

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelolaan Sampah Perkotaan dan Kerangka ISWM

Pengelolaan lingkungan berkelanjutan di kawasan perkotaan, termasuk pengelolaan sampah, merupakan pendekatan integratif untuk menjaga kualitas ekosistem dan kesejahteraan masyarakat tanpa mengorbankan generasi mendatang. Dalam literatur ilmu lingkungan, pendekatan ini sering dikaitkan dengan konsep *triple bottom line* yang menekankan keseimbangan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan (Elkington, 1998; Lin et al., 2025). Penerapan prinsip keberlanjutan dalam pengelolaan sampah kota tidak hanya menasar efisiensi teknis, tetapi juga keadilan akses layanan, partisipasi publik, serta pengurangan dampak lingkungan jangka panjang.

Pada konteks Situs Kota Lama Semarang, pengelolaan sampah menjadi lebih kompleks karena harus mengakomodasi karakter *heritage*, keterbatasan ruang, intensitas aktivitas wisata, dan regulasi konservasi bangunan bersejarah. Oleh sebab itu, kerangka pengelolaan tidak cukup hanya mengandalkan pendekatan teknis, tetapi perlu mengintegrasikan *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM) dengan prinsip *Abiotic–Biotic–Cultural* (ABC) dalam Ilmu Lingkungan, sehingga aspek teknis, sosial, ekonomi, dan budaya dapat dikelola dalam satu sistem yang utuh (Zurbrugg et al., 2012; Beck & Ferasso, 2023; Wilson et al., 2013). Tabel 1 memberikan ringkasan beberapa model pengelolaan lingkungan

berkelanjutan yang telah diterapkan di kawasan perkotaan dan berpotensi diadaptasi pada Situs Kota Lama Semarang.

Tabel 1. Ringkasan Model Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan

No	Model Pengelolaan	Fokus Utama	Kelebihan	Kelemahan	Relevansi bagi Situs Kota Lama Semarang	Referensi
1	Berbasis Komunitas (CBWM)	Pelibatan masyarakat lokal	Kesadaran warga meningkat, memperkuat kohesi sosial	Bergantung pada partisipasi aktif, kadang tidak berkelanjutan	Penting untuk melibatkan komunitas pelestari dan pelaku usaha	Kubota et al. (2020); Ulum et al. (2024)
2	Teknologi Digital (IoT, GIS, AI)	Pemantauan & prediksi <i>real-time</i>	Efisien, adaptif, berbasis data	Biaya tinggi, kesenjangan digital	CNN, RF, VRP relevan untuk prediksi timbulan & rute	Kurniawan et al. (2023); Zheng et al. (2024)
3	<i>Zero-Waste</i>	Minimasi sampah sejak sumber	Mendukung ekonomi sirkular, berorientasi jangka panjang	Perubahan perilaku sulit, butuh regulasi kuat	Relevan untuk bank sampah & pemilahan sumber	T.A. Kurniawan et al. (2021); Canet-Martí et al. (2021)
4	Kolaboratif (Pemerintah –Publik– Swasta)	<i>Multi-stakeholder governance</i>	Holistik, inklusif, memadukan peran aktor	Koordinasi kompleks, potensi konflik antar lembaga	Cocok untuk sinergi DLH– BPSKL– Dinas Kebudayaan	Beck & Ferasso (2023); Hu et al. (2019)

					dan Pariwisata	
5	Berbasis <i>Big data</i>	Analisis prediktif pola timbunan & rute	Efisiensi logistik, mendukung <i>smart city</i>	Butuh data akurat & infrastruktur TI	Bisa dipadukan dengan <i>civic-tech</i> untuk partisipasi digital	Wu et al. (2022); Nesmachno w et al. (2020)

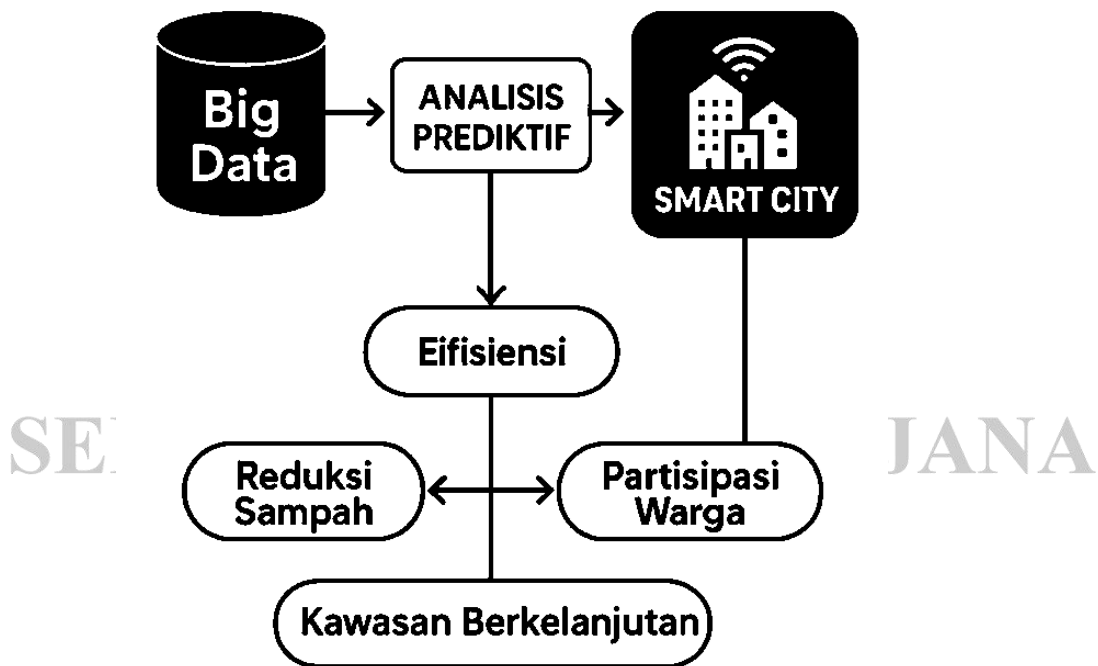
Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

2.1.1 Lingkungan Perkotaan sebagai Sistem Terbuka

Lingkungan perkotaan beroperasi sebagai sistem terbuka yang ditandai dengan arus energi, material, manusia, dan informasi yang terus masuk dan keluar (*urban metabolism*). Sistem ini rentan terhadap ketidakpastian eksternal seperti perubahan iklim, bencana alam, maupun lonjakan aktivitas wisata. Kompleksitas bertambah ketika menyangkut Situs Kota Lama Semarang yang memiliki keterbatasan ruang, regulasi konservasi, dan fungsi ganda sebagai pusat wisata, perdagangan, dan ruang publik (Ganesh et al., 2024; Meirelles et al., 2020). Pendekatan *urban metabolism* lalu digunakan untuk memahami alur sumber daya dan limbah dalam kota, sehingga dapat dirancang kebijakan yang lebih efisien dan adaptif. Pendekatan ini melihat kota sebagai sistem sosio-ekologis yang memproses input (air, energi, material, pangan) dan menghasilkan output berupa produk, limbah, dan emisi. Dengan demikian, pengelolaan sampah menjadi salah satu komponen kunci untuk menurunkan “beban metabolik” kota (Meirelles et al., 2020; Papangelou et al., 2023).

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, banjir, rob, kepadatan wisata, aktivitas komersial malam hari, dan minimnya ruang terbuka memperparah beban sistem persampahan. Ketidakteraturan jadwal pengangkutan, kapasitas tempat sampah yang terbatas, serta lokasi TPS yang tidak ideal menyebabkan sampah sering meluber di titik-titik tertentu dan mengganggu nilai visual kawasan *heritage* (Priti & Mandal, 2019). Pendekatan ISWM dan *urban metabolisme* diperlukan untuk menghubungkan persoalan teknis-operasional dengan tata kelola kelembagaan dan perilaku pengguna kawasan.

Gambar 1 menggambarkan diagram pendekatan pengelolaan sampah berbasis teknologi sebagai bagian dari sistem perkotaan terbuka.



Gambar 1. Diagram Pendekatan Pengelolaan Sampah Berbasis Teknologi dalam Sistem Perkotaan *Heritage*

Sumber: diadaptasi dari Hussain et al., 2024

2.1.2 Prinsip-Prinsip Keberlanjutan

Prinsip keberlanjutan perkotaan yang dapat diadaptasi untuk Situs Kota Lama Semarang meliputi efisiensi sumber daya, keadilan sosial, partisipasi publik, pembangunan ekonomi berkelanjutan, dan keseimbangan ekosistem. Prinsip-prinsip ini sejalan dengan kerangka SDGs, khususnya Tujuan 11 (Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan), 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), dan 13 (Penanganan Perubahan Iklim).

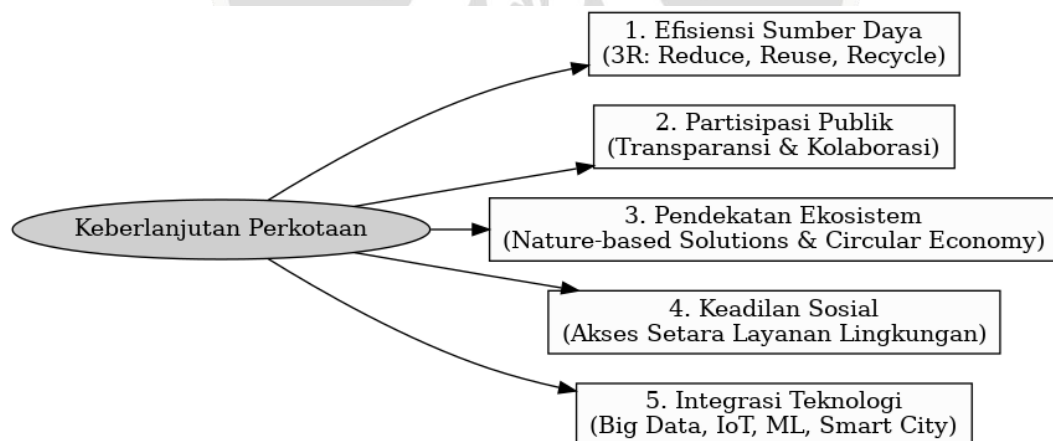
Tabel 2 menjelaskan contoh implementasi spesifik untuk Situs Kota Lama Semarang, sedangkan Gambar 2 memperlihatkan prinsip-prinsip keberlanjutan perkotaan yang relevan bagi kawasan *heritage*.

Tabel 2. Prinsip-Prinsip Keberlanjutan dalam Konteks Perkotaan

No	Prinsip Keberlanjutan	Deskripsi	Implementasi di Situs Kota Lama Semarang	Referensi
1	Efisiensi Sumber Daya	3R (<i>Reduce, Reuse, Recycle</i>), <i>circular economy</i>	Pemilahan sejak sumber, pemanfaatan bank sampah, optimasi rute VRP	Foreman (2024); Aoki-Suzuki et al. (2023)
2	Keadilan Sosial	Akses setara terhadap layanan lingkungan	Penyediaan TPS kolektif yang ramah akses & ramah budaya	de Araújo et al. (2022); Safira et al. (2024)
3	Partisipasi Publik	Keterlibatan warga dalam pengelolaan	Aplikasi pelaporan digital untuk warga,	Arnstein (1969); Dong et al. (2023)

			pelaku usaha, dan wisatawan	
4	Pembangunan Ekonomi	Ekonomi kreatif berbasis lingkungan	Integrasi daur ulang & pariwisata <i>heritage</i> (eco-tourism)	Martins & Cró (2021); Pintossi et al. (2023)
5	Keseimbangan Ekosistem	Menjaga relasi manusia–alam	Penempatan TS tersembunyi agar selaras estetika <i>heritage</i>	Schneider et al. (2022); Chatterjee & Seikh (2024)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)



**Gambar 2. Prinsip-Prinsip Keberlanjutan Perkotaan yang Relevan untuk
Situs *heritage***

Sumber: diadaptasi dari Medina-Medina et al., 2024

Dalam kerangka ISWM, prinsip-prinsip keberlanjutan ini diterjemahkan ke dalam kombinasi antara kinerja fisik (misalnya peningkatan angka pengumpulan sampah, pengurangan timbulan, dan peningkatan daur ulang) dan kinerja tata kelola

(misalnya peningkatan inklusivitas aktor, stabilitas pembiayaan, dan konsistensi regulasi) (van de Klundert & Anschütz, 2001; Wilson et al., 2013).

2.1.3 Arah Implementasi

Arah implementasi pengelolaan sampah berkelanjutan di situs *heritage* perlu menekankan kolaborasi multiaktor, pemanfaatan teknologi digital, regulasi adaptif, dan konservasi visual. Secara garis besar, arah implementasi di Situs Kota Lama Semarang dapat diringkas sebagai berikut:

1. Kolaborasi multipihak. Pemerintah (DLH Kota Semarang, BPK2L/BPSKL, Dinas Kebudayaan dan Pariwisata), sektor swasta, komunitas pelestari, dan akademisi perlu terlibat sejak tahap perencanaan, pengoperasian, hingga evaluasi sistem persampahan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip ISWM yang menekankan keterlibatan semua pemangku kepentingan dalam proses pengambilan keputusan (Scheinberg et al., 2010; Wilson et al., 2012).
2. Pemanfaatan teknologi digital. Integrasi *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk klasifikasi visual kondisi tempat sampah, *Random Forest Regression* (RF) untuk prediksi timbulan, dan *Vehicle Routing Problem* (VRP) untuk optimasi rute pengangkutan memungkinkan perencanaan berbasis data (*data-driven planning*). Teknologi ini mendukung prinsip efisiensi sumber daya, pengurangan emisi, dan peningkatan transparansi layanan kepada publik (Kurniawan et al., 2023; Nesmachnow et al., 2020; Wu et al., 2022).
3. *Smart governance* adaptif. Diperlukan SOP khusus pengelolaan sampah di Situs Kota Lama Semarang yang mengatur penempatan sarana, frekuensi

pengangkutan, integrasi data digital, serta koordinasi antar lembaga. Prinsip ISWM menekankan pentingnya aspek kebijakan dan kelembagaan yang konsisten serta responsif terhadap dinamika lokal (van de Klundert & Anschütz, 2001; Premakumara et al., 2011).

4. Desain infrastruktur ramah budaya. Infrastruktur pengelolaan sampah (TPS, kontainer, smart bin, tempat sampah jalan) harus dirancang menyatu dengan estetika dan nilai-nilai visual bangunan cagar budaya. Penempatan TS yang tidak mengganggu fasad bangunan, penggunaan warna dan bentuk yang selaras, serta pengaturan jalur pengangkutan yang meminimalkan gangguan pada wisatawan menjadi bagian dari strategi pelestarian dan branding *heritage*.

Dengan demikian, arah implementasi pengelolaan berkelanjutan di Situs Kota Lama Semarang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga strategis, sosial, dan kultural, sejalan dengan upaya pelestarian *tangible heritage* dan pencapaian SDGs 11, 12, dan 13. ISWM memberikan kerangka untuk menyusun langkah-langkah operasional yang mempertimbangkan kinerja fisik sistem, tata kelola kelembagaan, dan konteks sosial-budaya kawasan.

