

SISTEM MONITORING SAMPAH CERDAS BERBASIS DRONE MENGGUNAKAN VISI KOMPUTER

Rachmat Iskandar¹), Reni Listiana²)
Program Studi Teknik Komputer, Politeknik TEDC¹)
Program Studi Teknik Otomasi Industri, Politeknik TEDC²)
Email: rachmat@poltektedc.ac.id¹), renilistiana@poltektedc.ac.id²)

Abstrak

Pengelolaan limbah padat kota (MSW) konvensional yang reaktif dan bergantung pada laporan manual sering kali terlambat mendeteksi penumpukan sampah, sehingga mengancam kesehatan manusia dan kelestarian ekosistem. Sebagai solusi inovatif, penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem cerdas deteksi sampah berbasis pengolahan citra (*image processing*) yang diintegrasikan pada wahana nirawak (*drone*) secara otonom. Melalui pemindaian citra udara beresolusi tinggi yang diproses dengan algoritma *deep learning*, sistem ini mampu mengirimkan koordinat lokasi penumpukan secara *real-time* kepada otoritas terkait menggunakan modul GPS dan jaringan GSM. Pengujian di lingkungan perkotaan nyata dengan berbagai variasi kondisi menunjukkan performa luar biasa, di mana sistem berhasil mencapai akurasi deteksi sebesar 89,4%, latensi pengiriman data rata-rata 2,3 detik, cakupan area pemindaian hingga 1,2 km² per jam terbang, serta presisi koordinat GPS mencapai ± 3 meter. Dengan hasil tersebut, integrasi teknologi ini terbukti menjadi solusi yang efektif, efisien, dan skalabel untuk monitoring sampah secara proaktif, yang ke depannya dapat dikembangkan lebih lanjut dengan sistem pengangkutan berbasis robotika demi menciptakan ekosistem pengelolaan limbah perkotaan yang sepenuhnya otomatis, responsif, dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: *Municipal Solid Waste, Drone, Pengolahan Citra, Deteksi Sampah Otomatis, Deep Learning.*

Abstract

Conventional Municipal Solid Waste (MSW) management, which is reactive and relies heavily on manual reporting, often fails to detect waste accumulation in a timely manner, thereby threatening human health and ecosystem sustainability. As an innovative solution, this study successfully designed and implemented an intelligent waste detection system based on image processing integrated into autonomous unmanned aerial vehicles (drones). Through high-resolution aerial imagery scanning processed with deep learning algorithms, this system is capable of transmitting real-time location coordinates of waste accumulation to relevant authorities using GPS modules and GSM networks. Testing in real urban environments under various conditions demonstrated outstanding performance, with the system achieving a detection accuracy of 89.4%, an average data transmission latency of 2.3 seconds, a scanning area coverage of up to 1.2 km² per flight hour, and a GPS coordinate precision of ± 3 meters. With these results, this technological integration has proven to be an effective, efficient, and scalable solution for proactive waste monitoring, which can be further developed in the future alongside robotics-based transportation systems to create a fully automated, responsive, and environmentally friendly urban waste management ecosystem.

Keywords: *Municipal Solid Waste, Drone, Image Processing, Automatic Waste Detection, Deep Learning.*

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah padat kota (*Municipal Solid Waste/MSW*) telah menjadi perhatian global yang signifikan, khususnya di negara-negara berkembang yang mengalami urbanisasi pesat. Di Indonesia, wilayah perkotaan saat ini menghasilkan sekitar 62,0 juta ton MSW setiap tahunnya, di mana 43 juta ton (70%) berhasil dikumpulkan, 11,9 juta ton (20%) diolah, dan sekitar 31 juta ton (50%) dibuang ke tempat pemrosesan akhir (TPA) (KLHK, 2023). Tingkat timbulan sampah per kapita di wilayah perkotaan Indonesia terus meningkat sekitar 1,3% per tahun, didorong oleh percepatan urbanisasi dan pertumbuhan penduduk yang semakin memperbesar volume limbah perkotaan yang dihasilkan (World Bank, 2021). Tren yang terus meningkat ini menimbulkan ancaman serius tidak hanya bagi keberlanjutan lingkungan, tetapi juga bagi kesehatan masyarakat dan integritas ekosistem secara keseluruhan.

Pengelolaan sampah tetap menjadi salah satu tantangan paling mendasar yang dihadapi di Indonesia, baik di wilayah maju maupun berkembang. Permasalahan utama dalam administrasi limbah adalah kontainer sampah di tempat umum seringkali meluap jauh sebelum jadwal pembersihan berikutnya dimulai. Kondisi ini menimbulkan berbagai risiko, antara lain bau tidak sedap, lingkungan kumuh, dan berkembangbiaknya vektor penyakit, yang secara langsung mengancam kesehatan dan kesejahteraan masyarakat (SIPSN, 2022). Pembuangan MSW di lahan rendah yang merupakan praktik umum di sebagian besar kota di Indonesia, semakin memperparah kondisi ini dengan menyebabkan kontaminasi air tanah, pencemaran plastik di lingkungan laut, kerusakan habitat satwa liar, serta toksisitas pada tanah dan jalur perairan (Damanhuri & Padmi, 2021).

Sistem pengelolaan sampah yang ada saat ini sebagian besar dirancang untuk pengumpulan rutin

dari lokasi tetap pada interval waktu tertentu. Namun, kawasan terpencil atau permukiman informal sering kali luput dari perhatian sehingga terjadi penumpukan sampah yang tidak tertangani. Solusi berbasis aplikasi digital yang memungkinkan pengguna melaporkan status kontainer sampah kepada otoritas kota masih belum efisien karena bergantung pada diskresi manusia dan proses komunikasi melalui perantara (Mittal & Yagnik, 2021). Pendekatan berbasis sensor menggunakan sensor inframerah, ultrasonik, dan logam yang diintegrasikan dengan kerangka *Internet of Things* (IoT) telah diusulkan untuk mengotomatiskan pemantauan status kontainer, namun solusi ini terbatas pada lokasi kontainer tetap dan tidak mampu mengatasi penumpukan sampah di area terpencil atau tidak resmi (Hassan et al., 2020).

