EcoDroneVerse: Pemantauan Sampah Sungai Berbasis AI-Drone dan Virtual Twin

Firmansyah*[1], Masayu Sarah Amelia[2], Arabela Kogoya[3], Ferizka Tiara Devani[4]
[1,2]Politeknik Negeri Sriwijaya; Jl. Srijaya Negara, Bukit Besar, Bukit Lama, Ilir Barat I, Bukit Lama, Ilir Bar. I, Kota Palembang, Sumatera Selatan., 0711 355918
[3]Jurusan Manajemen Informatika, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang
e-mail: *[1]firmansyah38053@gmail.com, [2]masayusaraha@gmail.com, [3]elakogoya@gmail.com, [4]ferizka.tiara.devani@polsri.ac.id

Abstrak

Pengelolaan sampah sungai di Indonesia masih menghadapi tantangan serius akibat tingginya timbulan sampah, keterbatasan infrastruktur pengelolaan, serta lemahnya sistem pemantauan yang mampu bekerja secara real-time dan berkesinambungan. Kondisi ini semakin mendesak di wilayah perkotaan dengan tingkat urbanisasi tinggi, di mana akumulasi sampah sungai tidak hanya mencemari lingkungan tetapi juga memperbesar risiko banjir. EcoDroneVerse ditawarkan sebagai gagasan konseptual yang mengintegrasikan drone udara dan bawah air, kecerdasan buatan, serta virtual twin untuk mendeteksi, memetakan, dan memprediksi akumulasi sampah. Data spasial dari citra UAV dan sensor sonar diproses menggunakan algoritma deteksi berbasis AI, lalu diproyeksikan ke dalam model virtual tiga dimensi guna merepresentasikan kondisi sungai secara menyeluruh. Kajian ini bersifat konseptual berbasis sintesis literatur, dengan indikator kuantitatif berupa potensi akurasi deteksi di atas 80%, cakupan operasi drone sekitar 2 km per sorti, dan latensi pemrosesan rendah yang dijadikan acuan untuk roadmap pengembangan prototipe. Visualisasi interaktif melalui dashboard mendukung identifikasi titik kritis penumpukan sampah serta simulasi risiko banjir pada musim hujan maupun kemarau, sekaligus menjadi sarana edukasi dan kolaborasi bagi pemangku kepentingan. Dengan demikian, EcoDroneVerse berpotensi menjadi arah baru pengelolaan sungai berbasis teknologi cerdas dan berkelanjutan.

Kata kunci*—drone, kecerdasan buatan, virtual twin, pemantauan sungai, pengelolaan sampah*

Abstract

River waste management in Indonesia faces serious challenges due to high waste generation, limited infrastructure, and weak monitoring systems that cannot operate in real-time and continuously. This issue is increasingly urgent in urban areas with high urbanization, where river waste accumulation not only pollutes the environment but also raises the risk of flooding. EcoDroneVerse is proposed as a conceptual idea integrating aerial and underwater drones, artificial intelligence, and virtual twin technology to detect, map, and predict waste buildup. Spatial data from UAV imagery and sonar sensors are processed with AI-based detection algorithms, then projected into a three-dimensional virtual model to represent river conditions comprehensively. This study is conceptual and based on literature synthesis, with quantitative indicators including potential detection accuracy above 80%, drone operational coverage of about 2 km per sortie, and low processing latency as benchmarks for prototype development. Interactive visualization through a dashboard supports identifying critical waste accumulation points and simulating flood risks during rainy and dry seasons. It also serves as a platform for education and collaboration among stakeholders. Thus, EcoDroneVerse has the potential to become a new direction for smart, sustainable river management.

Keywords—*drone, artificial intelligence, virtual twin, river monitoring, waste management*

1.PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah di Indonesia menghadapi tantangan yang semakin kompleks seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan percepatan urbanisasi. Berdasarkan data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), timbulan sampah dari 323 kabupaten/kota di Indonesia pada tahun 2024 mencapai 35.313.107,58 ton per tahun. Dari jumlah tersebut, hanya sekitar 38,63% yang dikelola dengan layak, sedangkan sisanya, yaitu 61,37% belum terkelola. Keadaan ini menunjukkan urgensi dalam memperkuat sistem pengelolaan sampah di Indonesia melalui peningkatan kapasitas fasilitas pengelolaan, penegakan regulasi, serta peran aktif masyarakat dalam pemilahan dan pengurangan sampah [1].

Permasalahan pengelolaan sampah ini tidak hanya terlihat pada skala nasional, tetapi juga nyata pada tingkat lokal yaitu lingkungan tempat tinggal. Studi kasus di sepanjang Kali Pepe, Surakarta, khususnya di RW 21 Kelurahan Gilingan, Kecamatan Banjarsari, menunjukkan bagaimana rendahnya kesadaran masyarakat dan keterbatasan fasilitas pengelolaan sampah menyebabkan sampah rumah tangga dibuang langsung ke sungai. Kondisi ini tidak hanya menurunkan kualitas lingkungan sungai, tetapi juga memperparah risiko banjir akibat penyumbatan aliran air [2]. Studi di Banjarmasin, misalnya, menemukan bahwa warga bantaran sungai membuang lebih dari 2.800 ton sampah padat per tahun serta limbah cair rumah tangga melebihi 1,1 juta m^3 yang langsung mencemari perairan [3]. Penelitian tersebut menekankan bahwa perubahan perilaku masyarakat, didukung dengan penyediaan sarana pengelolaan sampah yang memadai, merupakan langkah penting dalam upaya mitigasi bencana banjir berbasis pengelolaan sampah.