2.1.4 Kerangka *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM)

Kerangka *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM) dikembangkan untuk membantu kota-kota, terutama di negara berkembang, merancang sistem persampahan yang lebih berkelanjutan dengan memperhatikan dua kelompok besar dimensi:

1. Komponen fisik (*physical components*)

- Pengurangan sampah (*waste prevention/minimisation*)
 - Pengumpulan dan pengangkutan (*collection & transfer*)
 - Pengolahan dan pembuangan akhir (*treatment & disposal*)
 - Pemulihan sumber daya (*re-use, recycling, recovery*)
2. Aspek tata kelola (*governance aspects/enabling environment*)
- Inklusivitas aktor dan pengguna layanan (pemerintah, swasta, komunitas, sektor informal, dan pengguna kawasan).
 - Keberlanjutan finansial dan ekonomi (skema pembiayaan, retribusi, insentif).
 - Institusi dan kebijakan (regulasi, kelembagaan, perencanaan, penegakan hukum).

Wilson et al. (2013) dan van de Klundert & Anschütz (2001) menegaskan bahwa kinerja sistem persampahan tidak dapat dijelaskan hanya oleh infrastruktur fisik; keberhasilan sangat bergantung pada keterpaduan antara komponen fisik dan aspek tata kelola.

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, kerangka ISWM dapat diturunkan ke dalam enam dimensi utama yang akan dianalisis lebih lanjut dalam disertasi ini:

1. Dimensi teknis-operasional: kondisi dan kapasitas tempat sampah, pola pengumpulan, frekuensi pengangkutan, infrastruktur TPS/TPS 3R, dan integrasi teknologi seperti CNN–RF–VRP.

2. Dimensi kelembagaan: struktur organisasi pengelola (DLH, BPK2L/BPSKL, pengelola kawasan), mekanisme koordinasi, peran sektor informal, dan pembagian tugas antar-aktor.
3. Dimensi regulasi: peraturan daerah, SOP teknis, ketentuan zonasi kawasan cagar budaya, dan kebijakan “*pro-heritage*” yang terkait dengan persampahan.
4. Dimensi finansial: skema pembiayaan, struktur retribusi sampah, alokasi anggaran, dan peluang pembiayaan inovatif (*public-private partnership*, dana CSR, dll.).
5. Dimensi sosial/partisipasi publik: tingkat kesadaran, praktik pemilahan, partisipasi warga, pelaku usaha, dan wisatawan, serta penerimaan terhadap aplikasi pelaporan digital.
6. Dimensi lingkungan/*heritage*: dampak persampahan terhadap kualitas lingkungan, visual *heritage*, kenyamanan wisata, dan kontribusi terhadap penurunan emisi CO₂e.

Keenam dimensi ini selanjutnya dipetakan ke dalam rumusan masalah, tujuan penelitian, dan analisis hasil sehingga membentuk benang merah antara kerangka ISWM, konsep *urban metabolisme*, dan model pengelolaan sampah berkelanjutan di lingkungan Situs Kota Lama Semarang.

2.1.5 Implikasi Kerangka ISWM bagi Situs Kota Lama Semarang

Penggunaan kerangka ISWM memberikan beberapa implikasi strategis bagi perancangan model dalam disertasi ini:

1. Pendekatan sistemik–integratif. Seluruh komponen sistem persampahan di Situs Kota Lama Semarang (sumber timbulan, jaringan TS, rute angkut, aktor pengelola, dan pengguna kawasan) dipandang sebagai satu sistem perkotaan–*heritage* yang saling terkait. Hal ini menjadi dasar integrasi analisis spasial (GIS), prediksi timbulan (CNN/RF), optimasi rute (VRP), dan partisipasi publik.
2. Fokus pada “*enabling environment*”. Evaluasi tidak berhenti pada indikator teknis (misalnya peningkatan cakupan layanan atau penurunan timbulan), tetapi juga menilai kelayakan kelembagaan dan finansial, serta konsistensi regulasi yang mendukung pelestarian kawasan. Hal ini penting terkait “kebijakan sampah yang *pro-heritage*” dan kontrol keberhasilan program dengan anggaran tertentu.
3. Keterhubungan dengan *urban metabolisme* dan SDGs. Dengan memadukan ISWM dan *urban metabolisme*, model pengelolaan sampah yang dirancang diharapkan mampu menurunkan “beban metabolik” kota melalui efisiensi aliran material, pengurangan emisi, dan peningkatan kualitas lingkungan visual kawasan *heritage*, sekaligus berkontribusi pada capaian SDGs 11, 12, dan 13.

Bagian berikutnya (2.2 hingga 2.6) akan mengelaborasi lebih rinci pengelolaan sampah di kawasan cagar budaya, partisipasi publik, teknologi digital, emisi lingkungan, serta *state of the art* penelitian, yang seluruhnya diposisikan dalam kerangka ISWM untuk Situs Kota Lama Semarang.

2.2 Pengelolaan Sampah di Situs *Heritage*

Pengelolaan sampah di situs *heritage* memiliki kompleksitas yang berbeda dibandingkan dengan kawasan perkotaan biasa. Kompleksitas ini muncul karena adanya keterbatasan ruang, kepadatan aktivitas wisata, regulasi pelestarian, serta tuntutan menjaga estetika kawasan (Ganesh et al., 2024; Martins & Cró, 2021). Oleh sebab itu, pengelolaan sampah di situs *heritage* harus memadukan pendekatan teknis, sosial, dan kelembagaan, dengan tetap memperhatikan aspek budaya dan arsitektural. Berbagai pendekatan pengelolaan sampah yang pernah diterapkan maupun dikembangkan dapat dibandingkan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Perbandingan Pendekatan Pengelolaan Sampah

No	Pendekatan Pengelolaan	Deskripsi	Keunggulan	Kelemahan	Relevansi	Referensi
1	Konvensional	Sistem kumpul–angkut–buang manual	Sederhana, biaya awal rendah	Tidak efisien, rentan penumpukan sampah, kurang ramah lingkungan	Masih dominan digunakan, namun tidak adaptif untuk <i>heritage</i>	Greco et al. (2018)
2	Berbasis Komunitas (CBWM)	Masyarakat terlibat dalam pemilahan, pengumpulan, dan pengolahan	Meningkatkan kesadaran, memperkuat kohesi sosial	Bergantung pada partisipasi aktif; kapasitas teknis terbatas	Dapat diterapkan melalui RW/komunitas pelestari budaya	Kubota et al. (2020); Ulum et al. (2024)

No	Pendekatan Pengelolaan	Deskripsi	Keunggulan	Kelemahan	Relevansi	Referensi
3	Berbasis Teknologi	IoT, AI, dan sistem data <i>real-time</i>	Efisiensi tinggi, prediktif, transparan	Biaya tinggi, kesenjangan literasi digital	Relevan untuk CNN, RF, VRP dalam optimasi rute dan prediksi	Malik et al. (2023); Kurniawan et al. (2023)
4	<i>Zero-Waste</i>	Minimasi sampah sejak sumber, <i>circular economy</i>	Berkelanjutan, minim limbah	Sulit diimplementasikan tanpa regulasi & edukasi kuat	Bisa diterapkan melalui program bank sampah & daur ulang	T.A. Kurniawan et al. (2021); Canet-Martí et al. (2021)
5	Integratif (Digital + Komunitas)	Menggabungkan teknologi digital dan partisipasi publik	Efisien, inklusif, berbasis data & warga	Butuh SOP, pelatihan, dan infrastruktur stabil	Sesuai konteks <i>heritage</i> : partisipasi warga, pelaku usaha, wisatawan via aplikasi	Siwawa (2025); Ahmed et al. (2023)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Secara global, isu pengelolaan sampah di kawasan cagar budaya semakin dipandang sebagai bagian dari *waste heritage nexus*, yaitu keterkaitan antara kualitas pengelolaan sampah dengan kelestarian nilai sejarah, identitas kota, dan daya tarik wisata jangka panjang. Studi-studi di kota warisan dunia seperti Hoi An, George Town, dan Dubrovnik menunjukkan bahwa kegagalan mengelola sampah akan menurunkan kualitas pengalaman wisata, mengganggu integritas visual bangunan bersejarah, dan pada akhirnya menurunkan daya saing destinasi (Martins & Cró, 2021; Ngoc et al., 2024).

Dalam kerangka Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), pengelolaan sampah di kawasan cagar budaya tidak hanya berkaitan dengan kebersihan fisik, tetapi juga dengan:

- SDG 11 (*Sustainable Cities and Communities*): menjamin kota dan permukiman yang aman, inklusif, berketahanan, dan berkelanjutan, termasuk perlindungan warisan budaya dunia;
- SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*): mendorong pengurangan timbulan, pemilahan, dan daur ulang sampah melalui kebijakan dan perilaku konsumsi yang lebih bertanggung jawab;
- SDG 13 (*Climate Action*): menurunkan emisi gas rumah kaca dari pengumpulan, pengangkutan, dan pengolahan sampah melalui optimasi rute pengangkutan, pengurangan volume, dan pemilihan teknologi yang lebih rendah emisi.

Situs Kota Lama Semarang sebagai kawasan cagar budaya dengan intensitas wisata tinggi memiliki *carrying capacity* yang terbatas, baik dari sisi infrastruktur, ruang terbuka, maupun kemampuan lingkungan menyerap tekanan sampah. Jika kapasitas tampung ini terlampaui, maka tidak hanya terjadi penurunan kualitas lingkungan, tetapi juga degradasi visual, misalnya tumpukan sampah di sudut jalan bersejarah atau di dekat bangunan cagar budaya, yang berpotensi merusak citra kawasan dan mengurangi nilai *heritage* jangka panjang. Oleh karena itu, desain sistem pengelolaan sampah di Situs Kota Lama Semarang harus memperhitungkan batas daya dukung (*carrying capacity*) dan daya tampung (*assimilative capacity*) kawasan, baik secara ekologis maupun visual.

2.2.1 Karakteristik Situs *Heritage* dalam Pengelolaan Sampah

a. Keterbatasan Infrastruktur dan Ruang

Situs *heritage* umumnya tidak dirancang untuk sistem pengelolaan sampah modern. Akses jalan yang sempit, keterbatasan ruang untuk tempat sampah (TS) atau TPS, dan larangan perubahan arsitektur membatasi ketersediaan infrastruktur baru. Akibatnya, sampah sering menumpuk di titik tertentu dan menimbulkan degradasi visual (Ganesh et al., 2024). Solusi yang diusulkan dalam berbagai studi antara lain pemanfaatan GIS untuk perencanaan lokasi TS, penggunaan kontainer tersembunyi, serta integrasi teknologi *waste-to-energy* untuk mengurangi beban TPA (Dudar et al., 2024; Doorga et al., 2022). Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, strategi ini perlu diwujudkan melalui penentuan titik TS yang tidak mengganggu pandangan utama (*view corridor*) bangunan cagar budaya, misalnya dengan penempatan di ruas belakang bangunan atau ruang transisi yang secara visual terlindungi.

b. Kerumitan Regulasi

Pengelolaan sampah di situs *heritage* melibatkan regulasi lintas sektor (lingkungan, pariwisata, budaya, tata ruang). Tumpang tindih kebijakan sering menimbulkan ketidakpastian dalam implementasi (Sari et al., 2019). Solusi yang diusulkan adalah penerapan *multi-level governance* dan regulasi hibrida yang mengintegrasikan konservasi budaya dengan kebersihan kota, misalnya melalui pendekatan *Building Information Modelling–Integrated Project Delivery* (BIM–IPD) untuk restorasi sekaligus pengelolaan infrastruktur lingkungan (Samuels-Jones & Perz, 2024). Bagi Situs Kota Lama Semarang, hal ini berarti bahwa

kebijakan persampahan tidak dapat berdiri sendiri, tetapi harus selaras dengan rencana pelestarian, rencana detail tata ruang, dan rencana pengembangan pariwisata.

c. Tingginya Interaksi Wisata dan Ekonomi Kreatif

Wisatawan menyumbang >40% timbulan sampah harian di beberapa situs *heritage* (Martins & Cró, 2021). Event budaya, festival, dan aktivitas ekonomi kreatif juga meningkatkan sampah musiman secara signifikan. Solusi yang direkomendasikan antara lain penerapan kebijakan *Pay-As-You-Throw*, edukasi pemilahan bagi pelaku usaha, serta integrasi program pengurangan sampah dengan paket pariwisata berkelanjutan (Liyushiana et al., 2024; Pandey et al., 2023). Di Situs Kota Lama Semarang, kebijakan ini dapat diaplikasikan melalui kewajiban pemilahan bagi kafe, restoran, dan pelaku usaha kreatif, disertai sistem insentif dan sanksi yang jelas, sekaligus kampanye publik yang dikaitkan dengan citra kota tua yang bersih dan berbudaya. Dari sudut pandang estetika, sampah yang tidak terkelola di ruang publik *heritage* akan menurunkan kualitas *sense of place* dan mengganggu pengalaman pengunjung. Hal ini menguatkan argumen bahwa pengelolaan sampah merupakan bagian integral dari strategi pelestarian, bukan sekadar isu teknis operasional.

2.2.2 Tantangan dan Pendekatan

Situs *heritage* menghadapi dilema polusi visual vs kebersihan. Penempatan kontainer terbuka dapat merusak estetika kawasan, sementara minim fasilitas menimbulkan penumpukan sampah (Gao et al., 2024).

- Solusi desain: TS tersembunyi, kontainer dengan desain dan ornamen lokal, serta penggunaan material ramah visual yang menyatu dengan fasad bangunan bersejarah (Montacchini et al., 2024).
- Peran komunitas: CBWM terbukti efektif, terutama jika dikombinasikan dengan insentif ekonomi (bank sampah, daur ulang) dan teknologi TS pintar yang memantau volume sampah secara *real time* (Mehta & Rathour, 2024).
- Pengawasan modern: IoT, sensor ultrasonik, dan AI untuk optimasi rute pengangkutan memungkinkan pengurangan frekuensi *overflow* tanpa menambah jumlah kontainer yang mengganggu estetika kawasan (Sridevi et al., 2024; Belhiah et al., 2024).

Dalam perspektif SDGs, pendekatan-pendekatan ini sekaligus mendukung target 11.4 (melindungi warisan budaya dunia), 12.5 (secara substansial mengurangi produksi sampah melalui pencegahan, pengurangan, daur ulang, dan penggunaan kembali), serta 13.2 (integrasi tindakan perubahan iklim dalam kebijakan, strategi, dan perencanaan nasional dan lokal). Artinya, strategi desain dan pengawasan persampahan di situs *heritage* harus dinilai bukan hanya dari sisi kebersihan, tetapi juga dari kemampuan menurunkan jejak karbon dan menjaga kualitas lanskap budaya.

2.2.3 Kolaborasi Kebijakan

a. Kolaborasi Multi-Stakeholder

Keberhasilan pengelolaan sampah *heritage* menuntut sinergi antara pemerintah kota, komunitas pelestari budaya, pelaku usaha, dan organisasi masyarakat sipil. Kasus di Hoi An, Vietnam menunjukkan bahwa kolaborasi ini

mampu menurunkan polusi plastik laut melalui pengaturan sampah wisata, edukasi, dan sistem insentif bagi pelaku usaha pariwisata (Ngoc et al., 2024).

b. Desain Fasilitas Ramah Budaya

Fasilitas persampahan harus selaras dengan lanskap visual. Penempatan TS tertutup, kontainer tersembunyi, dan penggunaan material lokal menjadi strategi efektif untuk menjaga pemandangan jalan dan fasad bangunan cagar budaya (Montacchini et al., 2024; Wiratama & Wijaya, 2024).

c. Penerapan *Smart Solutions*

Digitalisasi pengelolaan sampah melalui aplikasi pelaporan publik, prediksi timbulan dengan *machine learning*, serta sistem insentif berbasis teknologi memperkuat partisipasi publik. Tantangannya adalah kesenjangan literasi digital, resistensi kelembagaan, dan biaya infrastruktur (Sheikameer Batcha et al., 2023).