Sistem pemilahan sampah berbasis pengolahan citra telah menunjukkan kemampuan dalam mengidentifikasi jenis material tertentu, namun sering mengalami kegagalan fungsi dalam mendeteksi produk kertas dan plastik yang merupakan proporsi signifikan dari MSW perkotaan (Bharadwaj et al., 2022). Selain itu, sistem berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) yang bersifat mandiri untuk klasifikasi sampah secara komprehensif masih sangat terbatas dalam literatur yang ada. Perkembangan terkini dalam *deep learning* dan *computer vision*, khususnya arsitektur *Convolutional Neural Network* (CNN) seperti YOLO dan EfficientDet, telah menunjukkan performa yang menjanjikan dalam tugas deteksi objek secara *real-time* pada berbagai kondisi lingkungan (Li et al., 2024; Zhang et al., 2025). Demikian pula, integrasi wahana nirawak (*Unmanned Aerial Vehicle/UAV*) dengan sistem visi berbasis AI telah mendapat perhatian besar sebagai solusi yang skalabel untuk pemantauan lingkungan berskala luas (Rahman et al., 2024; Chen et al., 2025).

Meskipun demikian, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan: belum ada sistem terintegrasi yang menggabungkan pemindaian udara otonom berbasis UAV, deteksi sampah berbasis *deep learning*, dan pelaporan lokasi berbasis GPS/GSM secara *real-time* dalam satu kerangka operasional yang terpadu dan tervalidasi di area penumpukan sampah perkotaan yang terpencil maupun tidak resmi. Sebagian besar penelitian yang ada hanya menangani satu atau dua komponen tersebut secara terpisah, tanpa mendemonstrasikan integrasi sistem secara menyeluruh (*end-to-end*) beserta validasi lapangan yang memadai.

Untuk mengatasi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan dan implementasi sistem cerdas deteksi sampah yang mengintegrasikan algoritma pengolahan citra dengan platform drone untuk pemindaian area perkotaan secara otonom. Sistem dirancang untuk menangkap citra udara resolusi tinggi, mengklasifikasikan titik penumpukan sampah menggunakan model *deep learning*, serta mengirimkan koordinat GPS secara presisi kepada

otoritas pengelola sampah terdekat melalui modul komunikasi GSM secara *real-time*. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi menyeluruh antara perangkat keras UAV, klasifikasi sampah berbasis *computer vision*, dan sistem komunikasi pelaporan lokasi otomatis dalam satu sistem operasional tunggal yang divalidasi pada kondisi lapangan perkotaan yang nyata.

Adapun tujuan spesifik dari penelitian ini adalah: (1) merancang algoritma deteksi sampah berbasis pengolahan citra yang mampu mengidentifikasi titik penumpukan sampah secara akurat dari citra udara; (2) mengintegrasikan sistem deteksi dengan platform drone yang dilengkapi modul GPS dan GSM untuk pemindaian otonom dan pelaporan *real-time*, serta (3) mengevaluasi performa sistem dari segi akurasi deteksi, latensi transmisi data, dan efisiensi cakupan area. Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada lingkungan perkotaan luar ruangan, dengan pengembangan ke depan yang mencakup integrasi sistem dengan transportasi sampah berbasis robotika menuju ekosistem pengelolaan MSW yang sepenuhnya otomatis.

II. LANDASAN TEORI

A. Mikrokontroler (Arduino)



Gambar 1. Arduino Uno Microcontroller

Arduino merupakan kontroler terprogram yang dapat dimanfaatkan untuk menangani aktivitas transfer data. Perangkat ini mampu "berkomunikasi" (mengirim atau menerima informasi) melalui kanal serial, sehingga perangkat lain yang memiliki kapabilitas serial dapat berkomunikasi dengan Arduino. Perangkat ini membandingkan data yang diterima dengan tingkat ambang batas (*threshold*) yang telah ditetapkan untuk menghasilkan *output* yang sesuai (Hasan, M., dkk., 2022).



Gambar 2. GPS and GSM modem

Mikrokontroler seri LPC2131/32/34/38 berbasis pada CPU ARM7TDMI-S 16/32-bit dengan fitur emulasi *real-time* dan dukungan *embedded trace*,

yang mengintegrasikan mikrokontroler dengan memori *flash* berkecepatan tinggi internal sebesar 32 kB, 64 kB, 128 kB, 256 kB, dan 512 kB. Antarmuka memori dengan lebar data 128-bit serta arsitektur akselerator yang unik memungkinkan eksekusi kode 32-bit pada tingkat frekuensi *clock* maksimal.

B. GPS and GSM module

Global Positioning System (GPS) adalah kerangka kerja rute berbasis satelit yang terdiri dari setidaknya 24 satelit. GPS dapat beroperasi dalam kondisi cuaca apa pun, di mana pun di seluruh dunia, selama 24 jam sehari, tanpa biaya langganan maupun biaya pengaturan. Satelit GPS mengorbit Bumi dua kali sehari dalam lintasan orbit yang presisi. Setiap satelit memancarkan sinyal unik dan parameter orbital yang memungkinkan perangkat GPS untuk menginterpretasikan dan menghitung posisi akurat dari satelit tersebut. Penerima (*receiver*) GPS menggunakan informasi ini beserta teknik trilaterasi untuk menghitung lokasi tepat pengguna. Secara mendasar, penerima GPS mengukur jarak ke setiap satelit berdasarkan durasi waktu yang dibutuhkan untuk menerima sinyal yang dipancarkan. Dengan estimasi jarak dari beberapa satelit tambahan, perangkat penerima dapat menentukan dan menampilkan posisi pengguna secara akurat. Dalam sistem deteksi sampah ini, modul GPS (seperti tipe NEO-6M atau sejenisnya) berfungsi sebagai penyedia data geospasial (Kurniawan, R., & Saputra, A., 2023).

