) Rumah Sakit Di Rsd Dr.Soetomo Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 10(3), 291–298.
- Rahmadani, B., Harsoyo, I. T., & Olla, P. K. (2025). Rancang Bangun Alat Smart Bin AI Ruang Tunggu Pasien di Rumah Sakit. *JUSTEK: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 8(2), 192–201.
- Ramdani, F., & Nuroji. (2026). Sistem Monitoring Volume Sampah Medis Berdasarkan Ketinggian

- Menggunakan Sensor Ultrasonik Berbasis IoT dengan Notifikasi Telegram. *Journal of Information System Research*, 7(2), 460–469. <https://doi.org/10.47065/josh.v7i2.9236>
- Renhoran, C., Ismail, M. M., Priyaniti, A. A., Saputra, E. A., & Kumarajati, D. Y. H. (2024). Rancang Bangun Sistem Pemilah Limbah Medis Berbasis Arduino Dan Inductive Proximity. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3.4941>
- Safira Fegi Nisrina, Lawrence Adi Supriyono, & Basuki Rahmat. (2025). SmartBin Medis Berbasis AI dan Edge Computing untuk Manajemen Limbah Klinis yang Higienis. *Jurnal Informatika Dan Teknologi Komputer (JITEK)*, 5(2), 82–90. <https://doi.org/10.55606/jitek.v5i2.6385>
- Sandia, K. M., Yudhaa, A. P., Aryantoa, N. D., & Farabi, M. A. (2022). Klasifikasi sampah menggunakan Convolutional Neural Network. *Indonesian Journal of Data and Science (IJODAS)*, 3(2), 72–81.
- Wardahani, Y. A., Akbar, A. A., & Tejoyuwono, A. A. T. (2026). Hubungan Pengetahuan dan Sikap Perawat Instalasi Gawat Darurat Dengan Tindakan Dalam Upaya Pengelolaan Limbah Medis Padat di Rumah Sakit Umum Daerah Dr. Soedarso Kota Pontianak. *COMSERVA: Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat*, 5(10), 1911–1927. <https://doi.org/10.59141/comserva.v5i10.3522>