Di tingkat kebijakan, penguatan kebijakan sampah yang *pro-heritage* berarti:

1. Menempatkan kebersihan dan pengelolaan sampah sebagai bagian eksplisit dari rencana pelestarian dan dokumen tata ruang;
2. Menetapkan indikator kinerja yang mengukur kualitas visual, volume sampah, emisi, dan partisipasi publik sebagai satu paket;
3. Menyelaraskan program persampahan dengan agenda SDGs kota, sehingga intervensi di Situs Kota Lama Semarang berkontribusi pada target global.

2.2.4 Implikasi bagi Situs Kota Lama Semarang

Bagi Situs Kota Lama Semarang, implikasi utama dari kajian literatur adalah perlunya pendekatan hibrida yang menggabungkan dimensi teknis, sosial, kelembagaan, visual, dan iklim:

- Teknis: integrasi optimasi rute (VRP), prediksi timbulan (*Random Forest Regression*), dan klasifikasi visual kondisi TS (CNN) untuk mengurangi *overflow*, mempersingkat jarak tempuh, serta menurunkan konsumsi BBM dan emisi.
- Sosial: pelibatan publik melalui kanal digital (WhatsApp Chatbot, Epicollect5, atau aplikasi pelaporan) yang memungkinkan warga, pelaku usaha, dan wisatawan melaporkan kondisi sampah secara *real-time*.
- Kultural–visual: desain infrastruktur pengelolaan sampah yang ramah budaya, misalnya TS tersembunyi, kontainer bermotif lokal, dan rute pengangkutan yang meminimalkan gangguan pada jam puncak wisata untuk menjaga kualitas lanskap visual.
- Kelembagaan: penguatan koordinasi DLH–BPSKL–Dinas Kebudayaan dan Pariwisata–BPK2L melalui SOP khusus persampahan *heritage*, termasuk pembagian peran, mekanisme monitoring dan evaluasi, serta skema pembiayaan yang berkelanjutan.
- Lingkungan & SDGs: pengelolaan sampah di Situs Kota Lama Semarang perlu secara eksplisit dikaitkan dengan target penurunan emisi (SDG 13), peningkatan kualitas lingkungan permukiman dan kawasan wisata

bersejarah (SDG 11), serta pengurangan timbulan dan peningkatan daur ulang (SDG 12).

Dengan pendekatan tersebut, Situs Kota Lama Semarang berpotensi menjadi contoh praktik baik (*best practice*) nasional untuk pengelolaan sampah di kawasan cagar budaya yang mengintegrasikan partisipasi publik, teknologi digital, pelestarian *heritage*, dan agenda SDGs secara simultan. Integrasi ini akan menjadi landasan konseptual bagi model pengelolaan sampah berkelanjutan yang dikembangkan dalam disertasi ini.

2.3 Pelestarian Situs Cagar Budaya dan Kaitan dengan Pengelolaan Sampah

Pelestarian kawasan cagar budaya merupakan upaya sistematis untuk menjaga nilai sejarah, arsitektur, dan lanskap budaya melalui pendekatan perlindungan, pemanfaatan, dan pengelolaan yang berkelanjutan. UNESCO melalui *Recommendation on the Historic Urban Landscape* menegaskan bahwa pelestarian kawasan bersejarah harus mempertimbangkan integrasi antara bangunan, ruang publik, aktivitas sosial, serta kualitas lingkungan pendukung, termasuk kebersihan dan sanitasi (UNESCO, 2011). Prinsip *authenticity* dan *integrity* yang menjadi dasar konservasi ICOMOS menekankan pentingnya menjaga keaslian material, struktur, dan tampilan visual kawasan, serta menghindari gangguan yang dapat menurunkan kualitas lanskap budaya (ICOMOS, 2008; ICOMOS, 2013).

Dalam konteks Indonesia, pelestarian diatur melalui kerangka hukum yang meliputi perlindungan, pemeliharaan, pemanfaatan, dan pengelolaan kawasan cagar

budaya. Kebijakan ini mengharuskan adanya zonasi, pelestarian fisik, serta penguatan tata kelola kawasan untuk menjaga keberlanjutan sosial dan budaya (Sari et al., 2019; Sunarti et al., 2024). Bagi Situs Kota Lama Semarang, yang memiliki bangunan kolonial, ruang publik historis, dan aktivitas wisata intensif, pengelolaan lingkungan, khususnya persampahan, menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari strategi pelestarian.

Kawasan *heritage* memiliki *carrying capacity* tertentu terhadap arus wisata dan aktivitas ekonomi. Ketika kapasitas tersebut terlampaui, timbunan sampah meningkat dan menyebabkan gangguan visual serta penurunan kualitas pengalaman pengunjung. Fenomena ini ditemukan di berbagai kota *heritage* seperti Hoi An dan George Town (Martins & Cró, 2021; Ngoc et al., 2024). Studi pariwisata berkelanjutan menunjukkan bahwa kebersihan ruang publik merupakan elemen kunci dalam mempertahankan nilai estetika, karakter kawasan, dan citra destinasi (Pintossi et al., 2023).

Literatur konservasi urban menekankan bahwa pelestarian kawasan *heritage* harus mengikuti prinsip-prinsip:

1. Keutuhan bentuk dan struktur, termasuk mempertahankan pandangan koridor visual dan karakter fasad bangunan (Montacchini et al., 2024).
2. Keaslian visual, yang menuntut agar infrastruktur modern seperti tempat sampah, signage, atau utilitas tidak mengurangi nilai estetika kawasan (Wiratama & Wijaya, 2024).
3. Kontinuitas fungsi sosial dan budaya, sehingga kawasan tetap hidup sebagai ruang ekonomi, budaya, dan wisata (Chatterjee & Seikh, 2024).

4. Pelibatan komunitas lokal, yang terbukti meningkatkan keberhasilan program pelestarian melalui rasa memiliki dan partisipasi dalam pemeliharaan kebersihan (Ortiz Palafox, 2022; Strzelecka, 2024).

Jika prinsip konservasi tersebut dikaitkan dengan pengelolaan sampah, maka terdapat sejumlah implikasi penting. Pertama, desain dan penempatan tempat sampah harus mempertimbangkan karakter visual dan koridor pandang, sehingga tidak merusak autentisitas kawasan. Kedua, pengaturan waktu pengangkutan harus disesuaikan dengan pola kunjungan wisata agar tidak menimbulkan gangguan visual maupun operasional. Ketiga, kebijakan persampahan harus menjadi bagian dari *heritage management plan*, sehingga isu kebersihan menjadi indikator keberhasilan pelestarian, bukan sekadar aspek teknis.

Pelestarian kawasan yang terintegrasi dengan pengelolaan sampah juga mendukung pencapaian SDG 11.4 (pelestarian warisan budaya dunia), SDG 12.5 (pengurangan sampah melalui pencegahan dan daur ulang), serta SDG 13 (aksi iklim melalui pengurangan emisi transportasi sampah). Upaya ini sejalan dengan rekomendasi studi urban *heritage* bahwa pengelolaan sampah yang efektif menjadi kunci untuk mempertahankan kualitas ruang publik dan meningkatkan keberlanjutan kawasan bersejarah (Aoki-Suzuki et al., 2023; Foreman, 2024).

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, implikasinya adalah:

- titik tempat sampah harus ditentukan berdasarkan analisis visual kawasan,
- desain kontainer perlu menyesuaikan estetika bangunan kolonial,
- pola timbulan sampah akibat wisata perlu dikelola melalui teknologi prediktif,

- jadwal pengangkutan disesuaikan untuk meminimalkan gangguan,
- kebijakan pengelolaan sampah harus masuk dalam rencana pengelolaan pelestarian kawasan.

Dengan demikian, pengelolaan sampah bukan hanya mendukung keberfungsian kawasan, tetapi juga merupakan bagian integral dari strategi pelestarian cagar budaya secara berkelanjutan.

2.4 Teknologi Digital dalam Pengelolaan Sampah

Transformasi digital di bidang lingkungan membuka peluang baru untuk merancang sistem pengelolaan sampah yang lebih efisien, adaptif, dan berbasis data. Pemanfaatan teknologi seperti Sistem Informasi Geografis (GIS), Big data, *machine learning* (CNN, Random Forest, LSTM), *Vehicle Routing Problem* (VRP), Internet of Things (IoT), serta analisis tren daring memungkinkan pengelolaan sampah dilakukan secara prediktif, spasial, dan partisipatif.

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang sebagai kawasan cagar budaya, teknologi digital berperan ganda, yaitu:

1. meningkatkan efisiensi teknis sistem persampahan tanpa menambah beban fisik terhadap kawasan bersejarah, dan
2. menjaga kualitas visual, kenyamanan wisata, serta nilai pelestarian *heritage* melalui penempatan infrastruktur yang lebih presisi dan minim gangguan (Martins & Cró, 2021; Ganesh et al., 2024).

2.4.1 GIS dan Analisis Spasial

Sistem Informasi Geografis (GIS) merupakan platform utama untuk mengelola dan menganalisis data berbasis lokasi dalam pengelolaan sampah perkotaan. GIS memungkinkan pemetaan titik tempat sampah (TS), jalur pengangkutan, sebaran aktivitas wisata, dan batas zonasi *heritage* secara terintegrasi sehingga pola timbulan dan permasalahan persampahan dapat divisualisasikan secara spasial (Gutama & Iresha, 2023; Wu et al., 2022).

Dalam banyak studi, GIS digunakan untuk:

- Analisis *hotspot* dan *heatmap* timbulan sampah, sehingga area dengan beban sampah tinggi dapat diidentifikasi dan diprioritaskan untuk intervensi (Liang et al., 2021).
- Overlay zonasi *heritage* dengan titik TS dan rute truk, untuk mengurangi konflik antara kebutuhan operasional persampahan dan pelestarian visual kawasan bersejarah (Martins & Cró, 2021).
- Perencanaan lokasi fasilitas (TPS, TS kolektif, depo) yang mempertimbangkan jarak tempuh, aksesibilitas, dan sensitivitas kawasan (Nesmachnow et al., 2020).

Integrasi GPS–GIS juga dimanfaatkan untuk melacak pergerakan armada pengangkut sampah secara *real time* dan mengevaluasi kesesuaian rute aktual dengan rute rencana, termasuk pada konteks kota-kota wisata bersejarah (Gutama & Iresha, 2023). Pada penelitian ini, GIS digunakan untuk memetakan 122 titik TS, zonasi *heritage* Situs Kota Lama Semarang, serta rute pengangkutan eksisting dan hasil optimasi, yang kemudian diintegrasikan dengan model AI dan VRP.

2.4.2 *Machine learning* untuk Prediksi Timbulan (CNN, RF, VRP)

Machine learning (ML) telah menjadi pilar penting dalam pengembangan sistem pengelolaan sampah cerdas. Tiga tipe model yang paling relevan dengan penelitian ini adalah *Convolutional Neural Network* (CNN), *Random Forest* (RF), dan *Vehicle Routing Problem* (VRP).

Secara umum, ML dimanfaatkan untuk:

- Deteksi dan klasifikasi visual kondisi tempat sampah,
- Prediksi timbulan sampah berdasarkan deret waktu dan variabel penjelas (aktivitas, cuaca, jenis usaha, wisata),
- Mendukung optimasi rute dan penjadwalan pengangkutan melalui input prediktif ke model VRP (Malik et al., 2023; Liang et al., 2021; Ahmed et al., 2023).

a. *Convolutional Neural Network* (CNN)

CNN digunakan untuk menganalisis citra digital dan mengklasifikasikan kondisi TS (baik, sedang, buruk, tidak layak pakai) secara otomatis. Sejumlah penelitian menunjukkan keunggulan CNN dibandingkan algoritma klasifikasi konvensional karena kemampuannya melakukan automatic feature extraction dan mempertahankan struktur spasial citra (LeCun et al., 2015; Malik et al., 2023).

Pada tahap awal pengembangan *image recognition* untuk persampahan, algoritma seperti *Support Vector Machine* (SVM), *K-Nearest Neighbors* (KNN), *Artificial Neural Network* (ANN) klasik, dan *Principal Component Analysis* (PCA) telah digunakan, namun memiliki keterbatasan dalam mengenali pola visual yang

kompleks dan variatif. Tabel 4 merangkum teknologi sejenis CNN dan keterbatasannya dalam konteks klasifikasi citra tempat sampah.

Tabel 4. Teknologi Sejenis CNN dalam Klasifikasi Citra

Teknologi Sejenis	Karakteristik	Keterbatasan dibanding CNN
<i>Support Vector Machine (SVM)</i>	Digunakan untuk klasifikasi citra 2D melalui feature extraction manual.	Tidak mampu mengenali pola visual kompleks dan sensitif terhadap pencahayaan yang bervariasi.
<i>K-Nearest Neighbors (KNN)</i>	Mengklasifikasi citra berdasarkan jarak kemiripan fitur.	Tidak efisien untuk dataset besar dan rentan terhadap noise.
<i>Artificial Neural Network (ANN)</i>	Jaringan saraf sederhana berbasis input vektor.	Tidak mempertahankan struktur spasial antar piksel citra.
<i>Principal Component Analysis (PCA)</i>	Analisis statistik untuk reduksi dimensi citra.	Tidak mampu mengenali fitur non-linear dan tekstur kompleks.

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, CNN relevan karena:

1. memungkinkan pemantauan kondisi TS tanpa penambahan papan signage mencolok yang mengganggu estetika, dan
2. hasil klasifikasinya dapat diintegrasikan dengan GIS dan VRP untuk menentukan prioritas pengangkutan pada titik-titik kritis.

b. *Random Forest Regression* (RF)

Random Forest Regression (RFR) digunakan untuk memprediksi volume timbulan sampah harian pada tiap titik TS berdasarkan kombinasi data spasial, aktivitas sosial-ekonomi, jumlah pengunjung, jenis usaha, dan faktor lingkungan. Sebagai model ansambel, RF menggabungkan banyak pohon keputusan (*decision*

trees) untuk menghasilkan prediksi yang lebih stabil dan akurat (Breiman, 2001; Liang et al., 2021).

Berbagai model regresi lain seperti *Linear Regression* (LR), *Multiple Linear Regression* (MLR), *Decision Tree Regression* (DTR), dan *Gradient Boosting Regression* (GBR) juga digunakan dalam literatur pengelolaan sampah, namun RFR sering dipilih karena:

- mampu menangkap hubungan non-linier antara variabel,
- lebih tahan terhadap *noise* data dan *multikolinearitas*,
- menyediakan *feature importance* yang memudahkan interpretasi kebijakan (Liang et al., 2021; Ahmed et al., 2023).

c. *Vehicle Routing Problem* (VRP)

Vehicle Routing Problem (VRP) adalah model optimasi rute multi-kendaraan yang mempertimbangkan kapasitas armada, waktu tempuh, jarak, dan batasan operasional. Dalam pengelolaan sampah, VRP digunakan untuk menyusun rute angkutan yang meminimalkan jarak tempuh, waktu operasi, dan emisi, sekaligus memastikan semua titik layanan terlayani (Laporte, 2009; Iqbal et al., 2022).