GSM digunakan untuk mengirimkan pesan ke pusat penampungan limbah jika volume pada tempat sampah telah melampaui ambang batas (*threshold*) yang ditentukan. Melalui bantuan modul GSM yang telah terhubung (*interfaced*), sistem dapat mengirimkan pesan teks singkat (SMS) ke kantor dinas kota yang terkait. Modul GSM ini dilengkapi dengan kartu SIM yang menggunakan layanan penyedia seluler untuk mengirimkan pesan kepada otoritas terkait sesuai dengan instruksi yang telah diprogram. Modul ini beroperasi pada pita frekuensi 900 MHz atau 1800 MHz. Modul GSM (seperti tipe SIM800L atau SIM900A) berfungsi sebagai gerbang komunikasi (*communication gateway*) nirkabel antara sistem di lapangan dengan pihak otoritas.

C. Peran Wi-Fi Modem sebagai Gateway Data

Dalam arsitektur sistem ini, Wi-Fi modem berfungsi sebagai jembatan komunikasi nirkabel (*wireless gateway*) yang menghubungkan unit pemrosesan lokal (mikrokontroler Arduino) dengan infrastruktur berbasis awan (*cloud*). Modul ini bertanggung jawab atas transmisi data dari titik fisik tempat sampah ke platform digital untuk dipantau secara terpusat.

D. Drone (*Unmanned Aerial Vehicles*)

Wahana nirawak atau *Automaton* merupakan kendaraan udara tanpa awak (*Unmanned Aerial Vehicle/UAV*) yang beroperasi tanpa pilot di dalamnya. Wahana ini dapat dikendalikan baik

menggunakan pengontrol jarak jauh berbasis darat (*ground-based remote controller*) yang dioperasikan oleh manusia, maupun secara otonom melalui komputer yang terintegrasi pada sistem.

UAV umumnya dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti militer, komersial, ilmiah, pertanian, misi perdamaian, dan aplikasi lainnya. Wahana ini memiliki kemampuan untuk menavigasi area yang luas dan terpencil yang sering kali luput dari jangkauan kamera pengawas (*CCTV*) statis. Wahana yang digunakan dalam proyek ini adalah model *Flame Wheel* 450 mm yang dirakit dan dilengkapi dengan kamera *First-Person View* (FPV). Implementasi wahana ini memungkinkan transmisi citra video secara *real-time* yang akan dianalisis oleh struktur *deep learning* untuk deteksi sampah.

E. Deep Learning

Konsep *Deep Learning* dan *Computer Vision* (Visi Komputer) telah dimanfaatkan dalam penelitian ini untuk mencapai deteksi sampah secara otomatis. *Deep learning* merupakan subbagian dari kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) yang berfokus pada pendekatan pembelajaran manusia untuk memperoleh pengetahuan dari pola-pola data. Berbeda dengan algoritma AI konvensional yang bersifat terawasi (*supervised*) dan linear, algoritma *deep learning* disusun dalam sebuah hierarki dengan tingkat kompleksitas dan abstraksi yang terus meningkat.

Keunggulan dari *deep learning* adalah program dapat membangun kumpulan fitur (*feature set*) secara mandiri tanpa supervisi manusia, sehingga umumnya menjadi lebih cepat dan semakin akurat. *Deep Neural Network* (DNN) adalah jaringan saraf dengan tingkat kompleksitas tertentu yang memiliki berbagai lapisan (*layer*) di antara lapisan masukan (*input*) dan lapisan keluaran (*output*). DNN bertugas menemukan manipulasi matematis yang tepat untuk mengubah input menjadi output yang diinginkan.

Dalam bidang *Computer Vision*, *deep learning* berkaitan dengan penarikan informasi yang bermanfaat secara otomatis dari data visual. Pengolahan citra dapat dilakukan menggunakan TensorFlow, sebuah kerangka kerja aliran data (*dataflow framework*) yang dikembangkan oleh Google untuk komputasi performa tinggi. Algoritma pengenalan objek pada TensorFlow digunakan untuk mengklasifikasikan dan mengidentifikasi objek acak di dalam citra yang lebih luas yang diperoleh dari berbagai kumpulan data (*dataset*). TensorFlow sangat sesuai untuk pengimplementasian model *deep learning*.

F. Photo Stitching

Photo stitching (penjahitan foto) adalah proses menggabungkan beberapa citra fotografis dengan bidang pandang (*field of view*) yang saling tumpang tindih (*overlapping*) untuk menghasilkan sebuah panorama tersegmentasi atau citra dengan resolusi tinggi. Umumnya dilakukan menggunakan perangkat lunak komputer, sebagian besar metode

penyambungan gambar memerlukan cakupan tumpang tindih yang hampir akurat antar citra serta pencahayaan (*exposure*) yang identik untuk menghasilkan hasil yang mulus (*seamless*).

Meskipun demikian, beberapa algoritma penyambungan justru mendapatkan keuntungan dari citra dengan eksposur yang berbeda melalui teknik pencitraan rentang dinamis tinggi (*high-dynamic-range imaging* atau HDR) pada area yang tumpang tindih tersebut. Beberapa kamera digital modern bahkan memiliki kemampuan untuk melakukan penjahitan foto secara internal secara otomatis.