Jenis-jenis sampah yang dibuang ke sungai tidak hanya berupa sampah organik dan plastik rumah tangga, tetapi juga sampah elektronik (*e-waste*). Indonesia menghasilkan sekitar 745 ribu ton e-waste per tahun, tertinggi di Asia Tenggara, dengan hanya 17,4% yang dikelola kembali secara benar [4]. Permasalahan ini juga tercermin dalam tinjauan sistematis [5], yang menemukan bahwa di kawasan Asia-Pasifik—termasuk Indonesia—e-waste tumbuh sangat cepat, sementara praktik pengelolaan dan daur ulang masih terbatas serta didominasi sektor informa.

Berbagai upaya mitigasi banjir telah dilakukan pemerintah, seperti pembangunan kanal, tanggul, kolam retensi, serta kebijakan Zero Delta Q yang mewajibkan bangunan tidak menambah debit air limpasan [6]. Namun, kebijakan tersebut lebih menekankan pada aspek infrastruktur dan pengendalian tata ruang, sementara persoalan utama seperti pencemaran sungai, penumpukan sampah, dan keterbatasan pemantauan real-time belum teratasi. Hal ini menegaskan bahwa pengelolaan banjir perlu diperkuat dengan pendekatan teknologi yang mampu mendeteksi, memantau, dan memprediksi pergerakan sampah sungai secara komprehensif. Penelitian sebelumnya banyak berfokus pada aspek umum pengelolaan lingkungan, contohnya kebijakan pengelolaan sampah plastik di Kota Semarang yang belum optimal karena rendahnya partisipasi masyarakat, keterbatasan infrastruktur, dan lemahnya penegakan hukum [7].

Sejalan dengan perkembangan teknologi mutakhir, kajian terkini mulai mengarah pada deteksi sampah sungai menggunakan unmanned aerial vehicle (UAV) dan computer vision (CV). Misalnya penelitian yang dilakukan Morandini et al. (2025) menunjukkan bahwa model YOLOv8 dan Faster-R-CNN mampu mengenali sampah permukaan sungai dari citra UAV dengan tingkat akurasi tinggi, meskipun deteksi sampah tak beraturan masih menjadi tantangan [8]. Selain sampah permukaan, riset lain mencoba mengatasi keterbatasan dengan mengembangkan metode deteksi limbah bawah air berbasis video object detection dan post-processing tubelet linking, yang meningkatkan kemampuan identifikasi sampah baik di permukaan maupun bawah perairan [9].

Di sisi lain, konsep digital twin semakin banyak diterapkan dalam pengelolaan lingkungan. Digital twin adalah model virtual atau replika digital dari objek fisik atau sistem

nyata, yang diperbarui dengan data terkini (termasuk data historis dan real-time), dan digunakan untuk pemantauan, simulasi, analisis, prediksi, dan pengambilan keputusan [10]. Bahkan, proyek di Sungai Yangtze, Tiongkok, mengembangkan digital twin berskala basin untuk memprediksi banjir, sedimentasi, dan perubahan tata guna lahan [11]. Penerapan ini menunjukkan potensi besar digital twin dalam mendukung perencanaan lingkungan dan mitigasi risiko.

Seiring dengan perkembangan tersebut, muncul konsep virtual twin yang membawa gagasan digital twin ke tingkat yang lebih canggih dan interaktif. Jika digital twin lebih berfokus pada pemantauan operasional, virtual twin menekankan pada simulasi mendalam dan optimalisasi desain. Virtual twin didefinisikan sebagai representasi virtual yang sangat rinci dan akurat dari suatu produk, proses, atau sistem, yang berfungsi sebagai testing ground untuk memprediksi hasil, menguji berbagai skenario, dan memperbaiki desain tanpa biaya serta keterbatasan eksperimen dunia nyata [12]. Dengan kemampuan ini, virtual twin membuka ruang bagi pengembangan sistem pengelolaan lingkungan yang lebih proaktif dan adaptif.

Teknologi sonar dan multibeam echosounder juga sudah terbukti sebagai alat penting dalam pengukuran kondisi dasar perairan. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan Nugroho, et al. (2022) menunjukkan bahwa teknologi multibeam dapat menghasilkan data batimetri dengan akurasi tinggi dan kedalaman dasar laut yang terukur sesuai standar hidrographi internasional, menyediakan peta kedalaman yang detil dan dapat digunakan sebagai basis pemetaan kondisi fisik perairan [13]. Integrasi teknologi seperti ini memungkinkan virtual twin tidak hanya memodelkan permukaan dan limbah di atas air, tetapi juga kondisi bawah air secara nyata dan akurat.

Berdasarkan perkembangan konsep dan teknologi tersebut, masih terdapat kebutuhan untuk merancang sistem terintegrasi yang tidak hanya berfokus pada deteksi, tetapi juga mampu memodelkan serta memprediksi dampak lingkungan secara komprehensif. Celah inilah yang coba dijawab melalui konsep EcoDroneVerse, yaitu sistem pemantauan sampah sungai berbasis AI-Drone dan Virtual Twin. Sistem ini dibangun di atas tiga pilar teknologi utama, yaitu:

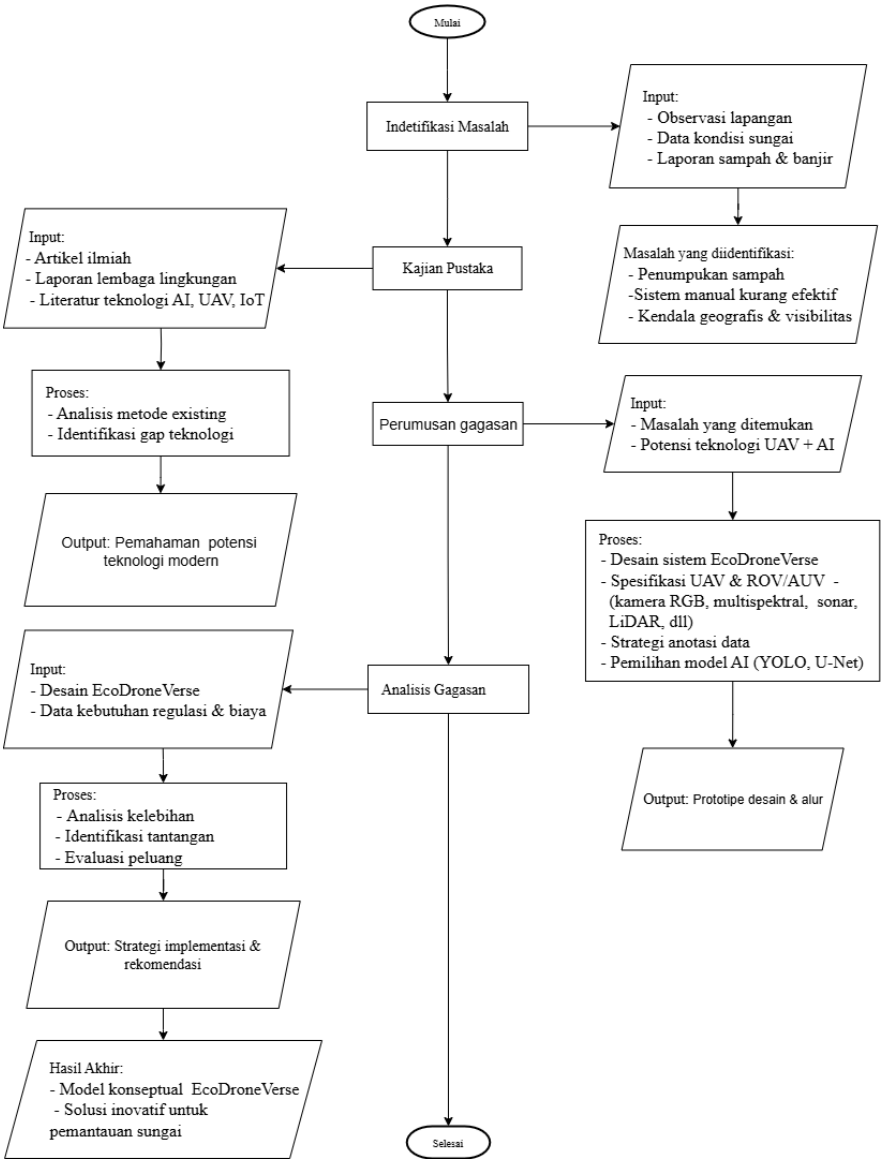
1. Drone dan Computer Vision (CV) – digunakan untuk deteksi dan identifikasi sampah di permukaan air dengan akurasi tinggi.
2. Sensor Bawah Air – seperti sonar atau multibeam echosounder, untuk mendeteksi limbah yang tenggelam, khususnya e-waste yang berbahaya.
3. Virtual Twin – menciptakan representasi digital dinamis dari sungai dengan mengintegrasikan data drone dan sensor bawah air, sehingga memungkinkan simulasi real-time, prediksi risiko banjir, serta visualisasi interaktif untuk mendukung pengambilan keputusan.

Melalui pendekatan ini, model Virtual Twin sungai tidak hanya menyajikan gambaran akurat kondisi perairan, tetapi juga mendukung simulasi prediktif dan perencanaan mitigasi banjir yang lebih efektif. Dengan demikian, EcoDroneVerse diharapkan mampu meningkatkan akurasi deteksi sampah, memperkuat pengelolaan risiko lingkungan, serta memberikan kontribusi nyata terhadap terwujudnya tata kelola lingkungan perkotaan yang berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah pendekatan konseptual, karena penelitian disusun sebagai artikel gagasan dan tidak melalui uji coba lapangan secara langsung. Pendekatan konseptual dipilih untuk merumuskan kerangka ide mengenai penerapan teknologi AI-Drone dan virtual twin dalam pemantauan sampah sungai. Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur, yaitu suatu proses yang dilakukan peneliti untuk menelusuri dan mengumpulkan informasi dari berbagai sumber kepustakaan, seperti buku, jurnal, majalah, dan ensiklopedia, baik dalam bentuk cetak maupun digital, yang selanjutnya dianalisis dan disusun menjadi satu kesatuan referensi baru [14]. Dengan demikian, metode ini

sesuai untuk merancang gagasan EcoDroneVerse, karena fokus utamanya adalah menyajikan solusi inovatif melalui integrasi teknologi, bukan melakukan eksperimen empiris secara langsung.



Gambar 1. Alur Penelitian

2.1 Identifikasi Masalah

Tahap pertama dimulai dengan mengamati permasalahan umum di sungai, yaitu penumpukan sampah yang menghambat aliran air dan berpotensi menimbulkan banjir saat musim hujan. Sampah yang ditemukan beragam, mulai dari plastik dan material anorganik hingga limbah elektronik yang mencemari sungai serta merusak ekosistem perairan. Sistem penanganan yang ada masih terbatas karena mengandalkan cara manual dan kamera yang dipasang di beberapa titik, yang hanya mampu memantau sampah di permukaan. Kondisi ini diperparah oleh kedalaman sungai yang bervariasi, air yang keruh, serta faktor geografis seperti permukiman padat dan pepohonan besar di sekitar bantaran sungai yang menghalangi jarak

pandang dan akses pemantauan. Akibatnya, sampah yang berada di bawah permukaan sulit terdeteksi, sehingga pemantauan dan penanganan menjadi kurang efektif dan tidak berkelanjutan.