Dibandingkan dengan pendekatan *Shortest Path*, *Travelling Salesman Problem* (TSP), *Linear Programming* (LP), atau *metaheuristik* seperti *Ant Colony Optimization* (ACO), VRP lebih sesuai untuk sistem multi-armada yang kompleks dan berbasis jaringan jalan nyata, seperti pada kawasan *heritage* yang memiliki gang sempit, pola jalan bersejarah, dan zona yang harus dihindari (Laporte, 2009;

Nesmachnow et al., 2020). Tabel 5 menggambarkan perbedaan VRP dengan teknologi sejenis dalam optimasi rute pengangkutan sampah.

Tabel 5. Teknologi Sejenis VRP dalam Optimasi Rute Pengangkutan

Teknologi Sejenis	Karakteristik	Keterbatasan dibanding VRP
<i>Shortest Path</i>	Menentukan rute terpendek antar dua titik.	Tidak mempertimbangkan kapasitas armada dan waktu pengangkutan.
<i>Travelling Salesman Problem (TSP)</i>	Mengoptimalkan rute untuk satu kendaraan.	Tidak dapat digunakan untuk sistem multi-armada.
<i>Linear Programming (LP)</i>	Optimasi deterministik berbasis fungsi tujuan.	Kurang fleksibel terhadap data dinamis dan spasial.
<i>Ant Colony Optimization (ACO)</i>	Algoritma metaheuristik berbasis perilaku semut.	Membutuhkan waktu komputasi tinggi dan parameter kompleks.

Sumber:sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

2.4.3 Sistem Pelacakan Digital, IoT, dan *Smart waste system*

Selain ML, perkembangan IoT dan sistem pelacakan digital menjadi komponen penting dalam membangun *smart waste system*. Sensor ultrasonik, RFID, atau *load cell* yang dipasang pada kontainer sampah mampu mengirimkan informasi kapasitas, frekuensi pengisian, dan kondisi lingkungan (suhu, kelembaban) secara *real time* ke dashboard pengawasan (Hussain et al., 2024).

Penerapan IoT dalam pengelolaan sampah mencakup:

- Smart bins yang mendeteksi tingkat kepenuhan dan secara otomatis mengirim sinyal ketika mendekati ambang batas,
- Pelacakan GPS armada untuk memantau kedisiplinan rute dan waktu pengangkutan,

- Integrasi dengan VRP dan GIS untuk memperbarui rute secara dinamis berdasarkan kondisi lapangan (Malik et al., 2023; Iqbal et al., 2022).

Adapun manfaat pendekatan ini antara lain:

- mengurangi frekuensi *overflow* di TS,
- meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar dan waktu,
- memperkuat transparansi layanan kepada publik.

Namun, tantangan penerapan IoT di kawasan *heritage* meliputi biaya investasi dan pemeliharaan, keterbatasan jaringan, serta kebutuhan desain perangkat yang tidak mengganggu estetika visual. Oleh karena itu, dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, sensor dan perangkat telemetri perlu disamarkan atau diselaraskan dengan elemen arsitektur, sehingga tidak bertentangan dengan prinsip pelestarian visual.

2.4.4 Analisis Tren Daring

Analisis tren daring menggunakan data digital seperti Google Trends, *scraping* media sosial, dan forum komunitas untuk memahami dinamika perhatian publik terhadap isu kebersihan dan persampahan. Dalam pengelolaan lingkungan, metode ini digunakan untuk:

- memantau tingkat kesadaran publik terhadap isu kebersihan di suatu kawasan,
- mendeteksi lonjakan isu yang berkaitan dengan peristiwa tertentu (misalnya festival budaya, bencana, atau kampanye kebersihan),

- merancang strategi komunikasi dan edukasi yang lebih tepat sasaran berbasis kata kunci dan sentimen yang berkembang (Rossitto et al., 2022; Medina-Medina et al., 2024; Nugraha et al., 2023).

Tabel 6 merangkum metode analisis tren daring, manfaat, dan tantangannya.

Tabel 6. Analisis Tren Daring dalam Pengelolaan Lingkungan

No	Metode	Deskripsi	Manfaat	Tantangan	Referensi
1	Google Trends	Analisis kata kunci pencarian publik	Indikator kesadaran dan kepedulian	Data agregat, kurang detail lokal	Medina-Medina et al. (2024)
2	Scraping Media Sosial	Ekstraksi opini di platform digital	Analisis sentimen dan isu publik	Data bising dan bias algoritmik	Rossitto et al. (2022); Nugraha et al. (2023)
3	Forum Komunitas	Analisis diskusi online warga	Identifikasi masalah spesifik dan solusi lokal	Representasi terbatas	Ciampa & Bosone (2022)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, analisis Google Trends dan data *scraping* daring dapat mengungkap sejauh mana isu “Kota Lama”, “kebersihan”, atau “sampah” muncul dalam percakapan publik, sekaligus menjadi indikator tidak langsung dari efektivitas program pengelolaan sampah dan kampanye edukasi.

2.4.5 Implikasi Teknologi Digital untuk Pengelolaan Sampah di Situs *Heritage*

Berdasarkan kajian literatur mengenai GIS, Big data, *machine learning* (CNN, RF, LSTM), VRP, IoT, dan analisis tren daring, terdapat beberapa implikasi strategis untuk pengelolaan sampah di Situs Kota Lama Semarang:

1. Efisiensi Teknis dan Operasional. Integrasi CNN–RF–VRP–GIS memungkinkan sistem pengelolaan sampah yang prediktif dan adaptif. CNN menyediakan deteksi visual kondisi TS, RF memprediksi timbunan berdasarkan aktivitas dan pola waktu, GIS memetakan pola spasial dan zonasi *heritage*, sedangkan VRP mengoptimalkan rute pengangkutan sehingga jarak, waktu, dan emisi dapat ditekan (Liang et al., 2021; Malik et al., 2023; Iqbal et al., 2022).
2. Peningkatan Partisipasi Publik melalui *Civic-tech*. Aplikasi pelaporan digital, seperti *chatbot* WhatsApp atau formulir daring, memungkinkan warga, pelaku usaha, dan wisatawan untuk melaporkan kondisi sampah secara cepat. Laporan ini kemudian dapat dihubungkan dengan sistem GIS dan dashboard, sehingga keputusan operasional lebih responsif dan transparan (Buntaine et al., 2021; Siwawa, 2025).
3. Konservasi Visual dan Integritas *Heritage*. Infrastruktur digital (sensor, kamera, smart bin) harus diintegrasikan dengan desain yang ramah budaya dan tidak merusak *visual integrity* kawasan. Hal ini sejalan dengan prinsip pelestarian *urban heritage* yang menekankan keseimbangan antara fungsi

modern dan autentisitas tampilan situs (Martins & Cró, 2021; Ganesh et al., 2024).

4. Kelembagaan Adaptif dan Tata Kelola Data. Digitalisasi sistem pengelolaan sampah menuntut kapasitas kelembagaan dalam hal manajemen data, keamanan informasi, dan koordinasi lintas instansi (DLH, BPSKL, Dinas Kebudayaan dan Pariwisata) memerlukan SOP khusus, perjanjian berbagi data, serta mekanisme monitoring–evaluasi berbasis indikator yang jelas agar teknologi benar-benar mendukung keberlanjutan dan pelestarian (Shehayeb et al., 2023).

Dengan demikian, teknologi digital tidak diposisikan sekadar sebagai *gimmick* teknologi, tetapi sebagai instrumen ilmiah dan kelembagaan untuk mewujudkan pengelolaan sampah yang cerdas, partisipatif, dan *pro-heritage* di Situs Kota Lama Semarang, sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian SDGs 11, 12, dan 13.

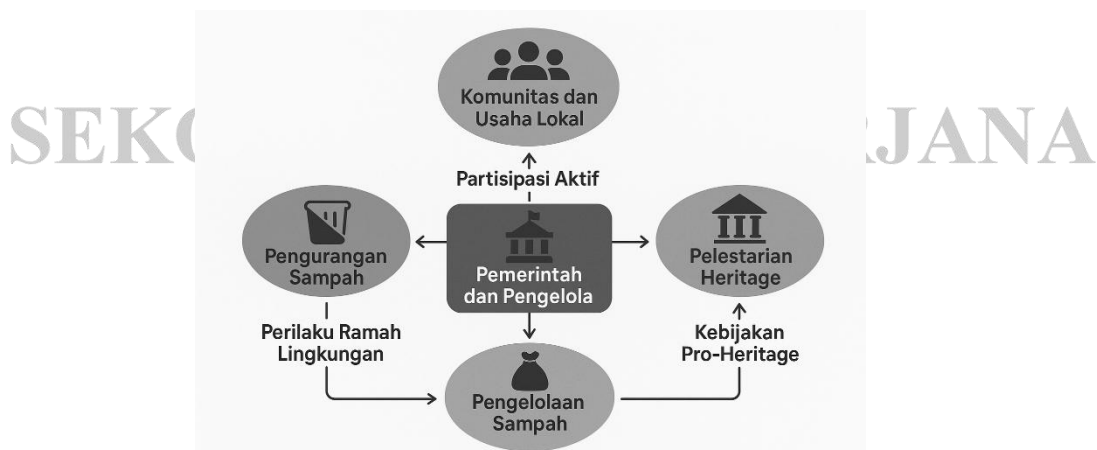
2.5 Partisipasi Publik dalam Pengelolaan Sampah

Partisipasi publik merupakan elemen kunci dalam mewujudkan tata kelola lingkungan yang inklusif, berkelanjutan, dan berkeadilan. Dalam konteks perkotaan, partisipasi tidak hanya dipahami sebagai keterlibatan masyarakat dalam tahap implementasi, tetapi juga dalam perencanaan, pengambilan keputusan, monitoring, dan evaluasi program (Arnstein, 1969; Dong et al., 2023). Pada Situs Kota Lama Semarang, partisipasi publik menjadi semakin penting karena melibatkan sedikitnya tiga kelompok aktor:

1. warga lokal,

2. pelaku usaha, dan
3. wisatawan (Siwawa, 2025).

Partisipasi yang efektif memperkuat legitimasi kebijakan, meningkatkan kesadaran kolektif, serta menciptakan rasa memiliki (*sense of ownership*) terhadap kebersihan kawasan *heritage* (Ortiz Palafox, 2022; Strzelecka, 2024). Dalam literatur pengelolaan lingkungan, partisipasi publik dipandang bukan sebagai pelengkap, melainkan pilar utama dalam mewujudkan keberlanjutan, terutama ketika dikaitkan dengan tata kelola cagar budaya dan sistem persampahan yang kompleks. Dalam konteks pengelolaan sampah digital-partisipatif, keterlibatan warga, pelaku usaha, dan wisatawan perlu diintegrasikan ke dalam sistem manajemen sampah yang adaptif: mereka tidak hanya menjadi pengguna layanan, tetapi juga pemasok data (melalui pelaporan), mitra dalam pengawasan, sekaligus penerima manfaat dari lingkungan yang lebih bersih. Gambar 3 menggambarkan model integrasi partisipasi publik dalam pengelolaan sampah yang memadukan peran komunitas, pemerintah, dan teknologi digital (Edward & Ofili, 2023).



Gambar 3. Model Integrasi Partisipasi Publik dalam Pengelolaan Sampah

Sumber: diadaptasi dari Edward & Ofili, 2023

Dalam penelitian ini, istilah publik merujuk pada kelompok non-pemerintah yang terlibat dalam sistem pengelolaan sampah, baik secara langsung (penghasil dan pengelola sampah) maupun tidak langsung (pengguna ruang dan penerima manfaat kebersihan) di Situs Kota Lama Semarang. Publik dipahami sebagai aktor sosial yang memiliki kepentingan, tanggung jawab, dan kontribusi terhadap kebersihan dan keberlanjutan lingkungan.

Secara konseptual, publik dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Warga (*Residents*)

- Masyarakat yang berdomisili dan beraktivitas rutin di kawasan Kota Lama.
- Berperan dalam pemilahan sampah sejak sumber, menjaga kebersihan lingkungan sehari-hari, serta melaporkan kondisi tempat sampah (TS) melalui kanal digital.

2. Pelaku Usaha (*Business Actors*)

- Pemilik/pengelola kafe, restoran, toko, penyedia jasa wisata, dan usaha kreatif di kawasan *heritage*.
- Berkontribusi dalam pengelolaan sampah komersial (kemasan, sisa makanan), penyediaan fasilitas pemilahan di lokasi usaha, dan kolaborasi dengan instansi pengelola dalam penjadwalan pengangkutan.

3. Wisatawan (*Visitors/Tourists*)

- Pihak yang berkunjung pada hari biasa maupun periode puncak (akhir pekan, hari libur, event budaya).

- Berperan dalam menjaga kebersihan ruang publik, memanfaatkan fasilitas pembuangan yang tersedia, serta mendukung sistem pelaporan digital ketika menemukan kondisi sampah yang bermasalah.

Dengan definisi ini, publik dipandang bukan hanya sebagai “penerima layanan” melainkan sebagai aktor kolaboratif yang menentukan keberhasilan sistem pengelolaan sampah digital-partisipatif di Situs Kota Lama Semarang. Pendekatan ini sejalan dengan teori *Ladder of Citizen Participation* (Arnstein, 1969) dan konsep *collaborative governance* (Ansell & Gash, 2008).

2.5.1 Teori Partisipasi (Arnstein Ladder)

Arnstein (1969) mengemukakan model “*Ladder of Citizen Participation*” yang membagi tingkat partisipasi warga ke dalam delapan jenjang: manipulasi, terapi, pemberian informasi, konsultasi, penenangan (*placation*), kemitraan, pendelegasian kekuasaan, dan kendali warga (*citizen control*). Jenjang tersebut sering dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama (Gaber, 2019):

- *Non-participation*: manipulasi, terapi → partisipasi bersifat semu.
- *Tokenism*: informasi, konsultasi, penenangan → warga didengar tetapi belum berdaya menentukan keputusan.
- *Citizen power*: kemitraan, pendelegasian kekuasaan, kendali warga → warga memiliki pengaruh nyata dalam perumusan dan pelaksanaan kebijakan.

Dalam konteks pengelolaan sampah di kawasan *heritage*, target partisipasi idealnya diarahkan pada jenjang kemitraan hingga kendali warga, sehingga

masyarakat tidak hanya menjadi pelaksana program kebersihan, tetapi juga turut menentukan prioritas kebijakan, lokasi fasilitas, dan evaluasi layanan (Li & de Jong, 2017; S. Lee, 2022). Tingkat partisipasi ini menjadi relevan ketika sistem pengelolaan sampah mulai memanfaatkan teknologi digital misalnya, pelaporan kondisi TS melalui *chatbot*, survei daring, atau forum diskusi digital, dimana hal tersebut hanya akan efektif jika warga diposisikan lebih dari sekadar objek survei; mereka harus melihat bahwa masukan mereka berpengaruh nyata terhadap perbaikan layanan.

Untuk mengoperasionalkan jenjang partisipasi tersebut, penelitian ini memanfaatkan tipologi tingkat keterlibatan masyarakat yang dirangkum dalam Tabel 7 mencakup informasi, konsultasi, partisipasi aktif, kemitraan, dan pengambilan keputusan bersama (Gaber, 2019; Korolova & Treija, 2019; Giustiniani et al., 2024; Davids et al., 2022; Adjei Mensah et al., 2017; Sadri et al., 2020; Linzalone et al., 2017; Ortiz Palafox, 2022).