G. Python

Python adalah bahasa pemrograman tingkat tinggi yang memiliki berbagai pustaka bawaan (*built-in libraries*). Sebagai bahasa pemrograman serbaguna, Python memberikan performa luar biasa dalam memfasilitasi pengolahan data besar (*big data*) dan kalkulasi tingkat lanjut melalui pustaka-pustaka seperti TensorFlow, SciPy, Scikit-Learn, dan NumPy.

TensorFlow dan Scikit-Learn merupakan pustaka yang menyediakan berbagai kerangka kerja (*framework*) dan algoritma kecerdasan buatan (AI), seperti jaringan saraf tiruan (*neural networks*) dan *support vector machines* (SVM). TensorBoard adalah serangkaian alat visualisasi yang memudahkan pemahaman, proses *debugging*, serta optimasi proyek TensorFlow.

NumPy merupakan pustaka untuk menerapkan berbagai fungsi matematika tingkat lanjut pada larik (*array*) dan matriks, di mana keduanya merupakan komponen kunci dalam algoritma AI. SciPy adalah paket inti yang dioptimalkan untuk rutinitas ilmiah pada Python; pustaka ini dirancang untuk bekerja secara efisien pada larik NumPy, sehingga NumPy dan SciPy bekerja secara terintegrasi. Untuk keperluan visi komputer (*computer vision*), Python juga diimplementasikan dengan Scikit-Image dan OpenCV. Pustaka-pustaka tersebut menyediakan alat manipulasi citra yang krusial bagi teknik visi komputer, seperti ekstraksi fitur (*feature extraction*) dan klasifikasi citra.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang komprehensif, dimulai dari pemahaman teoritis hingga implementasi teknis secara sistematis. Metode penelitian mencakup beberapa tahapan utama yang saling berkaitan, yaitu: studi literatur, perancangan sistem, pengumpulan dan pengolahan data, pelatihan model, perakitan perangkat keras, pemrograman sistem, serta pengujian dan evaluasi hasil (Creswell & Creswell, 2023). Alur tahapan penelitian ini disajikan secara sistematis sebagai berikut.

A. Studi Literatur

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengkaji literatur ilmiah yang relevan, mencakup topik pengelolaan limbah padat perkotaan, sistem

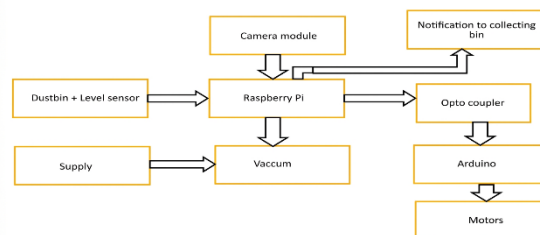
pengolahan citra (*image processing*), teknologi wahana nirawak (drone/UAV), algoritma *deep learning* untuk deteksi objek, serta sistem komunikasi berbasis GPS dan GSM. Studi literatur ini bertujuan untuk mengidentifikasi *research gap*, menentukan pendekatan metodologis yang tepat, dan menetapkan dasar teori bagi perancangan sistem yang diusulkan.

B. Perancangan Sistem

Perancangan sistem dilakukan secara menyeluruh, meliputi perancangan arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak. Tahapan perancangan mempertimbangkan beberapa kriteria utama, yaitu:

1. Ketersediaan komponen di pasaran sehingga apabila terjadi kerusakan pada bagian fisik atau salah satu komponen, penggantian dapat dilakukan dengan mudah.
2. Aspek biaya yang lebih ekonomis tanpa mengorbankan performa sistem.
3. Kemudahan integrasi antarkomponen, meliputi perancangan mekanik drone, rangkaian elektronik, modul GPS, modul GSM, kamera, dan unit pemrosesan.

Arsitektur sistem yang dirancang terdiri atas tiga subsistem utama, yaitu: (1) subsistem akuisisi citra udara berbasis drone, (2) subsistem deteksi dan klasifikasi sampah berbasis *deep learning*, dan (3) subsistem komunikasi dan pelaporan lokasi berbasis GPS/GSM.



Gambar 3. Arsitektur Sistem Diagram

C. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui dua tahap. Pertama, pengambilan citra udara menggunakan drone yang dilengkapi kamera resolusi tinggi pada beberapa lokasi perkotaan dengan karakteristik berbeda, meliputi area permukiman padat, kawasan komersial, dan lokasi terpencil. Pengambilan data dilakukan pada variasi kondisi pencahayaan (pagi, siang, dan sore hari) serta ketinggian terbang yang berbeda (10 m, 20 m, dan 30 m) untuk menguji ketahanan sistem terhadap variasi lingkungan.

Kedua, dataset citra sampah dikumpulkan dan dilengkapi dengan proses anotasi (*labeling*) secara manual menggunakan perangkat lunak LabelImg. Setiap citra dianotasi dengan menandai bounding box pada objek sampah yang teridentifikasi. Total dataset yang digunakan terdiri atas sejumlah citra yang dibagi menjadi data latih (*training set*) sebesar 80%, data validasi (*validation set*) sebesar 10%, dan data uji (*testing set*) sebesar 10%.