2.2 Kajian Pustaka

Tahapan selanjutnya adalah melakukan kajian pustaka untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi. Kajian ini tidak hanya bersumber dari artikel ilmiah dan laporan penelitian, tetapi juga mencakup publikasi dari lembaga lingkungan dan berbagai literatur lain yang relevan dengan isu pengelolaan sampah dan pencegahan banjir di kawasan perkotaan. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem pemantauan sungai yang masih digunakan saat ini sebagian besar bersifat konvensional, membutuhkan banyak tenaga manusia, serta tidak dapat dilakukan secara kontinu. Keterbatasan tersebut menimbulkan celah besar yang bisa diisi dengan inovasi berbasis teknologi modern. Pada titik ini, terlihat bahwa penggunaan teknologi seperti drone, kecerdasan buatan (AI), Internet of Things (IoT), dan konsep virtual twin memiliki potensi besar untuk memberikan solusi baru yang lebih efektif. Kehadiran teknologi tersebut memungkinkan pemantauan sungai dilakukan secara real-time, sehingga bukan hanya mendeteksi permasalahan yang ada tetapi juga berfungsi dalam memprediksi potensi banjir di masa depan.

2.3 Perumusan Gagasan

Berdasarkan hasil identifikasi masalah dan kajian pustaka, disusunlah gagasan inovatif bernama EcoDroneVerse, yaitu sistem pemantauan sungai cerdas yang memadukan drone berbasis kecerdasan buatan dan konsep virtual twin. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi sampah dengan cepat dan akurat, baik yang berada di permukaan maupun di bawah permukaan air, sekaligus menghasilkan visualisasi digital tiga dimensi yang dapat dimanfaatkan untuk perumusan kebijakan, edukasi masyarakat, dan kolaborasi lintas sektor. UAV yang digunakan dilengkapi payload modular berupa kamera RGB resolusi tinggi untuk pemetaan visual dan kamera multispektral untuk membedakan jenis material seperti plastik dan vegetasi, dengan opsi penambahan sensor seperti thermal camera atau LiDAR. Untuk sampah di bawah permukaan, digunakan ROV/AUV dengan sonar atau kamera bawah air. Data citra kemudian dianotasi menggunakan bounding box dan mask sebagai dasar pelatihan model AI. Model deteksi menggunakan YOLO untuk pemantauan waktu nyata dan segmentasi berbasis CNN seperti U-Net untuk analisis detail, dengan evaluasi kinerja melalui metrik mAP dan IoU. Pendekatan ini memastikan EcoDroneVerse mampu memberikan pemantauan yang akurat dan berkelanjutan dalam menjaga kebersihan sungai.

2.4 Analisis Gagasan

Tahap terakhir adalah analisis terhadap potensi penerapan gagasan EcoDroneVerse, yang menitikberatkan pada tiga aspek utama: kelebihan, tantangan, dan peluang pengembangan. Dari sisi kelebihan, EcoDroneVerse mampu mempercepat proses deteksi sampah dengan memanfaatkan UAV yang dilengkapi kamera RGB dan multispektral, serta ROV/AUV untuk pemantauan bawah air, sehingga data yang dihasilkan lebih akurat dan dapat diakses secara real-time. Visualisasi digital 3D berbasis virtual twin juga memberikan gambaran menyeluruh yang dapat dijadikan dasar perumusan kebijakan dan strategi pengelolaan lingkungan yang tepat sasaran. Dari sisi tantangan, beberapa kendala yang perlu diantisipasi antara lain biaya operasional yang relatif tinggi, keterbatasan infrastruktur teknologi, kebutuhan SDM yang terlatih dalam pengoperasian UAV dan analisis data AI, serta regulasi yang belum sepenuhnya mendukung penerapan teknologi ini. Sementara itu, dari sisi peluang, sistem ini dapat membuka kerja sama lintas sektor, mulai dari pemerintah daerah, lembaga lingkungan, akademisi, hingga masyarakat, dalam menjaga kebersihan sungai dan mitigasi banjir. Jika dikembangkan secara konsisten dan terarah, EcoDroneVerse tidak hanya berfungsi sebagai solusi teknis, tetapi juga

sebagai instrumen strategis untuk mendukung agenda pembangunan berkelanjutan yang menggabungkan teknologi cerdas dan kelestarian lingkungan.

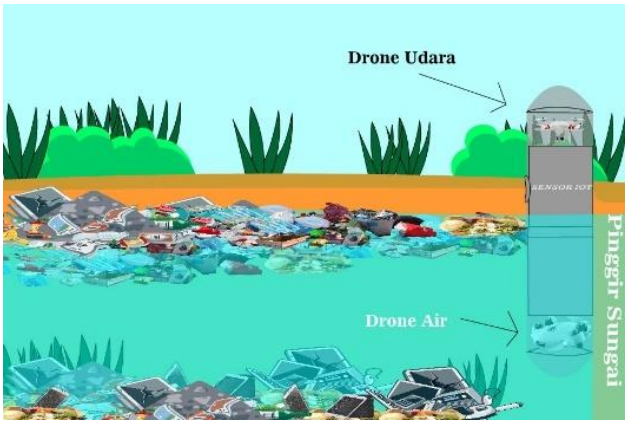
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep *EcoDroneVerse* dirancang untuk mengintegrasikan teknologi drone, kecerdasan buatan (AI), dan *virtual twin* sungai sebagai solusi dalam pemantauan sampah dan mitigasi banjir. Tujuan utama sistem ini adalah menyediakan data spasial *real-time* yang dapat digunakan untuk mendeteksi, memetakan, dan memprediksi akumulasi sampah di sungai. Penulis akan menjelaskan secara sistematis mengenai proses kerja sistem, mekanisme *virtual twin*, visualisasi konseptual, kelayakan implementasi di Indonesia, serta implikasi penerapannya.