Tabel 7. Tingkat Keterlibatan Masyarakat dalam Pengelolaan Lingkungan

No	Tingkat Keterlibatan	Deskripsi	Contoh Implementasi	Keunggulan	Kelemahan	Referensi
	Informasi	Masyarakat menerima informasi	Kampanye kebersihan via media sosial	Memberi kesadaran awal	Partisipasi terbatas	Gaber (2019); Strzelecka (2024)
	Konsultasi	Warga memberi masukan	Forum diskusi kebijakan sampah	Aspirasi masyarakat tersalurkan	Kurang tindak lanjut	Korolova & Treija (2019)
	Partisipasi Aktif	Warga terlibat	Bersih-bersih bersama, bank sampah	<i>Sense of ownership</i> tinggi	Bergantung pada waktu &	Giustiniani et al. (2024);

No	Tingkat Keterlibatan	Deskripsi	Contoh Implementasi	Keunggulan	Kelemahan	Referensi
		dalam program			komitmen warga	Davids et al. (2022)
	Kemitraan	Kolaborasi warga– pemerintah– swasta	Proyek pengelolaan sampah bersama DLH	Memperluas dukungan & sumber daya	Koordinasi kompleks	Adjei Mensah et al. (2017); Sadri et al. (2020)
	Pengambilan Keputusan	Warga ikut menentukan kebijakan	Penentuan lokasi TPS melalui musyawarah	Demokratis, adil, inklusif	Proses panjang, butuh transparansi	Linzalone et al. (2017); Ortiz Palafox (2022)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Tipologi tersebut menjadi dasar perancangan instrumen survei partisipasi publik dan analisis regresi di Situs Kota Lama Semarang, terutama untuk menilai sejauh mana warga, pelaku usaha, dan wisatawan telah bergerak dari sekadar penerima informasi menuju kemitraan dan pengambilan keputusan bersama.

2.5.2 Pendekatan *Community-Based Waste Management* (CBWM)

Pendekatan *Community-Based Waste Management* (CBWM) menempatkan masyarakat sebagai pelaku utama pengelolaan sampah dari hulu hingga hilir.

Berbagai studi menunjukkan bahwa CBWM efektif dalam:

- menurunkan volume sampah yang tidak terkelola,
- memperkuat solidaritas sosial dan jaringan komunitas,
- menciptakan nilai ekonomi melalui bank sampah, komposting, dan kegiatan daur ulang (Enu et al., 2023; Saranti et al., 2024; Vasconcelos et al., 2022).

Tabel 8 merangkum komponen utama CBWM, keunggulan, kelemahan, dan referensi pendukung.

Tabel 8. Pendekatan *Community-Based Waste Management* (CBWM)

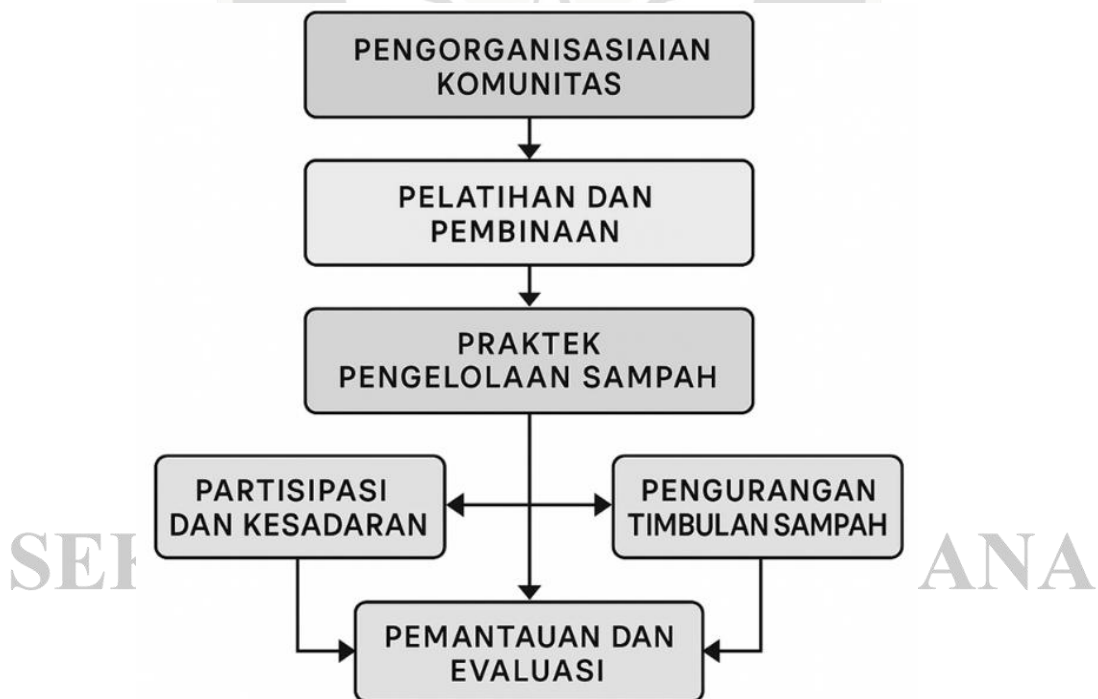
No	Komponen CBWM	Deskripsi	Keunggulan	Kelemahan	Referensi
1	Pelibatan Masyarakat	Warga dilibatkan dalam pengumpulan, pemilahan, pengolahan	Meningkatkan kesadaran & <i>sense of ownership</i>	Bergantung pada partisipasi aktif	Ulum et al. (2024); Kubota et al. (2020)
2	Pendidikan & Penyuluhan	Edukasi dampak lingkungan & manfaat pengelolaan	Perubahan perilaku jangka panjang	Butuh waktu lama & sumber daya	X. Liu & Peng (2024); Arya & Shukla (2025)
3	Sistem Berbasis Komunitas (Bank Sampah)	Kelompok warga mengelola sampah lokal	Meningkatkan solidaritas & ekonomi lokal	Perlu infrastruktur & koordinasi	Enu et al. (2023); Vasconcelos et al. (2022)
4	Kemitraan Pemerintah–Swasta	Kolaborasi pendanaan & teknis	Dukungan kuat secara kelembagaan	Koordinasi kompleks	Szpilko et al. (2023); Sunarti et al. (2024)
5	Infrastruktur Pendukung	Fasilitas pemilahan, TPS komunitas	Memperkuat keberlanjutan program	Biaya awal tinggi	Saranti et al. (2024)
6	Monitoring & Evaluasi	Pemantauan dan penyesuaian program	Efektif dalam jangka panjang	Membutuhkan SDM tambahan	D’Amico et al. (2021)

Sumber:sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, CBWM relevan karena:

- terdapat komunitas lokal dan pelaku usaha yang cukup terorganisasi,
- BPSKL dan pemerintah kota telah memiliki peran dalam pengelolaan kawasan,
- kegiatan wisata dan ekonomi kreatif menghasilkan timbulan sampah cukup besar di ruang publik.

Gambar 4 menggambarkan alur pendekatan CBWM yang menunjukkan hubungan antara masyarakat, kelembagaan, dan teknologi dalam satu sistem terpadu (Ulum et al., 2024).



Gambar 4. Flowchart Pendekatan *Community-Based Waste Management*

Sumber: diadaptasi dari Ulum et al., 2024

CBWM dalam penelitian ini diposisikan sebagai basis sosial untuk model digital-partisipatif: data lapangan dan pelaporan warga menjadi input utama bagi

sistem AI–GIS–VRP, sementara kebijakan dan program bersandar pada musyawarah dan struktur komunitas yang sudah ada.

2.5.3. Partisipasi Publik dalam Sistem Digital (*Civic-tech*)

Perkembangan *civic-tech* membuka peluang baru untuk memperkuat partisipasi publik dalam pengelolaan sampah. Teknologi digital memungkinkan warga, pelaku usaha, dan wisatawan untuk:

- melaporkan kondisi TS/TPS secara *real-time*,
- mengakses jadwal pengangkutan dan informasi kebijakan,
- memberikan penilaian atas kualitas layanan persampahan.

Contoh praktik yang sering dirujuk antara lain:

- penggunaan Epicollect5 untuk pemetaan lebih dari 2.000 titik sampah hanya dalam beberapa hari di kawasan perkotaan (Cárdenas-León et al., 2024);
- sistem pelaporan berbasis SMS dan aplikasi di Uganda yang berhasil mengumpulkan ribuan laporan warga mengenai pelayanan publik dalam 9 bulan (Buntaine et al., 2021);
- pemanfaatan IoT dan *digital twin* untuk mensimulasikan kapasitas TS dan mengoptimalkan rute pengangkutan (Medina-Medina et al., 2024).

Di Situs Kota Lama Semarang, integrasi partisipasi digital dapat dikembangkan melalui:

- *WhatsApp Chatbot* yang memungkinkan pelaporan disertai foto dan titik lokasi,
- formulir digital berbasis aplikasi sederhana (misalnya Epicollect5),

- dashboard pengawasan yang dapat diakses oleh DLH, BPSKL, dan komunitas lokal untuk memantau tren laporan.

Dari sudut pandang perilaku, adopsi sistem pelaporan digital sangat dipengaruhi oleh persepsi kemudahan penggunaan dan kemanfaatan (*perceived ease of use* dan *perceived usefulness*) sebagaimana ditekankan dalam *Technology Acceptance Model* (TAM) dan model UTAUT (Davis, 1989; Venkatesh et al., 2003). Oleh karena itu, desain antarmuka dan alur pelaporan perlu dibuat sederhana, ringan, dan relevan dengan kebutuhan harian warga dan pelaku usaha, agar partisipasi digital tidak hanya tinggi di awal, tetapi juga berkelanjutan.

2.5.4. Partisipasi Wisatawan dalam Pengelolaan Sampah

Literatur pariwisata berkelanjutan menekankan bahwa wisatawan bukan hanya konsumen pasif, tetapi dapat berperan dalam menjaga kebersihan dan kelestarian kawasan *heritage* (Martins & Cró, 2021; Pintossi et al., 2023). Partisipasi wisatawan dapat berupa:

- kepatuhan terhadap aturan kebersihan,
- pemanfaatan fasilitas pemilahan sampah di titik-titik strategis,
- kontribusi melalui pelaporan digital ketika menemukan kondisi sampah yang mengganggu pengalaman berkunjung.

Studi Strzelecka (2024) menunjukkan bahwa keterlibatan wisatawan dalam inisiatif keberlanjutan memperkuat citra destinasi dan meningkatkan peluang kunjungan ulang. Hal ini relevan bagi Situs Kota Lama Semarang, yang mengandalkan aktivitas wisata dan ekonomi kreatif sebagai sumber penghidupan masyarakat dan penggerak pelestarian.

Dengan demikian, instrumen survei partisipasi publik dalam penelitian ini secara eksplisit mengukur:

- persepsi dan perilaku warga,
- peran pelaku usaha, dan
- pengalaman serta kesediaan wisatawan untuk terlibat dalam sistem pelaporan dan pemeliharaan kebersihan kawasan.

2.5.5. Implikasi terhadap Model Pengelolaan Sampah di Situs Kota Lama Semarang

Dari teori Arnstein, pendekatan CBWM, literatur *civic-tech*, dan studi partisipasi wisatawan, dapat disimpulkan bahwa model pengelolaan sampah di Situs Kota Lama Semarang perlu menekankan:

1. Partisipasi Substantif. Publik (warga, pelaku usaha, dan wisatawan) tidak hanya sebagai pelapor insidental, tetapi dilibatkan dalam tahap perencanaan, pengambilan keputusan, dan evaluasi kebijakan persampahan.
2. *Hybrid Model* (Digital + Komunitas). Menggabungkan kekuatan partisipasi berbasis komunitas (CBWM) dengan efisiensi sistem digital (AI–GIS–VRP, pelaporan daring), sehingga data lapangan yang kaya dapat diolah menjadi keputusan operasional yang adaptif.
3. Kesesuaian dengan Pelestarian *Heritage*. Partisipasi publik diarahkan untuk menjaga estetika kawasan, misalnya melalui edukasi tentang penempatan sampah, pemanfaatan TS yang tidak mengganggu fasad bangunan cagar budaya, serta pelaporan titik-titik yang berpotensi mengganggu integritas visual.

4. Kelembagaan Adaptif. Dibutuhkan SOP khusus yang mengatur alur partisipasi digital, respon instansi pengelola, mekanisme umpan balik, dan indikator keberhasilan. Hal ini memperkuat akuntabilitas dan mencegah kekecewaan publik terhadap sistem pelaporan yang tidak ditindaklanjuti.

Dengan demikian, partisipasi publik baik secara langsung di lapangan maupun melalui kanal digital bukan hanya aspek tambahan dalam model pengelolaan sampah di Situs Kota Lama Semarang, tetapi merupakan fondasi utama bagi sistem yang berkelanjutan, partisipatif, dan selaras dengan tujuan pelestarian *heritage* dan pencapaian SDGs.

2.6 Emisi Lingkungan dan Perhitungan CO₂e

Emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor persampahan tidak hanya bersumber dari proses dekomposisi organik di TPA, tetapi juga signifikan berasal dari kegiatan operasional pengangkutan sampah, terutama konsumsi bahan bakar oleh armada truk. Dalam konteks kawasan *heritage* seperti Situs Kota Lama Semarang, di mana jalur pengangkutan melalui jalan sempit dan rute tidak efisien, emisi dari transportasi menjadi salah satu sumber tekanan lingkungan yang penting untuk dianalisis. Metode internasional yang umum digunakan untuk menghitung emisi adalah IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* 2006 dan 2019 *Refinement*, khususnya sektor *Mobile Combustion* dalam kategori *Energy* (1.A.3.b – *Road Transportation*). IPCC menyarankan pendekatan *Fuel-Based Method*, yaitu menghitung emisi berdasarkan konsumsi bahan bakar aktual dan faktor emisi per liter (IPCC, 2006; IPCC, 2019).

Dalam penelitian ini, perhitungan emisi CO_{2e} dari armada pengangkut sampah dilakukan menggunakan metode IPCC dan mempertimbangkan konsumsi bahan bakar truk pengangkut sampah di Situs Kota Lama Semarang.

2.6.1 Konteks Emisi Sektor Persampahan

Sektor persampahan menghasilkan emisi melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Pengumpulan dan Pengangkutan Sampah. Menghasilkan CO₂, CH₄, dan N₂O dari kendaraan berbahan bakar fosil. Studi global menunjukkan bahwa 20–40% total emisi sistem persampahan di kawasan padat perkotaan berasal dari transportasi armada (Iqbal et al., 2022; Nesmachnow et al., 2020).
2. Pengolahan dan Pembuangan. Dekomposisi sampah organik di TPA menghasilkan CH₄, terutama bila tidak menggunakan sistem *landfill gas capture* (Thayalnayaki et al., 2023; Aleisa & Al-Jarallah, 2024).
3. Sampah yang Tidak Terkelola. Timbulan sampah di ruang publik yang tidak segera diangkut dapat menghasilkan degradasi visual, bau, dan potensi pelepasan CH₄ bila dalam jumlah besar (Martins & Cró, 2021).