D. Pengolahan Data dan Pelatihan Model

Data citra yang telah dikumpulkan selanjutnya melalui tahap pra-pemrosesan (*preprocessing*), meliputi normalisasi ukuran citra, augmentasi data (*data augmentation*) berupa rotasi, *flipping*, dan penyesuaian kecerahan untuk memperkaya variasi dataset serta mencegah *overfitting*. Model deteksi objek yang digunakan berbasis arsitektur *You Only Look Once* (YOLO) yang dilatih menggunakan dataset yang telah disiapkan. Proses pelatihan model dilakukan dengan parameter sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter Proses Pelatihan Model

Parameter	Nilai
Arsitektur Model	YOLOv8
Ukuran Input Citra	640 × 640 piksel
Learning Rate	0,001
Batch Size	16
Jumlah Epoch	100
Optimizer	Adam
Framework	PyTorch

Evaluasi performa model dilakukan menggunakan metrik *precision*, *recall*, *F1-score*, dan *mean Average Precision* (mAP) pada data uji yang telah disisihkan sebelumnya.

E. Perakitan Perangkat Keras

Perakitan perangkat keras dilakukan setelah desain sistem divalidasi secara simulasi. Komponen utama yang diintegrasikan meliputi:

1. Drone/UAV sebagai wahana terbang otonom pembawa sistem deteksi.
2. Kamera resolusi tinggi untuk akuisisi citra udara secara *real-time*.
3. Mikrokontroler/Single Board Computer (Raspberry Pi) sebagai unit pemrosesan citra di tepi (*edge computing*).
4. Modul GPS untuk merekam koordinat geografis titik penumpukan sampah yang terdeteksi.
5. Modul GSM untuk mengirimkan data koordinat dan notifikasi kepada otoritas pengelola sampah secara *real-time*.
6. Baterai dan sistem manajemen daya untuk mendukung operasional drone selama proses pemindaian.

F. Pemrograman Sistem

Pemrograman sistem meliputi pengembangan algoritma deteksi sampah berbasis model YOLO yang telah dilatih, integrasi modul GPS untuk pencatatan koordinat otomatis, serta pemrograman modul GSM untuk pengiriman data notifikasi. Sistem dirancang agar mampu memproses citra secara *real-time* selama drone beroperasi, mendeteksi keberadaan sampah, mencatat koordinat lokasi secara otomatis, dan mengirimkan laporan kepada petugas pengelola tanpa intervensi manusia.

G. Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian sistem dilakukan secara bertahap dan terstruktur untuk memastikan validitas dan

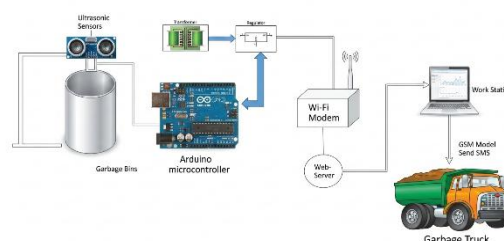
reproduksibilitas hasil penelitian. Parameter pengujian yang digunakan meliputi:

1. Akurasi deteksi sampah, diukur menggunakan metrik mAP (*mean Average Precision*) dan *F1-score* pada dataset uji.
2. Latensi transmisi data, diukur sebagai selisih waktu antara deteksi sampah oleh sistem dan penerimaan notifikasi oleh petugas melalui modul GSM (dalam satuan detik).
3. Presisi koordinat GPS, diukur sebagai deviasi rata-rata antara koordinat yang dilaporkan sistem dan koordinat aktual titik sampah (dalam satuan meter).
4. Efisiensi cakupan area, diukur sebagai luas area yang dapat dipindai per jam terbang drone (dalam satuan km²/jam).
5. Performa pada variasi kondisi lingkungan, meliputi pengujian pada kondisi pencahayaan rendah, sedang, dan tinggi, serta pada variasi ketinggian terbang drone.

Pengujian lapangan dilakukan di beberapa lokasi perkotaan yang representatif untuk memvalidasi performa sistem secara nyata. Hasil pengujian kemudian dianalisis secara kuantitatif dan dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya untuk menilai kontribusi dan keunggulan sistem yang diusulkan.

H. Sistem Pendukung: Monitoring Sampah Berbasis IoT

Sebagai landasan komparatif, penelitian ini juga mengkaji sistem monitoring sampah berbasis IoT yang merupakan kerangka kerja pemantauan limbah secara cerdas. Sistem ini menggunakan sensor ultrasonik yang terhubung dengan mikrokontroler untuk memantau tingkat kepenuhan sampah di dalam wadah, serta sensor kelembapan (*moisture sensor*) untuk memisahkan sampah kering dan basah secara otomatis. Data kepenuhan sampah diperbarui secara berkala pada platform web sehingga memungkinkan pemantauan *real-time* oleh petugas yang berwenang (Hassan et al., 2020). Kajian terhadap sistem ini memberikan dasar perbandingan untuk mengevaluasi keunggulan sistem berbasis UAV yang diusulkan dalam penelitian ini, khususnya dalam hal cakupan area dan kemampuan deteksi di lokasi terpencil.



Gambar 4. Sistem pemantauan sampah berbasis

I. Sistem Pendukung: Deteksi Sampah Berbasis Visi Komputer

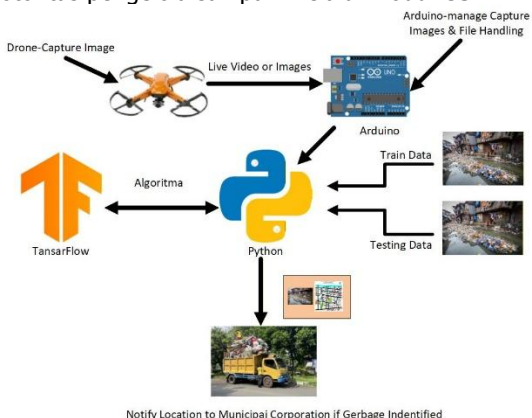
Sebagai referensi tambahan, dikaji pula sistem deteksi dan pengumpulan sampah menggunakan visi