3.1 Proses Kerja Sistem

Pengumpulan data dilakukan menggunakan dua jenis drone, yaitu drone udara dan drone air. Drone udara dilengkapi kamera resolusi tinggi serta sistem navigasi GPS untuk memperoleh citra spasial sungai secara detail. Teknologi ini digunakan untuk memantau kondisi permukaan sungai, terutama dalam mendeteksi sampah plastik dan anorganik yang mengapung. Drone air (*remotely operated vehicle* / ROV) dilengkapi sensor sonar untuk mendeteksi objek tenggelam di dasar sungai, termasuk sampah organik berat dan limbah elektronik.

Data citra dan sensor yang dikumpulkan akan diproses menggunakan algoritma deteksi berbasis AI. Disini model YOLOv8 dipilih karena memiliki kecepatan inferensi tinggi serta akurasi deteksi yang andal pada kondisi lingkungan alami. Hasil deteksi mencakup identifikasi jenis sampah, tingkat kepercayaan (*confidence level*), serta koordinat spasial. Pendekatan ini terbukti efektif pada studi UAV berbasis *deep learning* untuk deteksi sampah di perairan [15].



Gambar 1. EcoDroneVerse

3.2 Mekanisme Virtual Twin Sungai

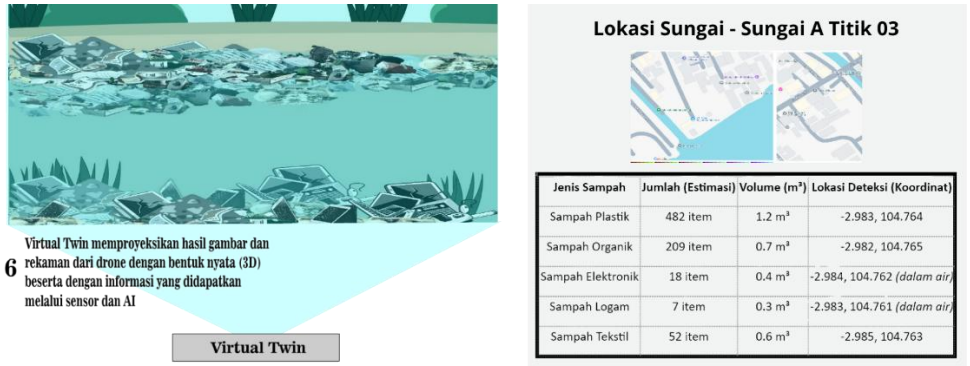


Gambar 2. Fungsi Sensor IoT

Data hasil deteksi ini akan diproyeksikan ke dalam *virtual twin* sungai. Tahap pertama adalah rekonstruksi tiga dimensi menggunakan metode *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi-View Stereo* (MVS) untuk menghasilkan *point cloud* georeferensi dari citra udara. Teknik ini memungkinkan pembentukan model spasial dengan detail tinggi pada area permukaan sungai.

Untuk objek bawah air, integrasi data sonar digunakan untuk mengatasi keterbatasan fotogrametri yang terpengaruh bias cahaya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa SfM dapat diaplikasikan pada objek terendam dengan tingkat akurasi tertentu, terutama jika dipadukan dengan sensor tambahan [16]. Selanjutnya, hasil deteksi AI seperti jenis sampah, lokasi, volume estimasi akan diproyeksikan pada model 3D sehingga menghasilkan representasi digital sungai yang menyajikan kondisi aktual baik di permukaan maupun di bawah air.

Hasil akhir berupa *virtual twin* sungai yang menggabungkan *point cloud*, *mesh 3D*, serta atribut spasial. Pendekatan integratif semacam ini sejalan dengan penelitian mengenai platform *digital twin* sungai yang menggabungkan IoT, GIS, dan visualisasi 3D untuk mendukung manajemen lingkungan berbasis data [17].



Gambar 3. Tampilan Simulasi Virtual Twin

3.3 Visualisasi Konseptual

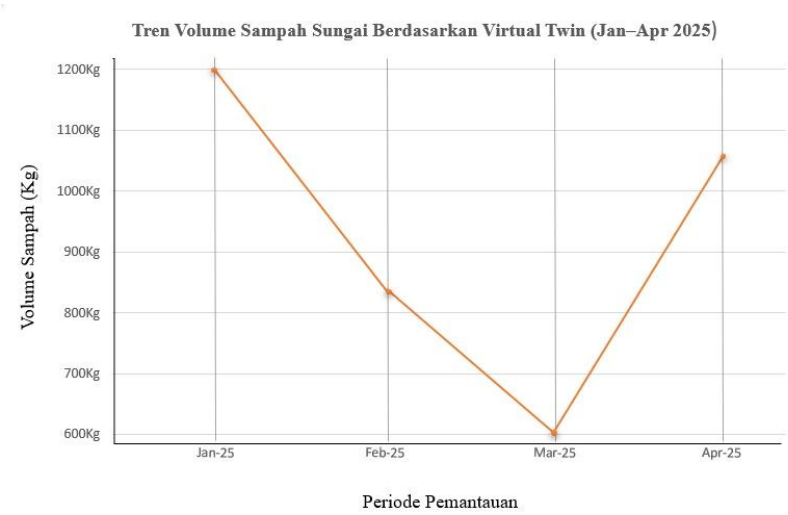
Penelitian ini masih bersifat konseptual, sehingga data yang ditampilkan berupa simulasi. Tabel 1 memberikan contoh riwayat pemantauan bulanan, termasuk volume sampah, status kondisi sungai, dan jenis dominan. Data simulasi ini digunakan untuk menggambarkan bagaimana sistem akan bekerja setelah prototipe dikembangkan.