Pada Situs Kota Lama Semarang, rute pengangkutan yang panjang dan berulang akibat lokasi TS yang tidak teratur memperbesar konsumsi BBM, sehingga emisi transportasi menjadi komponen dominan dalam penilaian dampak lingkungan.

2.6.2 Metode IPCC untuk Perhitungan Emisi CO_{2e}

IPCC 2006/2019 menyediakan formula dasar untuk menghitung emisi CO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil pada kendaraan:

(1) Emisi CO₂

$$\text{Emisi CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Activity Data (liter BBM)} \times \text{EF}_{\text{CO}_2} \quad (\text{Persamaan 1})$$

di mana:

- Activity Data = konsumsi bahan bakar (liter Pertalite/Solar)
- EF_{CO_2} = faktor emisi CO_2

(2) Emisi CH_4 dan N_2O

Untuk kendaraan, perhitungan CH_4 dan N_2O menggunakan formula:

$$\text{Emisi CH}_4/\text{N}_2\text{O} = \text{Activity Data} \times \text{EF}_{\frac{\text{CH}_4}{\text{N}_2\text{O}}} \times \text{GWP} \quad (\text{Persamaan 2})$$

(3) Emisi CO_2e Total

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{CO}_2 + (\text{CH}_4 \times \text{GWP}_{\text{CH}_4}) + (\text{N}_2\text{O} \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}) \quad (\text{Persamaan 3})$$

Dengan nilai GWP IPCC 2019:

- $\text{CH}_4 = 28$
- $\text{N}_2\text{O} = 265$

2.6.3 Faktor Emisi Bahan Bakar (Gasoline/Pertalite dan Solar)

Untuk kendaraan pengangkut sampah, jenis BBM di Indonesia biasanya Solar, tetapi beberapa kendaraan operasional kecil menggunakan gasoline (Pertalite/pertamax). Menurut IPCC 2006 Volume 2, Table 2.2 dan IPCC 2019 Refinement, faktor emisi adalah:

a. Gasoline (setara Pertalite)

- $\text{EF CO}_2 = 2.310 \text{ kg CO}_2/\text{liter}$
- $\text{EF CH}_4 = 0.0032 \text{ g/liter}$
- $\text{EF N}_2\text{O} = 0.0024 \text{ g/liter}$

b. Diesel/Solar

- $\text{EF CO}_2 = 2.680 \text{ kg CO}_2/\text{liter}$

- EF CH₄ = 0.0010 g/liter
- EF N₂O = 0.0040 g/liter

Konversi CH₄ dan N₂O ke CO_{2e} menggunakan GWP 28 dan 265 memberikan tambahan <1% dari total emisi, sehingga CO₂ tetap menjadi komponen terbesar (IPCC, 2019). Faktor emisi inilah yang digunakan dalam perhitungan emisi pada penelitian ini.

2.6.4 Emisi Pengangkutan Sampah di Kawasan *Heritage*

Penelitian Iqbal et al. (2022) menunjukkan bahwa optimasi rute menggunakan VRP dapat menurunkan konsumsi bahan bakar 10–35%, sehingga emisi CO_{2e} dapat berkurang secara signifikan. Studi Malik et al. (2023) juga memperlihatkan bahwa integrasi AI (CNN dan RF) dengan VRP dan GIS dapat menghasilkan pengangkutan yang lebih efisien, terutama di kawasan wisata bersejarah yang memiliki jalan sempit, titik persinggahan padat, arus wisatawan tinggi, dan kapasitas infrastruktur terbatas.

Kondisi tersebut juga ditemukan di Situs Kota Lama Semarang, di mana rute melingkar, frekuensi pengangkutan tinggi, dan titik sampah tersebar mengakibatkan konsumsi BBM yang tinggi.

2.6.5 Emisi dan Pelestarian *Heritage*

Emisi kendaraan pengangkut sampah tidak hanya berdampak pada perubahan iklim, tetapi juga pada kualitas pengalaman wisata dan keutuhan kawasan *heritage* melalui:

- peningkatan polusi udara,
- kebisingan di dalam kawasan bersejarah,

- getaran yang berpotensi mempengaruhi struktur bangunan tua,
- dan gangguan visual saat pengangkutan (Martins & Cró, 2021).

Artinya, pengurangan emisi melalui optimasi operasional adalah bagian dari strategi pelestarian kawasan, bukan sekadar efisiensi teknis.

2.6.6 Relevansi terhadap SDGs (11, 12, 13)

Perhitungan dan penurunan emisi CO₂e dalam pengangkutan sampah mendukung:

- SDG 11.4: pelestarian warisan budaya dunia, melalui pengurangan gangguan operasional.
- SDG 12.5: pengurangan timbulan sampah, melalui prediksi timbulan dan efisiensi pengangkutan.
- SDG 13: aksi iklim, melalui penurunan konsumsi BBM dan CO₂e.

Dengan demikian, analisis emisi CO₂e tidak hanya relevan secara metodologis, tetapi juga secara kebijakan dan konservasi.

2.6.7 Implikasi untuk Model Pengelolaan Sampah Situs Kota Lama

Semarang

Dari literatur IPCC, *waste transportation*, dan pengelolaan *heritage*, dapat disimpulkan bahwa:

1. Optimasi rute (VRP) adalah salah satu kunci penurunan emisi CO₂e dari aspek transportasi.
2. AI (CNN–RF) memungkinkan prediksi dan penjadwalan yang lebih efisien.
3. GIS memetakan pola rute dan titik sampah sesuai sensitivitas kawasan *heritage*.

4. Perhitungan CO₂e menjadi indikator utama keberlanjutan model yang diusulkan.

Model integratif yang dikembangkan kemudian dievaluasi pada Bab V melalui:

- penghematan jarak,
- pengurangan konsumsi BBM,
- penurunan CO₂e,
- serta dampaknya terhadap kualitas lingkungan *heritage*.

2.7 State of the Art Penelitian

Kajian *state of the art* diperlukan untuk memahami posisi penelitian ini di antara perkembangan terbaru dalam pengelolaan sampah, teknologi kecerdasan buatan, partisipasi publik, dan pengelolaan kawasan *heritage*. Literatur mutakhir menunjukkan bahwa sistem pengelolaan sampah berkelanjutan di kawasan perkotaan yang padat, termasuk situs *heritage*, memerlukan integrasi antara pendekatan ISWM, analisis spasial, algoritma prediktif berbasis AI, kanal partisipasi digital, dan penilaian keberlanjutan multidimensi (Zurbrugg et al., 2012; Beck & Ferasso, 2023; Ahmed et al., 2023; Medina-Medina et al., 2024).

Secara umum, terdapat lima rumpun pengetahuan yang menjadi dasar penelitian ini.

2.7.1 Waste Management & Spatial Modelling

Penelitian spasial mengenai distribusi timbulan sampah di kawasan *urban* telah berkembang melalui penggunaan GIS, *remote sensing*, dan pemodelan ruang-lokasi. Beberapa temuan utama:

1. GIS untuk perencanaan titik sampah dan rute.

- Gutama & Iresha (2023) menunjukkan bahwa integrasi GPS–GIS mampu mengoptimalkan lokasi TPS dan rute angkut dalam konteks kota bersejarah Sri Lanka.
 - Gao et al. (2024) menemukan bahwa pola kepadatan wisata mempengaruhi hotspot timbunan sampah pada kawasan *heritage*.
2. *Spatial–temporal modelling*.
- Martins & Cró (2021) memetakan hubungan spasial antara aktivitas wisata dan timbunan sampah menggunakan data mobilitas wisatawan.
3. Konteks *heritage*.
- Montacchini et al. (2024) menekankan bahwa desain fasilitas persampahan harus mempertimbangkan integritas visual kawasan bersejarah.

Gap penelitian: Belum ada studi yang mengintegrasikan GIS *hotspot mapping* + AI prediksi timbunan + optimasi rute VRP secara bersamaan khusus untuk situs *heritage* Indonesia.

2.7.2 AI Modelling untuk Prediksi Sampah

Perkembangan AI telah merevolusi sistem prediksi sampah dan deteksi visual berbasis citra melalui pemanfaatan CNN untuk klasifikasi visual. Beberapa temuan penelitian sebelumnya antara lain:

- Malik et al. (2023) melaporkan akurasi >90% untuk klasifikasi kondisi TPS menggunakan CNN.
- LeCun et al. (2015) menjadi rujukan fundamental CNN untuk image recognition.

Adapun beberapa penelitian yang mendukung pemanfaatan *Random Forest Regression* untuk prediksi timbunan antara lain:

- Liang et al. (2021) membuktikan RF lebih stabil daripada linear models untuk data non-linear seperti aktivitas wisata dan cuaca.
- Ahmed et al. (2023) menekankan integrasi ML dalam sistem *smart waste* dan *Hybrid deep learning*.
- Thayalnayaki et al. (2023) dan Aleisa & Al-Jarallah (2024) menunjukkan integrasi IoT + deep learning + GIS dapat menghasilkan sistem prediktif *real time*.

Gap penelitian: Belum ada penelitian yang menggabungkan CNN (deteksi visual TS) + RF (prediksi timbunan) + VRP (optimasi rute) dalam satu sistem terpadu untuk kawasan *heritage* seperti Situs Kota Lama Semarang.

2.7.3 Digital Waste System (IoT, Big Data)

Digitalisasi pengelolaan sampah semakin berkembang melalui:

a. Sensor IoT

- Hussain et al. (2024) menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dapat memprediksi kapasitas TPS secara *real-time*.
- Medina-Medina et al. (2024) memanfaatkan *digital twin* untuk simulasi aliran sampah.

b. Big Data Analytics

- Wu et al. (2022) mengembangkan model prediksi timbunan berbasis data spasial dan temporal.

- Nesmachnow et al. (2020) memanfaatkan data besar untuk optimasi logistik pengangkutan.

c. *VRP Optimization*

- Laporte (2009) memberikan fondasi matematis VRP.
- Iqbal et al. (2022) menerapkan VRP untuk mengurangi konsumsi BBM dan CO₂e hingga 35%.

Gap penelitian: Belum ada *digital waste system* yang disesuaikan untuk ruang sempit, estetika sensitif, dan pola wisata pada situs *heritage*.

2.7.4 Public Participation Modelling

Pemodelan partisipasi publik telah berkembang melalui tiga aliran utama:

- a. Tata kelola partisipatif (*governance-based*)
 - Arnstein (1969): Ladder of Participation.
 - Ansell & Gash (2008): Collaborative Governance.
 - Strzelecka (2024): partisipasi wisatawan dalam destinasi budaya.
- b. CBWM (*Community Based Waste Management*)
 - Ulum et al. (2024): pemetaan model CBWM di Indonesia.
 - Enu et al. (2023): dampak bank sampah pada perilaku warga.
 - Arya & Shukla (2025): perubahan perilaku melalui edukasi komunitas.
- c. Partisipasi Digital (*civic-tech*)
 - Buntaine et al. (2021): laporan SMS efektif untuk monitoring sampah.
 - Cárdenas-León et al. (2024): pemetaan partisipatif berbasis Epicollect5.

Gap penelitian: Belum ada model partisipasi publik multisegmen (warga–pelaku usaha–wisatawan) menggunakan kanal digital yang dipadukan dengan AI & GIS untuk pengelolaan sampah *heritage*.

2.7.5 Sustainability Assessment (RAP-FISH)

Evaluasi keberlanjutan dalam pengelolaan lingkungan membutuhkan pendekatan yang mampu menangkap dinamika multidimensi secara cepat, efisien, dan terukur. Salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam dua dekade terakhir adalah RAP-FISH (*Rapid Appraisal for Fisheries*), suatu teknik *rapid assessment* berbasis *Multidimensional Scaling* (MDS) yang pertama kali dikembangkan oleh Pitcher & Preikshot (2001). Walaupun awalnya dirancang untuk mengevaluasi keberlanjutan sistem perikanan, prinsip dasarnya yakni penilaian pada dimensi ekologis, sosial, ekonomi, teknologi, dan kelembagaan menjadikannya relevan untuk berbagai sektor lingkungan termasuk persampahan. Di Indonesia, metode ini diadaptasi secara metodologis melalui kerangka analisis yang lebih aplikatif oleh Fauzi & Anna (2002), sehingga penggunaannya semakin meluas pada konteks kebijakan dan tata kelola sumber daya.

Dalam sektor persampahan, RAPFISH berkembang menjadi berbagai turunan metodologis, termasuk RAP-WASTE, yang dirancang khusus untuk mengevaluasi keberlanjutan Tempat Pengumpulan Sementara (TPS), Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST), serta sistem pengelolaan sampah kota secara komprehensif. Adaptasi ini memungkinkan penilaian lintas dimensi yaitu dimensi teknologi, ekonomi, sosial, kelembagaan, dan lingkungan, dengan struktur atribut

yang lebih sesuai dengan karakteristik sistem persampahan perkotaan dibandingkan RAPFISH versi perikanan.

Studi di Yogyakarta (Iqbal et al., 2025) menunjukkan bahwa RAP-WASTE mampu mengidentifikasi kondisi keberlanjutan sistem persampahan dengan lebih akurat melalui pemetaan skor indeks dan analisis *leverage* untuk setiap dimensi. Hasil penelitian tersebut menempatkan dimensi partisipasi masyarakat sebagai komponen paling kuat dalam menopang keberlanjutan, sedangkan dimensi kelembagaan dan teknis tercatat sebagai faktor yang paling sensitif terhadap perubahan kebijakan. Studi tersebut membuktikan bahwa RAP-WASTE tidak hanya efektif untuk kota besar, tetapi juga untuk kawasan dengan karakter sosial dan spasial yang beragam. Temuan ini relevan karena memperlihatkan bahwa metode MDS seperti RAP-WASTE dapat menangkap kompleksitas sistem persampahan, mengidentifikasi variabel kritis yang memerlukan intervensi, serta menyediakan dasar perencanaan berbasis bukti (*evidence-based planning*). Namun, meskipun metode ini telah banyak digunakan dalam konteks kota, belum ada penelitian yang menerapkannya pada kawasan *heritage*, padahal kawasan tersebut memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap aspek visual, arsitektural, dan kualitas ruang publik.

Kajian RAP-FISH yang ada lebih banyak digunakan untuk menilai keberlanjutan TPA, sistem 3R, manajemen kota, atau desa, tetapi belum memasukkan variabel pelestarian cagar budaya sebagai bagian dari dimensi sosial-ekologis. Hal ini menciptakan *research gap* yang signifikan, terutama bagi kawasan seperti Situs Kota Lama Semarang yang memiliki fungsi ganda: kawasan wisata

dan kawasan cagar budaya nasional. Dengan demikian, metode RAP-FISH perlu dimodifikasi dengan memasukkan dimensi tambahan yang merepresentasikan *heritage value* atau sensitivitas kawasan bersejarah terhadap manajemen sampah.

Untuk memberikan gambaran komparatif, Tabel 9 merangkum *state of the art* penelitian yang relevan dan posisi studi ini dalam peta keilmuan.