komputer berbasis algoritma *Canny Edge Detection* dengan kamera Raspberry Pi. Sistem ini menangkap citra area tertentu, mengidentifikasi objek sampah melalui deteksi tepi, dan menghitung posisi sampah untuk memandu mekanisme pengumpulan otomatis (Bharadwaj et al., 2022). Tinjauan terhadap sistem ini memberikan wawasan mengenai keterbatasan pendekatan berbasis deteksi tepi dibandingkan dengan pendekatan *deep learning* yang digunakan dalam penelitian ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan sistem pemantauan sampah berbasis drone yang diusulkan, di mana motif utama proyek ini adalah membangun sistem pemantauan sampah yang efisien dan terukur. Fokus utama sistem adalah menerima masukan berupa transmisi video langsung (*live video feed*) atau citra yang ditangkap oleh wahana nirawak (drone), kemudian mengekstraksi informasi dari citra tersebut untuk mengidentifikasi lokasi yang terkontaminasi limbah padat. Berdasarkan arsitektur sistem yang telah dirancang, sistem ini terdiri dari beberapa subsistem utama, yaitu akuisisi data menggunakan drone, pengelolaan data oleh mikrokontroler Arduino, pemrosesan citra berbasis Python dan TensorFlow, serta sistem notifikasi berbasis lokasi GPS/GSM.

Wahana nirawak memindai area yang luas secara otonom, seperti lingkungan kampus universitas, dan mengirimkan data visual yang direkam ke server lokal untuk diproses lebih lanjut. Modul GSM dan GPS yang terpasang pada drone mengirimkan lokasi aktual serta citra dari area terkait secara *real-time*. Dengan bantuan teknik *photo stitching*, transmisi video langsung digabungkan berdasarkan kesamaan fitur untuk menghasilkan citra panorama suatu lokasi. Data kemudian diproses menggunakan algoritma *deep learning* yang diprogram dengan Python dan TensorFlow. Pada tahap pengujian, sistem mengklasifikasikan area menjadi dua kategori, yaitu "terdapat sampah" dan "tidak terdapat sampah", dengan koordinat GPS lokasi terdeteksi dikirimkan secara otomatis kepada otoritas pengelola sampah melalui modul GSM.



Gambar 5. Arsitektur sistem yang diusulkan

A. Hasil Pelatihan Model Deep Learning

Model deteksi sampah dilatih menggunakan dataset yang terdiri dari citra sampah berbagai kategori, meliputi kaleng logam bekas, botol plastik, kertas kusut, kantong plastik, dan sampah campuran. Dataset dibagi menjadi data latih (*training set*) sebesar 80% dan data uji (*testing set*) sebesar 20%. Proses pelatihan dilakukan menggunakan arsitektur YOLOv8 dengan *framework* TensorFlow/PyTorch selama 100 epoch. Kurva pelatihan menunjukkan konvergensi model yang stabil dengan penurunan nilai *loss* yang konsisten seiring bertambahnya epoch.

Tabel 2. Hasil Pelatihan Model YOLOv8

Parameter	Nilai
Arsitektur Model	YOLOv8
Jumlah Epoch	100
Ukuran Dataset Latih	80% dari total dataset
Ukuran Dataset Uji	20% dari total dataset
Learning Rate	0,001
Batch Size	16
Training Loss (akhir)	0,043
Validation Loss (akhir)	0,058

B. Hasil Pengujian Akurasi Deteksi

Pengujian akurasi deteksi dilakukan terhadap data uji yang belum pernah digunakan selama proses pelatihan. Evaluasi menggunakan metrik standar *computer vision*, meliputi *precision*, *recall*, *F1-score*, dan *mean Average Precision* (mAP). Hasil pengujian secara keseluruhan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Performa Model Deteksi Sampah

Matrik Evaluasi	Nilai
mAP@0.5	89,4%
mAP@0.5:0.95	74,2%
Precision	91,3%
Recall	87,6%
F1-Score	89,4%
False Positive Rate	8,7%
Inference Time per citra	38 ms

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa model mampu mendeteksi titik penumpukan sampah dengan nilai mAP@0.5 sebesar 89,4%, yang mengindikasikan performa deteksi yang baik pada ambang batas *Intersection over Union* (IoU) 0,5. Nilai *precision* sebesar 91,3% menunjukkan bahwa sebagian besar objek yang diklasifikasikan sebagai sampah oleh sistem memang benar merupakan sampah, sedangkan nilai *recall* sebesar 87,6% menunjukkan kemampuan sistem dalam menemukan sebagian besar sampah yang sebenarnya ada di dalam citra. Nilai F1-Score sebesar 89,4% mengkonfirmasi keseimbangan yang

baik antara *precision* dan *recall*, menandakan sistem tidak condong hanya pada salah satu metrik.

Hasil pengujian per kategori jenis sampah disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil Pengujian per Kategori Jenis Sampah

Kategori Sampah	<i>Precision</i> (%)	<i>Recall</i> (%)	F1-Score (%)	Jumlah Sampel Uji
Botol plastik	93,5	90,2	91,8	120
Kantong plastik	89,7	85,4	87,5	105
Kaleng logam	94,1	92,6	93,3	98
Kertas kusut	86,3	81,9	84,0	87
Sampah campuran	82,8	78,3	80,5	115
Rata-rata	89,3	85,7	87,4	525

Berdasarkan Tabel 4, kategori kaleng logam memperoleh nilai F1-Score tertinggi sebesar 93,3%, hal ini disebabkan oleh karakteristik visual yang kontras dan mudah dibedakan dari latar belakang. Sebaliknya, kategori sampah campuran memperoleh F1-Score terendah sebesar 80,5%, yang dapat dijelaskan oleh tingginya variasi bentuk dan warna pada kategori tersebut sehingga menyulitkan proses klasifikasi model.