Tabel 1 Riwayat Pemantauan Virtual Twin Sungai

Periode Pemantauan	Lokasi Sungai	Volume Sampah (Kg)	Status Sungai	Jenis Sampah Dominan

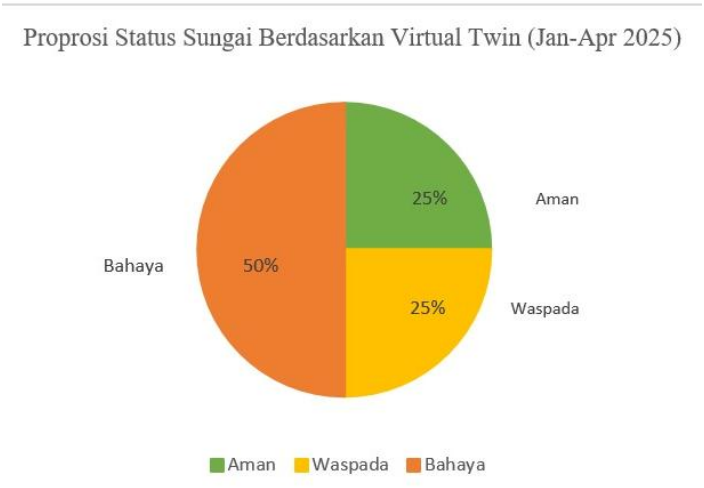
Januari 2025	Sungai A	1.200	Bahaya	Plastik & Elektronik
Februari 2025	Sungai A	850	Waspada	Organik
Maret 2025	Sungai A	600	Aman	Organik & Plastik
April 2025	Sungai A	1.050	Bahaya	Plastik

Visualisasi lanjutan ditampilkan melalui grafik tren pada gambar 4 yang menunjukkan variasi volume sampah antar periode. Terlihat peningkatan signifikan pada musim hujan ini memperlihatkan bahwa faktor cuaca memiliki pengaruh besar terhadap distribusi sampah sungai.



Gambar 4. Grafik Tren Jumlah Sampah

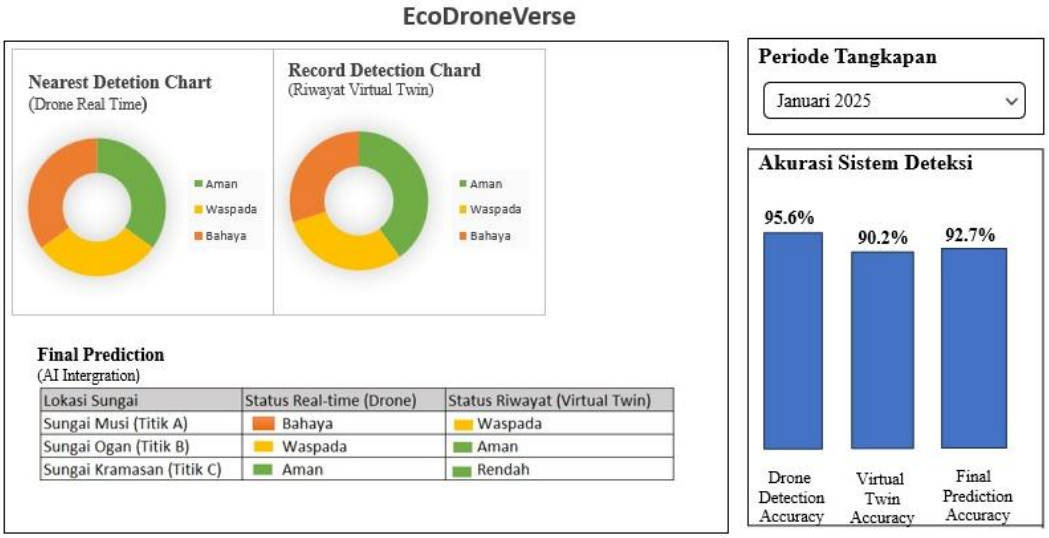
Distribusi status kondisi sungai divisualisasikan melalui diagram pie pada gambar 5. Proporsi kategori Aman, Waspada, dan Bahaya memberikan informasi mengenai prioritas intervensi. Kondisi dengan status Bahaya perlu ditangani terlebih dahulu untuk mencegah dampak lebih serius terhadap aliran sungai.



Gambar 5. Diagram Status Sungai

Keseluruhan informasi digabungkan dalam dashboard *EcoDroneVerse* pada gambar 6 yang menyajikan tabel, grafik tren, dan distribusi kondisi sungai secara *real-time*. Pendekatan visualisasi interaktif ini konsisten dengan konsep *digital twin smart water conservancy*, yang

menekankan pentingnya integrasi visualisasi dengan data spasial untuk mendukung pengambilan keputusan [18]. Konsep ini sejalan dengan penelitian mengani sistem prediksi banjir berbasis visualisasi interaktif di Manila, Filipina, yang menunjukkan bahwa penyajian data dalam bentuk dashboard, grafik, dan peta interaktif mampu meningkatkan pemahaman pemangku kepentingan dalam mitigasi risiko [19].