Tabel 9. *State of The Art*, Gap dan Kontribusi Penelitian

No	Bidang Kajian	Temuan Literatur	Gap Akademik	Kontribusi Penelitian Ini	Referensi
1	ISWM & <i>Heritage</i>	ISWM mencakup teknis–regulasi–kelembagaan–finansial–sosial	Belum ada adaptasi ISWM untuk urban <i>heritage</i>	ISWM versi <i>heritage</i> untuk Situs Kota Lama Semarang	Zurbrugg et al. (2012); Beck & Ferasso (2023)
2	Spatial Modelling	GIS efektif memetakan timbunan dan lokasi TPS/TS	Belum diterapkan untuk pola wisata & estetika <i>heritage</i>	Hotspot GIS + overlay zona <i>heritage</i>	Gutama & Iresha (2023); Martins & Cró (2021)
3	AI Modelling	CNN, RF, LSTM efektif untuk prediksi & deteksi sampah	Belum digabung dengan VRP dan partisipasi digital	CNN–RF–VRP sebagai satu sistem terpadu	Malik et al. (2023); Liang et al. (2021); Laporte (2009)
4	Digital Waste Systems	IoT & big data tingkatkan efisiensi angkut	Belum diterapkan untuk area sensitif <i>heritage</i>	Smart waste berbasis estetika <i>heritage</i>	Hussain et al. (2024); Medina-Medina et al. (2024)

5	Public Participation	Arnstein, CBWM, civic-tech berkembang pesat	Belum ada integrasi multi-aktor (warga–usaha–wisatawan)	Model partisipasi digital multisegmen Kota Lama	Arnstein (1969); Siwawa (2025); Cárdenas-León et al. (2024)
6	Sustainability (RAP-FISH)	RAP-FISH multidimensi untuk evaluasi keberlanjutan	Belum diaplikasikan pada persampahan <i>heritage</i> ; belum ada dimensi <i>heritage</i>	RAP-FISH dengan dimensi tambahan “ <i>heritage</i> ”	Pitcher & Preikshot (2001); Fauzi & Anna (2002)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Temuan pada Tabel 9 menunjukkan bahwa meskipun RAP-FISH telah mapan sebagai metode evaluasi keberlanjutan, aplikasinya pada sistem persampahan kawasan *heritage* belum pernah dilakukan. Penelitian terdahulu juga tidak memasukkan indikator-indikator pelestarian cagar budaya seperti integritas visual kawasan, dampak sampah terhadap elemen arsitektural, atau sensitivitas aktivitas wisata. Kondisi ini penting karena keberlanjutan pengelolaan sampah di kawasan *heritage* tidak hanya menyangkut aspek teknis, tetapi juga perlindungan nilai historis dan estetika kawasan.

Oleh karena itu, penelitian ini berkontribusi dengan mengembangkan RAP-FISH multidimensi yang memasukkan variabel *heritage* sebagai komponen khusus, sehingga penilaian keberlanjutan tidak hanya mengukur efektivitas pengelolaan sampah, tetapi juga kesesuaiannya dengan prinsip pelestarian kawasan cagar budaya. Model ini diposisikan sebagai integrasi antara ISWM, GIS, AI (CNN/RF),

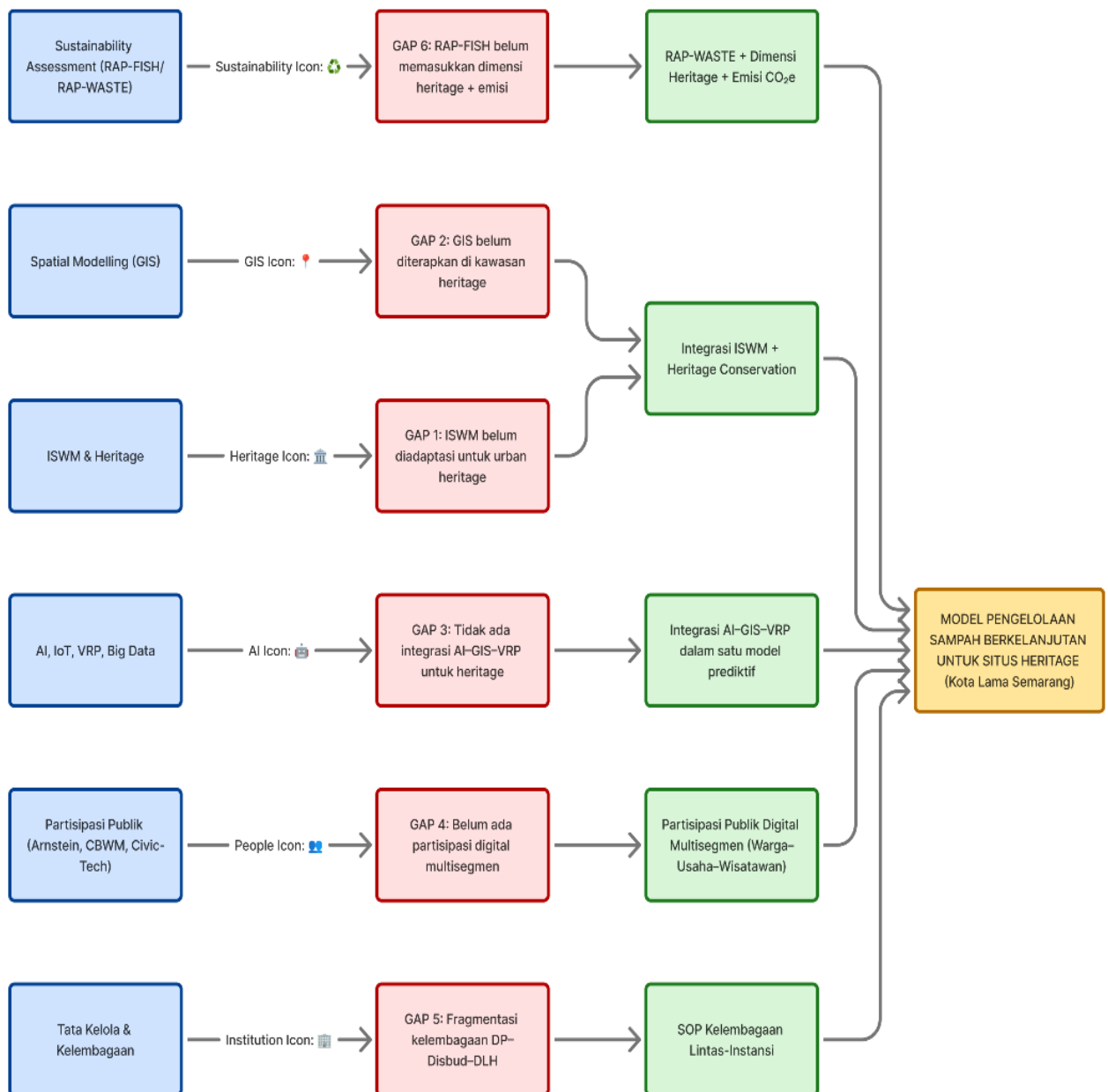
VRP, partisipasi digital, dan RAP-FISH, menjadikannya pendekatan holistik pertama di Indonesia untuk konteks pengelolaan sampah di kawasan cagar budaya.

Kesimpulan *State of the Art*

1. Manajerial: ISWM sudah mapan, tetapi membutuhkan adaptasi untuk konteks *heritage*.
2. Spasial: Analisis GIS penting tetapi belum dikombinasikan dengan prediksi AI dalam *heritage*.
3. Teknologi: CNN–RF–VRP sangat potensial tetapi belum ada studi integratif untuk situs *heritage*.
4. Sosial: Partisipasi publik digital pada situs *heritage* belum diteliti secara komprehensif.
5. Keberlanjutan: RAP-FISH belum digunakan untuk menilai keberlanjutan sistem persampahan *heritage*.

Posisi penelitian:

Penelitian pertama yang mengintegrasikan ISWM + GIS + AI (CNN/RF) + VRP + partisipasi digital + RAP-FISH untuk menciptakan model pengelolaan sampah berkelanjutan di Situs Kota Lama Semarang.



Gambar 5. Diagram State of The Art untuk menemukan Gap Penelitian
 Sumber:sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

2.8 Gap Penelitian

Kajian pustaka dan *state of the art* menunjukkan bahwa pengelolaan sampah di kawasan *heritage* seperti Situs Kota Lama Semarang memiliki karakteristik, tantangan, dan kebutuhan yang berbeda dari kawasan perkotaan biasa. Penelitian terdahulu memang telah membahas aspek teknis, sosial, atau tata kelola secara terpisah, namun belum ada pendekatan integratif berbasis teknologi digital dan partisipasi publik yang benar-benar sesuai dengan konteks *heritage*.

Untuk memperjelas posisi penelitian ini dalam lanskap keilmuan, dilakukan pemetaan *state of the art* dari berbagai bidang yang relevan, mencakup ISWM, analisis spasial GIS, teknologi digital (AI-IoT-VRP), partisipasi publik, tata kelola kelembagaan, serta metode evaluasi keberlanjutan RAP-FISH/RAP-WASTE. Hasil pemetaan tersebut divisualisasikan dalam Gambar 5 sebagai dasar identifikasi kesenjangan akademik (*research gaps*) yang menjadi landasan pengembangan model penelitian ini.

Gambar 5 menunjukkan bagaimana penelitian-penelitian terdahulu berkembang secara terpisah dalam enam domain utama, namun belum berinteraksi secara integratif untuk menjawab kebutuhan pengelolaan sampah di kawasan *heritage*. Setiap bidang menyumbang fondasi penting ISWM pada dimensi manajerial, GIS untuk pemahaman spasial, AI dan IoT untuk teknologi prediktif, *civic-tech* untuk peningkatan partisipasi, serta RAP-FISH sebagai alat evaluasi keberlanjutan. Namun, pemetaan tersebut juga memperlihatkan adanya kesenjangan tematik yang konsisten, mulai dari belum adanya adaptasi ISWM untuk *heritage*, minimnya pemanfaatan GIS berbasis pola wisata, hingga absennya

integrasi AI–GIS–VRP dan ketiadaan indeks keberlanjutan yang menggabungkan aspek sampah–*heritage*–emisi–partisipasi.

Diagram tersebut menegaskan bahwa penelitian sebelumnya belum menghasilkan suatu model yang bersifat holistik dan kontekstual bagi kawasan cagar budaya. Posisi penelitian ini berada pada pertemuan seluruh gap, yaitu menghadirkan model pengelolaan sampah berkelanjutan yang mengintegrasikan dimensi teknis, spasial, digital, sosial, kelembagaan, serta pelestarian *heritage*.

Dengan menelaah teori inti (ISWM, Arnstein’s Ladder, *Smart city*), penelitian terdahulu tentang pengelolaan persampahan, perkembangan artificial intelligence (AI), GIS modelling, dan metode *sustainability assessment*, ditemukan sejumlah kesenjangan akademik dan praktis sebagai berikut.

1. *Contextual Gap*: Minimnya Model Pengelolaan Sampah Berbasis Teknologi untuk Situs *Heritage*.

Penelitian pada situs *heritage* seperti Hoi An, George Town, dan kota-kota tua Eropa lebih banyak membahas konservasi arsitektur dan pariwisata (Martins & Cró, 2021; Montacchini et al., 2024), sedangkan pengelolaan sampah masih diperlakukan sebagai isu sekunder, sering kali hanya berupa deskripsi kondisi eksisting tanpa pemodelan sistemik (Sugangga et al., 2021).

Gap utama: Belum ada model pengelolaan sampah khusus untuk kawasan *heritage* yang mempertimbangkan:

- keterbatasan ruang fisik dan akses,
- tekanan wisatawan,
- kebutuhan menjaga estetika visual,

- regulasi pelestarian budaya.

2. *Theoretical Gap: ISWM & Partisipasi Publik Belum Diadaptasi ke Konteks Heritage*

ISWM telah menjadi kerangka kerja global untuk manajemen sampah (Tchbanoglous et al., 1993; Zurbrugg et al., 2012), tetapi:

- belum dikontekstualisasi untuk kawasan *heritage* yang memiliki batasan arsitektur, regulasi konservasi, dan tampilan visual,
- belum mengintegrasikan analitik prediktif, teknologi digital, dan dimensi budaya.

Pada sisi sosial, Arnstein's Ladder (1969) dan *Collaborative Governance* (Ansell & Gash, 2008) menunjukkan bahwa partisipasi bermakna memerlukan distribusi kekuasaan yang nyata. Namun penelitian lapangan di Kota Lama menunjukkan bahwa partisipasi masih bersifat informal, sporadis, dan tidak terdigitalisasi (Dong et al., 2023; Siwawa, 2025).

Gap utama: Belum ada integrasi antara ISWM + Teori Partisipasi + *Heritage Conservation* ke dalam satu model manajemen sampah terpadu.

3. *Technological Gap: AI, GIS, IoT Belum Pernah Diterapkan Secara Integratif pada Situs Heritage Indonesia*

Secara global, penerapan teknologi digital berkembang pesat:

- CNN untuk klasifikasi citra sampah (Malik et al., 2023),
- Random Forest untuk prediksi timbulan (Liang et al., 2021),
- VRP untuk optimasi rute angkut (Laporte, 2009; Iqbal et al., 2022),
- IoT untuk monitoring kapasitas TPS (Hussain et al., 2024),

- Big data analytics untuk sistem smart waste (Wu et al., 2022).

Namun belum ada penelitian yang menggabungkan:

- GIS untuk pola ruang *heritage*,
- CNN untuk deteksi visual kondisi TS,
- RF untuk prediksi timbulan berbasis aktivitas wisata & jenis usaha,
- VRP untuk rute optimal pengangkutan,
- IoT & Big Data untuk pemantauan *real-time*,

ke dalam satu sistem yang disesuaikan dengan keterbatasan fisik dan nilai estetika kawasan *heritage*.

Gap utama: Belum ada integrasi AI–GIS–*Heritage Constraints* dalam manajemen sampah.

4. *Digitalization Gap*: Belum Ada Sistem Partisipasi Publik Digital yang Melibatkan Warga, Pelaku Usaha, dan Wisatawan

Literatur *civic-tech* menunjukkan keberhasilan pelaporan berbasis SMS, chatbot, dan aplikasi web dalam meningkatkan respons pemerintah terhadap isu lingkungan (Buntaine et al., 2021; Cárdenas-León et al., 2024). Namun:

- belum ada sistem partisipasi digital khusus untuk situs *heritage*,
- belum melibatkan tiga aktor sekaligus (warga, pelaku usaha, wisatawan),
- belum terhubung dengan database AI atau dashboard GIS.

Sementara itu, literatur pariwisata budaya menegaskan bahwa wisatawan dapat menjadi aktor penting dalam menjaga kebersihan *heritage* (Strzelecka, 2024), namun penelitian Indonesia masih sangat terbatas.

Gap utama: Belum ada model partisipasi publik digital multisekmen yang terintegrasi dengan AI dan GIS untuk pengelolaan sampah *heritage*.

5. *Institutional Gap*: Fragmentasi Tata Kelola dan Minim SOP Khusus *Heritage*

Pengelolaan sampah di kawasan *heritage* biasanya melibatkan banyak lembaga (DLH, Dinas Kebudayaan & Pariwisata, pengelola kawasan, komunitas, pelaku usaha). Studi Indonesia menunjukkan tumpang tindih kewenangan menyebabkan implementasi tidak konsisten (Sari et al., 2019).

Gap utama: Belum ada SOP kelembagaan terpadu untuk pengelolaan sampah *heritage* berbasis teknologi dan partisipasi publik.