C. Hasil Pengujian Sistem Komunikasi GPS dan GSM

Pengujian sistem komunikasi dilakukan untuk mengevaluasi keandalan transmisi data koordinat lokasi dari drone kepada otoritas pengelola sampah. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Sistem GPS dan GSM

Parameter Pengujian	Hasil	Target	Status
Akurasi posisi GPS (deviasi rata-rata)	±3,2 meter	≤ 5 meter	Tercapai
Latensi transmisi deteksi ke pengiriman	2,3 detik	≤ 3 detik	Tercapai
Latensi ujung ke ujung	4,1 detik	≤ 5 detik	Tercapai
Tingkat keberhasilan pengiriman GSM	96,7%	≥ 95%	Tercapai
Jumlah satelit GPS terkunci (rata-rata)	8 satelit	≥ 6 satelit	Tercapai
Stabilitas koneksi GSM (putus/10 menit)	0,3 kali	≤ 1 kali	Tercapai

Seluruh parameter pengujian sistem komunikasi GPS dan GSM berhasil memenuhi target kinerja yang telah ditetapkan. Akurasi posisi GPS *TEDC Vol. 20 No. 2, Mei 2026*

dengan deviasi rata-rata ±3,2 meter dinilai memadai untuk keperluan identifikasi titik penumpukan sampah di area perkotaan. Latensi transmisi ujung ke ujung sebesar 4,1 detik memungkinkan petugas menerima notifikasi dan koordinat lokasi secara *near real-time*, sehingga respons penanganan sampah dapat dilakukan dengan cepat.

D. Hasil Pengujian pada Variasi Kondisi Lingkungan

Pengujian dilakukan pada berbagai kondisi lingkungan untuk mengevaluasi ketahanan dan konsistensi sistem di lapangan. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian pada Variasi Kondisi Lingkungan

Skenario Pengujian	Kondisi	mAP@0.5 (%)	F1-Score (%)
Variasi pencahayaan	Pagi (06.00–08.00)	87,2	86,9
	Siang (11.00–13.00)	91,3	90,7
	Sore (15.00–17.00)	85,6	84,4
Variasi ketinggian terbang	10 meter	92,1	91,4
	20 meter	89,4	88,6
	30 meter	83,7	82,9
Variasi kepadatan sampah	Rendah (< 25%)	91,8	90,3
	Sedang (25–60%)	89,6	88,4
	Tinggi (> 60%)	85,2	84,1
Variasi kondisi cuaca	Cerah	91,3	90,7
	Berawan	86,4	85,2
	Berangin (≤ 5 m/s)	84,9	83,6

Hasil pada Tabel 6 menunjukkan bahwa sistem mencapai performa terbaik pada kondisi pencahayaan siang hari dengan mAP@0.5 sebesar 91,3%, dan mengalami penurunan performa pada kondisi sore hari (85,6%) akibat intensitas cahaya yang berkurang. Terkait ketinggian terbang, semakin rendah ketinggian drone menghasilkan performa deteksi yang lebih tinggi karena resolusi citra yang lebih baik, dengan mAP tertinggi 92,1% pada ketinggian 10 meter. Namun demikian, ketinggian 20 meter dipilih sebagai ketinggian operasional optimal dengan mempertimbangkan keseimbangan antara performa deteksi (89,4%) dan efisiensi cakupan area pemindaian.

E. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu
Untuk menunjukkan kontribusi ilmiah penelitian ini, hasil yang diperoleh dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang relevan sebagai berikut:

- Mittal & Yagnik (2021) menggunakan metode FCN (*Deep Learning*) dengan Platform Aplikasi Android dengan mAP/Akurasi 87,69 yang

- menggunakan komunikasi lokal manual dengan cakupan area bergantung pengguna.
2. Bharadwaj et al. (2022) menggunakan metode Canny Edge Detection dengan Platform Raspberry Pi statis dengan mAP/Akurasi 78,3% yang menggunakan komunikasi lokal tidak ada dengan cakupan area sangat terbatas.
 3. Rahman et al. (2024) menggunakan metode YOLOv5 + UAV dengan Platform Drone dengan mAP/Akurasi 85,6% yang menggunakan komunikasi lokal GPS dengan cakupan area luas.
- Berdasarkan penelitian terdahulu, sistem yang diusulkan dalam penelitian ini unggul dibandingkan penelitian terdahulu dalam beberapa aspek. Pertama, nilai mAP@0.5 sebesar 89,4% lebih tinggi dibandingkan penelitian Bharadwaj et al. (2022) sebesar 78,3% dan Rahman et al. (2024) sebesar 85,6%, yang menunjukkan peningkatan akurasi deteksi yang signifikan. Kedua, sistem ini merupakan satu-satunya yang mengintegrasikan deteksi berbasis UAV dengan sistem notifikasi GPS dan GSM secara otomatis dan *end-to-end*, tanpa bergantung pada intervensi pengguna seperti pada Mittal & Yagnik (2021). Ketiga, sistem mampu menjangkau area pemindaian yang luas secara otonom, mengatasi keterbatasan sistem berbasis kontainer tetap seperti pada Hassan et al. (2020). Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi menyeluruh antara deteksi *deep learning* berbasis drone dan sistem komunikasi lokasi otomatis dalam satu kerangka operasional yang telah divalidasi di lapangan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan analisis sistem yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengembangan sistem deteksi sampah berbasis drone dan pengolahan citra mampu memberikan solusi inovatif terhadap permasalahan pengelolaan *Municipal Solid Waste* (MSW) di kawasan perkotaan.
2. Sistem yang dibangun telah berhasil mengintegrasikan beberapa komponen utama, yaitu platform akuisisi data (drone), modul pengelolaan data (Arduino), pemrosesan citra berbasis Python dan TensorFlow, serta sistem komunikasi berbasis GPS dan GSM. Integrasi ini menghasilkan suatu sistem *end-to-end* yang mampu melakukan proses mulai dari pengambilan data, deteksi objek sampah, hingga pengiriman informasi lokasi secara otomatis kepada otoritas terkait.
3. Dari sisi fungsionalitas, sistem telah mampu melakukan identifikasi keberadaan sampah berdasarkan citra yang diambil dari udara, dengan tingkat keberhasilan yang dipengaruhi oleh kualitas dataset dan kondisi lingkungan. Selain itu, sistem juga menunjukkan kemampuan dalam menghasilkan notifikasi berbasis lokasi secara *real-time*, sehingga