Gambar 6. Dashboard Virtual Twin Sungai

3.4 Kelayakan Implementasi di Sungai Indonesia

Implementasi *EcoDroneVerse* di Indonesia memerlukan analisis terhadap kondisi lokal. Sungai di kawasan perkotaan sering dikelilingi oleh pemukiman padat, vegetasi rapat, serta memiliki tingkat kekeruhan air tinggi. Faktor keamanan perangkat juga menjadi kendala yang harus dipertimbangkan.

Untuk mengatasi hal ini, sejumlah strategi dapat diterapkan. Pertama, kombinasi sensor optik, sonar, dan LiDAR digunakan untuk meningkatkan akurasi pemantauan pada kondisi beragam. Kedua, pembangunan *docking station* memungkinkan pengoperasian drone secara otomatis dan terjadwal. Ketiga, partisipasi masyarakat lokal diperlukan guna menjaga keamanan perangkat dan mendukung keberlanjutan sistem. Keempat, penerapan sistem dilakukan secara bertahap, dimulai dari segmen sungai prioritas yang memiliki tingkat risiko banjir tinggi.

Pengalaman implementasi sistem serupa di negara lain menunjukkan bahwa konsep *virtual twin* sungai dapat diadaptasi pada berbagai kondisi lingkungan, sehingga penerapannya di Indonesia memiliki kelayakan teknis dan operasional.

3.5 Implikasi

Penerapan *EcoDroneVerse* memiliki sejumlah implikasi strategis. Dari aspek teknis, sistem ini memungkinkan deteksi *real-time*, pemetaan spasial tiga dimensi, dan simulasi prediktif terhadap risiko banjir. Dari aspek kebijakan, data yang diperoleh dapat dijadikan dasar perumusan strategi pembersihan sungai serta mitigasi bencana. Dari aspek sosial, visualisasi interaktif melalui dashboard dapat digunakan sebagai sarana edukasi untuk meningkatkan kesadaran publik mengenai kebersihan sungai.

Meskipun penelitian ini masih dalam tahap konseptual, penyajian data simulasi memberikan gambaran awal mengenai potensi implementasi. Dengan pengembangan prototipe dan uji lapangan, EcoDroneVerse dapat berfungsi sebagai sistem strategis untuk mendukung pengelolaan sungai berkelanjutan di Indonesia.

Dengan demikian menunjukkan bahwa konsep *EcoDroneVerse* memiliki potensi besar dalam menghadirkan solusi berbasis teknologi untuk pemantauan sampah sungai dan mitigasi

banjir. Integrasi drone, AI, dan *virtual twin* memungkinkan deteksi yang lebih akurat, pemetaan spasial yang detail, serta visualisasi interaktif yang mendukung pengambilan keputusan. Meskipun masih bersifat konseptual, penyajian data simulasi memberikan gambaran realistis mengenai implementasi sistem di masa depan. Hal ini menjadi landasan penting bagi pengembangan prototipe dan uji lapangan pada penelitian selanjutnya, sehingga konsep yang ditawarkan dapat teruji secara empiris dan memberikan kontribusi nyata dalam pengelolaan sungai berkelanjutan di Indonesia.

4. KESIMPULAN

EcoDroneVerse dirancang sebagai gagasan integrasi teknologi drone, kecerdasan buatan, dan virtual twin untuk pemantauan sampah sungai. Sistem ini memanfaatkan data spasial dari drone udara maupun bawah air yang diproyeksikan ke dalam representasi digital tiga dimensi, sehingga mampu menyajikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi sungai. Visualisasi interaktif yang dihasilkan membantu pemangku kepentingan dalam mengenali titik kritis penumpukan sampah serta memprediksi risiko banjir. Walaupun masih bersifat konseptual dan divisualisasikan dengan data simulasi, gagasan ini menunjukkan arah baru pengelolaan sungai di Indonesia, khususnya dalam menghadapi tantangan kompleksitas lingkungan perkotaan.

Secara keseluruhan, kajian ini menegaskan bahwa integrasi UAV, kecerdasan buatan, dan virtual twin dapat membentuk kerangka pemantauan sungai yang detail serta berbasis data. Keberadaan rencana evaluasi dengan metrik akurasi deteksi dan reliabilitas visualisasi menjadi landasan penting untuk memastikan sistem dapat diuji secara terukur pada tahap prototipe. Selain itu, pembahasan mengenai skenario operasi pada musim hujan dan kemarau menunjukkan bahwa rancangan ini adaptif terhadap dinamika hidrologis Indonesia. Dengan demikian, EcoDroneVerse memiliki potensi nyata untuk dikembangkan lebih lanjut melalui prototipe dan uji lapangan, sehingga dapat menjadi instrumen strategis dalam mewujudkan tata kelola sungai yang cerdas dan berkelanjutan.