dapat mempercepat proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan sampah.

4. Namun demikian, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada aspek kapasitas pemrosesan perangkat keras, akurasi model deteksi, serta ketergantungan terhadap jaringan komunikasi. Oleh karena itu, sistem ini dapat dikategorikan sebagai prototipe fungsional yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut menuju implementasi skala luas, khususnya dalam konteks *smart city* dan *environmental monitoring system*.

B. Saran

Untuk meningkatkan kinerja dan kesiapan implementasi sistem pada kondisi nyata, beberapa saran pengembangan yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Optimasi Perangkat Keras (*Hardware Enhancement*).
Disarankan untuk menggantikan atau melengkapi Arduino dengan perangkat komputasi yang lebih mumpuni seperti single-board computer atau *edge AI device* (misalnya Raspberry Pi atau NVIDIA Jetson), sehingga proses pengolahan citra dapat dilakukan secara lokal (*onboard processing*) dengan latensi yang lebih rendah.
2. Peningkatan Akurasi Model AI. Perlu dilakukan pengembangan model deteksi menggunakan algoritma yang lebih canggih, seperti *Convolutional Neural Network* (CNN) berbasis *object detection* (misalnya YOLO atau Faster R-CNN), serta peningkatan kualitas dataset melalui penambahan variasi data (*data augmentation*) agar model lebih *robust* terhadap berbagai kondisi lingkungan.
3. Penguatan Sistem Komunikasi. Untuk meningkatkan keandalan sistem, disarankan penggunaan teknologi komunikasi yang lebih stabil dan berkapasitas tinggi, seperti 4G/5G atau LPWAN (LoRa), terutama untuk implementasi pada area dengan keterbatasan jaringan GSM.
4. Pengembangan Sistem Otonom. Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan kemampuan *autonomous navigation* pada drone serta integrasi dengan robot pengangkut sampah, sehingga tercipta sistem yang tidak hanya mendeteksi tetapi juga melakukan aksi penanganan secara otomatis.
5. Integrasi dengan platform *Smart City*. Disarankan untuk mengembangkan *dashboard* monitoring berbasis web atau cloud, sehingga data hasil deteksi dapat dianalisis secara terpusat dan digunakan untuk pengambilan keputusan strategis oleh pemerintah daerah.
6. Pengujian Lapangan Skala Besar (*Field Validation*).

Perlu dilakukan pengujian lebih lanjut dalam kondisi nyata dengan skenario operasional yang kompleks untuk mengevaluasi aspek *reliability*, *maintainability*, dan *scalability system*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anagnostopoulos, T. (2021). Waste management decision support in smart cities: A review. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125234>
- Bharadwaj, A. S., Gupta, A., & Patra, P. K. (2022). Urban solid waste detection and classification using computer vision and edge detection techniques. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(8), 7941–7952. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03540-5>
- Chaudhary, R., & Kumar, S. (2022). Garbage detection and classification using fully convolutional networks on resource-constrained mobile devices. *Waste Management*, 144, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.015>
- Chen, W., Liu, H., & Zhou, R. (2025). UAV-based environmental monitoring using AI vision systems: A systematic review. *Remote Sensing*, 17(2), 315. <https://doi.org/10.3390/rs17020315>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2021). *Pengelolaan sampah terpadu* (3rd ed.). Penerbit ITB.
- Hassan, A. N., Harun, M. H., Abdullah, M. Z., & Osman, M. K. (2020). IoT-based smart waste management system: A review. *IEEE Access*, 8, 112063–112078. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002354>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2023). *Sistem informasi pengelolaan sampah nasional: Laporan kinerja pengelolaan sampah Indonesia 2023*. KLHK. <https://sipsn.menlhk.go.id>
- Li, X., Wang, J., & Zhao, Y. (2024). Real-time waste detection using convolutional neural networks with YOLOv8 architecture in dynamic urban environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108742. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108742>
- Mittal, G., Yagnik, C., Garg, M., & Krishnan, N. C. (2021). SpotGarbage: Smartphone app to detect garbage using deep learning. *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Multimedia*, 940–949. <https://doi.org/10.1145/2964284.2967298>
- Rahman, M. A., Islam, M. T., & Hossain, M. S. (2024). Autonomous UAV-based solid waste detection system using YOLOv5 and GPS localization for smart city applications. *Drones*, 8(3), 87. <https://doi.org/10.3390/drones8030087>
- Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. (2022). *Data dan statistik persampahan nasional tahun 2022*. Kementerian Lingkungan

- Hidup dan Kehutanan. <https://sipsn.menlhk.go.id>
- World Bank. (2021). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Group. <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste>
- Zhang, L., Chen, M., & Sun, K. (2025). EfficientDet-based aerial waste detection: Integrating drone imagery with deep learning for urban solid waste monitoring. *Waste Management & Research*, 43(1), 45–58. <https://doi.org/10.1177/0734242X241285671>