5. SARAN

Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada rencana kerja yang lebih terstruktur agar konsep EcoDroneVerse dapat diimplementasikan secara nyata. Tahap pertama adalah pengembangan prototipe UAV dan ROV yang terintegrasi dengan algoritma deteksi berbasis AI. Selanjutnya, dilakukan uji coba terbatas pada segmen sungai perkotaan untuk menilai akurasi identifikasi sampah dan ketahanan perangkat. Tahap berikutnya mencakup pembangunan virtual twin sungai beserta dashboard interaktif untuk mendukung analisis spasial dan prediksi banjir. Pada tahap akhir, sistem diuji secara lebih luas dengan melibatkan pemerintah daerah dan masyarakat, serta dievaluasi menggunakan metrik akurasi deteksi, reliabilitas visualisasi, dan efektivitas operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pembelajaran dan Kemahasiswaan (Belmawa) Kementrian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemdikbudristek) melalui Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) tahun 2025 bersama Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah memberikan dukungan finansial terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] SIPSN, "Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN)." Accessed: Sep. 20, 2025. [Online]. Available: https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/

[2] Ripi and Y. S. Pambudi, "Pengelolaan Sampah Untuk Mitigasi Dampak Banjir Di Kawasan Kali Pepe, Surakarta: Studi Kasus Di Rw 21, Kelurahan Gilingan, Kecamatan Banjarsari.," vol. 1, no. 2, pp. 58–64, 2025.

[3] S. Adyatma and M. Muhaimin, "Domestic Waste Pollution of River Settlements, Banjarmasin City, Indonesia," *Ecol. Environ. Conserv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1130–1134, 2022, doi: 10.53550/eec.2022.v28i03.008.

[4] N. Wibowo, J. K. Piton, R. Nurcahyo, D. S. Gabriel, F. Farizal, and A. F. Madsuha, "Strategies for improving the e-waste management supply chain sustainability in Indonesia (Jakarta)," *Sustain.*, vol. 13, no. 24, pp. 1–15, 2021, doi: 10.3390/su132413955.

[5] L. Andeobu, S. Wibowo, and S. Grandhi, "A systematic review of E-waste generation and environmental management of Asia Pacific countries," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 17, 2021, doi: 10.3390/ijerph18179051.

[6] PT Tricruise Marketing Indonesia, "Natural Disasters in Indonesia 2023," Tricruise.id. [Online]. Available: https://tricruise.id/member/natural-disasters-in-indonesia-2023/

[7] A. Primanto and L. Puspitasari, "Evaluasi Kebijakan Pengelolaan Sampah Di Kota Semarang," *J. Pembelajaran dan Pengemb. Diri*, pp. 157–174, 2025, [Online]. Available: https://ojs.berajah.com/index.php/go/article/view/594/429

[8] L. Morandini, A. Buda, and P. Fraternali, "Geospatial Artificial Intelligence for Solid Waste Recognition from UAV Imagery," vol. 01004, 2025, doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202564301004.

[9] B. Tjandra, M. S. N. Swastika, and N. S. C. H, "DETEKSI SAMPAH DI PERMUKAAN DAN DALAM PERAIRAN PADA OBJEK VIDEO DENGAN METODE ROBUSTAND EFFICIENTPOST-PROCESSING DAN TUBELET-LEVEL BOUNDING BOXLINKING," 2023, doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.10039.

[10] T. T. Baladraf, "Potensi Penerapan Teknologi Digital Twin pada Industri Pertanian dan Pangan di Indonesia: Sebuah Tinjauan Literatur," *J. Teknotan*, vol. 18, no. 1, p. 21, 2024, doi: 10.24198/jt.vol18n1.4.

[11] X. Wang *et al.*, "How a vast digital twin of the Yangtze River could prevent flooding in China."

[12] I. Adamska, "Virtual Twin vs Digital Twin: What Is the Difference? Nsflow." Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: https://nsflow.com/blog/virtual-twin-vs-digital-twin?_x_tr_hist=true

[13] C. Nugroho, H. Manik, D. Gultom, and M. Firdaus, "DOI: 10.26418/positron.v12i1.51833 Implementasi Multibeam Echosounder untuk Pengukuran dan Analisis Data Kedalaman Perairan Teluk Jakarta Berdasarkan International Hydrographic Organization Standards," *Positron*, vol. 12, no. 1, p. 60, 2022, doi: 10.26418/positron.v12i1.51833.

[14] M. R. Akbar, M. Mulyadi, and S. A. Shandi, "Kajian Literatur Media Pembelajaran Grafis dalam Pembelajaran Bahasa," *J. Pendidik. Bhs.*, vol. 11, no. 2, pp. 46–56, 2021, [Online]. Available: https://ejournal.tsb.ac.id/index.php/jpb/article/view/527

[15] N. Maharjan, H. Miyazaki, B. M. Pati, M. N. Dailey, S. Shrestha, and T. Nakamura,

"Detection of River Plastic Using UAV Sensor Data and Deep Learning," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 13, 2022, doi: 10.3390/rs14133049.

[16] C. Zhang, A. Sun, M. A. Hassan, and C. Qin, "Assessing Through-Water Structure-from-Motion Photogrammetry in Gravel-Bed Rivers under Controlled Conditions," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 21, pp. 1–27, 2022, doi: 10.3390/rs14215351.

[17] X. Rao, R. Ma, L. Zhang, and J. Liu, "Research and design of a digital twin-driven smart river basin platform," *Metaverse*, vol. 3, no. 2, p. 11, 2022, doi: 10.54517/met.v3i2.1815.

[18] W. Li, Z. Ma, J. Li, Q. Li, Y. Li, and J. Yang, "Digital Twin Smart Water Conservancy: Status, Challenges, and Prospects," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 14, pp. 1–26, 2024, doi: 10.3390/w16142038.

[19] L. J. L. Canillo and A. A. Hernandez, "Flood Risk Visualization and Prediction Information System: Case of City Manila, Philippines," *Proceeding - 2021 IEEE 17th Int. Colloq. Signal Process. Its Appl. CSPA 2021*, no. March, pp. 59–63, 2021, doi: 10.1109/CSPA52141.2021.9377276.