6. *Sustainability Measurement Gap*: RAP-FISH Belum Digunakan untuk Menilai Keberlanjutan Sistem Persampahan *Heritage*

RAP-FISH (Pitcher & Preikshot, 2001; Fauzi & Anna, 2002) telah digunakan untuk menilai keberlanjutan sektor perikanan dan lingkungan, namun:

- belum ada studi RAP-FISH atau RAP-WASTE pada sistem persampahan kawasan *heritage*,
- belum memasukkan dimensi pelestarian budaya (*heritage sustainability*) sebagai variabel analitik,

- belum dikombinasikan dengan emisi CO₂e, efisiensi rute, atau prediksi timbulan.

Gap utama: Belum ada indeks keberlanjutan yang menggabungkan sampah-*heritage*-emisi-AI-partisipasi publik.

Tabel 10 menunjukkan ringkasan gap penelitian.

Tabel 10. Ringkasan Gap Penelitian

No	Dimensi	Temuan Literatur	Gap Penelitian	Referensi
1	Konteks	Studi <i>heritage</i> fokus pada arsitektur & teknologi di situs wisata <i>heritage</i>	Minim kajian sistem persampahan berbasis teknologi di situs <i>heritage</i>	Martins & Cró (2021); Montacchini et al. (2024)
2	Teoritis	ISWM & Arnstein sering digunakan	Belum diadaptasi untuk <i>heritage</i> dengan estetika & regulasi konservasi	Zurbrugg et al. (2012); Dong et al. (2023)
3	Teknologi	CNN, RF, VRP, IoT berkembang pesat	Belum ada integrasi AI–GIS– <i>heritage</i>	Malik et al. (2023); Liang et al. (2021); Laporte (2009)
4	Digitalisasi	<i>Civic-tech</i> efektif	Belum ada partisipasi publik digital multisegmen	Buntaine et al. (2021); Cárdenas-León et al. (2024); Siwawa (2025)
5	Kelembagaan	Fragmentasi DLH–BPSKL–Disbud	Tidak ada SOP persampahan <i>heritage</i>	Sari et al. (2019)
6	Keberlanjutan	RAP-FISH multidimensi	Belum diterapkan untuk persampahan <i>heritage</i> & belum memasukkan dimensi budaya	Pitcher & Preikshot (2001); Fauzi & Anna (2002)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Kontribusi Penelitian terhadap Gap

Penelitian ini mengisi seluruh gap di atas melalui:

1. Model integratif berbasis ISWM–*heritage*.
2. Integrasi AI–GIS–VRP dalam satu sistem prediktif-operasional.
3. Platform partisipasi publik digital untuk warga, pelaku usaha, wisatawan.

4. SOP kelembagaan lintas-instansi yang adaptif terhadap *heritage*.
5. Penilaian keberlanjutan menggunakan RAP-WASTE + dimensi *heritage* + emisi CO₂e.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi substantif pada ilmu lingkungan, teknologi persampahan, pengelolaan *heritage*, dan tata kelola partisipatif.

2.9 Kerangka Permasalahan

Pengelolaan sampah di kawasan cagar budaya seperti Situs Kota Lama Semarang memiliki karakteristik permasalahan yang kompleks, multidimensi, dan saling berinteraksi. Kompleksitas ini muncul karena sistem persampahan eksisting harus berfungsi dalam ruang kota bersejarah yang padat aktivitas, terbatas secara fisik, dan diatur oleh regulasi konservasi. Kondisi tersebut berbeda secara signifikan dari kawasan perkotaan biasa, sehingga pendekatan konvensional—baik teknis maupun kelembagaan—sering kali tidak memadai (Montacchini et al., 2024; Martins & Cró, 2021).

Berdasarkan kajian literatur, studi empiris terdahulu, serta observasi langsung, dapat diidentifikasi bahwa permasalahan persampahan di Situs Kota Lama Semarang berakar pada lima sumber utama: keterbatasan teknis-operasional, dinamika sosial dan partisipasi publik, persyaratan pelestarian *heritage*, fragmentasi kelembagaan, dan minimnya pemanfaatan teknologi digital.

1. Permasalahan Teknis–Operasional

Keterbatasan ruang, jalan sempit, dan bangunan bersejarah menyebabkan sulitnya menyediakan TPS modern, jalur angkut yang fleksibel, dan tempat sampah

dengan kapasitas besar. Sistem rute pengangkutan masih bersifat statis dan tidak menyesuaikan fluktuasi wisata, sehingga timbunan sering melebihi kapasitas TS pada waktu puncak (Milasari et al., 2025; Iqbal et al., 2022). Permasalahan teknis ini memperkuat kebutuhan akan prediksi timbunan berbasis data (RF) dan optimasi rute (VRP).

2. Permasalahan Sosial: Partisipasi Publik Rendah dan Tidak Terdigitalisasi

Walaupun literatur menunjukkan bahwa partisipasi publik merupakan pilar pengelolaan lingkungan (Arnstein, 1969; Ansell & Gash, 2008), praktiknya di Kota Lama masih bersifat informal dan sporadis—melalui laporan lisan atau pesan pribadi.

Partisipasi dari pelaku usaha dan wisatawan bahkan lebih rendah, padahal kedua kelompok ini berkontribusi besar terhadap timbunan (Siwawa, 2025; Martins & Cró, 2021).

Ketiadaan kanal pelaporan digital yang terstandar menghambat keterhubungan antara publik dan institusi pengelola.

3. Permasalahan Budaya / *Heritage*

Sebagai kawasan cagar budaya, Kota Lama memiliki aturan ketat mengenai tampilan visual, keaslian arsitektur, dan integritas lanskap. Fasilitas persampahan konvensional sering dianggap mengganggu estetika kawasan, sehingga jumlah TS terbatas atau ditempatkan jauh dari jalur wisata. Hal ini menyebabkan sampah terkonsentrasi di ruang publik dan menimbulkan degradasi visual *heritage* (Montacchini et al., 2024).

Kondisi ini menuntut solusi teknologi dan desain yang tidak mengganggu estetika, termasuk kontainer tersembunyi, sensor tidak mencolok, dan rute angkut yang minimal mengganggu aktivitas wisata.

4. Permasalahan Kelembagaan dan Regulasi

Pengelolaan sampah di Kota Lama melibatkan berbagai pihak: DLH Kota Semarang, BPSKL, Dinas Kebudayaan dan Pariwisata, pelaku usaha, dan komunitas lokal. Namun belum tersedia SOP terpadu yang mengatur alur pengangkutan, standar pelaporan digital, pembagian peran, maupun integrasi data spasial (Sari et al., 2019). Kurangnya mekanisme koordinasi menyebabkan kebijakan sering berjalan sektoral, dan data antarinstansi tidak saling terbagi.

Hal ini berdampak pada lemahnya monitoring dan inkonsistensi penegakan aturan kebersihan di ruang *heritage*.

5. Permasalahan Teknologi: Minimnya Pemanfaatan AI–GIS–IoT

Meskipun teknologi seperti CNN, Random Forest, dan VRP telah terbukti meningkatkan efisiensi sistem persampahan di kota modern (Malik et al., 2023; Liang et al., 2021; Laporte, 2009; Ahmed et al., 2023), belum ada penerapannya pada situs *heritage* Indonesia. Demikian pula, GIS belum digunakan untuk menganalisis hotspot timbulah berdasarkan aktivitas wisata dan karakter ruang kota bersejarah.

Ketiadaan sistem digital berbasis data menyebabkan:

- rute angkut tidak optimal,
- kapasitas TS tidak dimonitor secara *real-time*,
- prediksi beban wisata tidak digunakan dalam perencanaan.

Integrasi AI–GIS diperlukan untuk merancang sistem adaptif yang selaras dengan kebutuhan pelestarian *heritage*.

Kerangka Permasalahan Terstruktur

Secara keseluruhan, berbagai masalah di atas dapat dikelompokkan ke dalam lima dimensi utama. Ringkasannya ditampilkan pada Tabel 11.

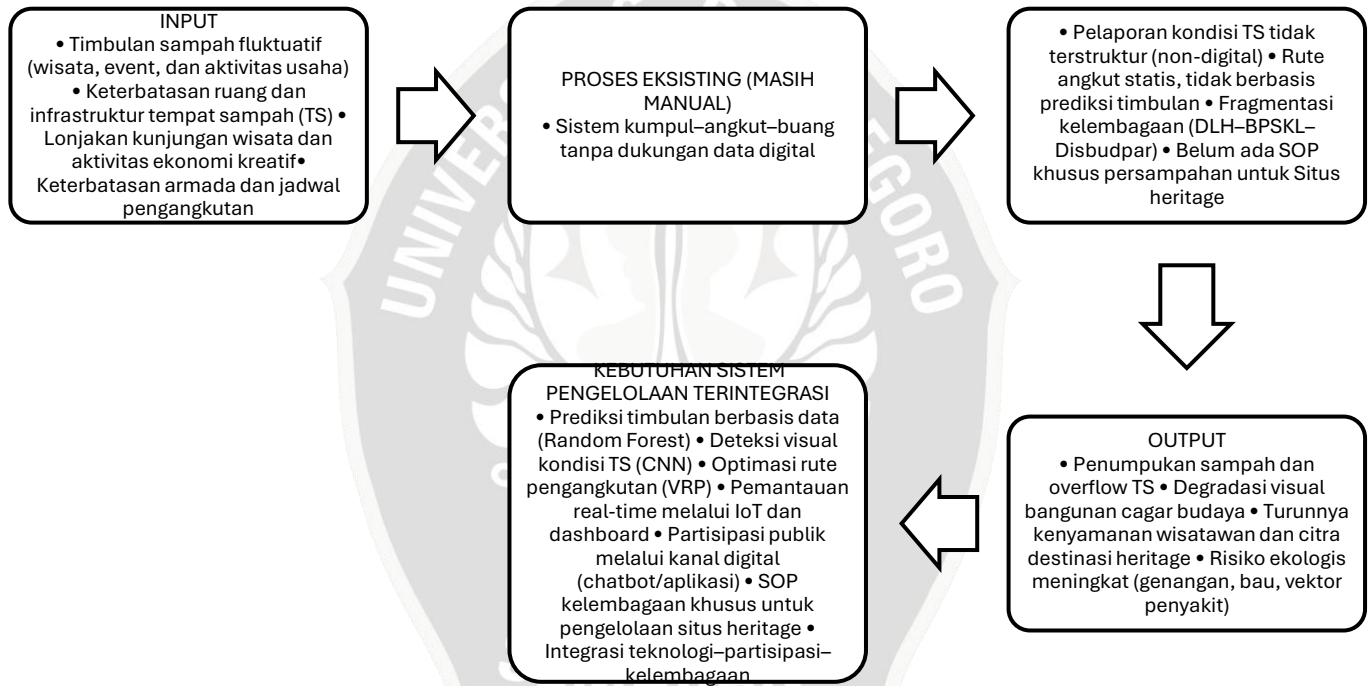
Tabel 11. Ringkasan Kerangka Permasalahan Pengelolaan Sampah di Situs *Heritage*

No	Dimensi	Permasalahan Utama	Implikasi	Referensi
1	Teknis– Operasional	Keterbatasan infrastruktur; rute statis; kapasitas TS kecil	Mebutuhkan prediksi timbulan (RF) dan optimasi rute (VRP)	Milasari et al. (2025); Iqbal et al. (2022)
2	Sosial	Partisipasi publik rendah, tidak terdigitalisasi	Perlu kanal pelaporan digital berbasis komunitas	Arnstein (1969); Siwawa (2025)
3	Budaya / <i>Heritage</i>	Fasilitas persampahan mengganggu estetika	Perlu desain ramah budaya dan sensor tersembunyi	Montacchini et al. (2024)
4	Kelembagaan	Fragmentasi instansi; koordinasi lemah	Diperlukan SOP terpadu dan berbasis data	Sari et al. (2019)
5	Teknologi	Minim pemanfaatan Big data, IoT, CNN, RF, GIS	Integrasi teknologi digital untuk efisiensi sistem	Ahmed et al. (2023); Medina-Medina et al. (2024)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Gambar 6 menjelaskan hubungan antara *input* (timbulan sampah, keterbatasan ruang, lonjakan wisata), *proses eksisting* yang masih manual, serta

output berupa penumpukan sampah dan degradasi visual *heritage*. Diagram ini juga menegaskan perlunya sistem prediktif-operasional berbasis teknologi dan partisipasi publik untuk memperbaiki alur pengelolaan.



Gambar 6. Kerangka Permasalahan Pengelolaan Sampah
Sumber: diolah peneliti, 2024

2.10 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian ini disusun untuk menggambarkan hubungan sistematis antara teori, variabel penelitian, metodologi analisis, serta tujuan penelitian yang ingin dicapai. Dalam penelitian ini, kerangka kerja dikembangkan melalui integrasi tiga domain utama:

1. Manajemen Lingkungan Perkotaan

Melalui pendekatan *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM) yang menekankan aspek teknis-operasional, sosial, kelembagaan, regulasi, dan finansial (Zurbrugg et al., 2012; Beck & Ferasso, 2023).

2. Teori Sosial dan Partisipasi Publik

Menggunakan teori *Ladder of Citizen Participation* (Arnstein, 1969), *Collaborative Governance* (Ansell & Gash, 2008), dan literatur partisipasi digital pada kota-kota bersejarah (Dong et al., 2023; Siwawa, 2025).

3. Teknologi Digital dan *Smart city*

Mencakup penggunaan GIS, Big Data Analytics, IoT, serta algoritma *machine learning* seperti *Convolutional Neural Network* (CNN), *Random Forest Regression* (RF), dan optimasi *Vehicle Routing Problem* (VRP) (Malik et al., 2023; Liang et al., 2021; Laporte, 2009; Hussain et al., 2024; Medina-Medina et al., 2024).

Ketiga domain tersebut terhubung dalam suatu kerangka integratif yang bertujuan menghasilkan model pengelolaan sampah yang adaptif, prediktif, partisipatif, dan sesuai dengan konteks pelestarian *heritage* di Situs Kota Lama Semarang.

a. Struktur Kerangka Penelitian

Penelitian ini berangkat dari lima pertanyaan riset utama yang diturunkan dari permasalahan inti:

- (1) analisis kondisi eksisting,
- (2) relevansi teknologi digital prediktif,
- (3) bentuk partisipasi publik digital,

(4) penyusunan model integratif, dan

(5) evaluasi keberlanjutan model melalui pengukuran keberlanjutan.

Untuk menjawab lima pertanyaan tersebut, kerangka penelitian ini menghubungkan:

A. Input Sistem

- Data timbulan sampah harian
- Citra visual tempat sampah (untuk CNN)
- Data spasial (GIS, koordinat TS, jaringan jalan)
- Data sosial publik (survei partisipasi)
- Data aktivitas usaha dan wisata
- Konsumsi BBM armada (untuk CO₂e)

B. Proses Analitik

- Analisis GIS: spatial hotspot, overlay zona *heritage*, dense mapping (Gutama & Iresha, 2023).
- Analisis AI (CNN–RF): CNN untuk klasifikasi kondisi visual TS (Malik et al., 2023) dan RF untuk prediksi timbulan berdasarkan pola wisata, jenis usaha, dan cuaca (Liang et al., 2021).
- Optimasi VRP: rute optimal untuk armada DLH; mengurangi jarak, waktu, dan konsumsi BBM (Laporte, 2009; Iqbal et al., 2022).
- Perhitungan Emisi CO₂e: metode IPCC 2006/2019 untuk sektor transportasi berbasis faktor emisi BBM (IPCC, 2019; Kementerian ESDM, 2023).

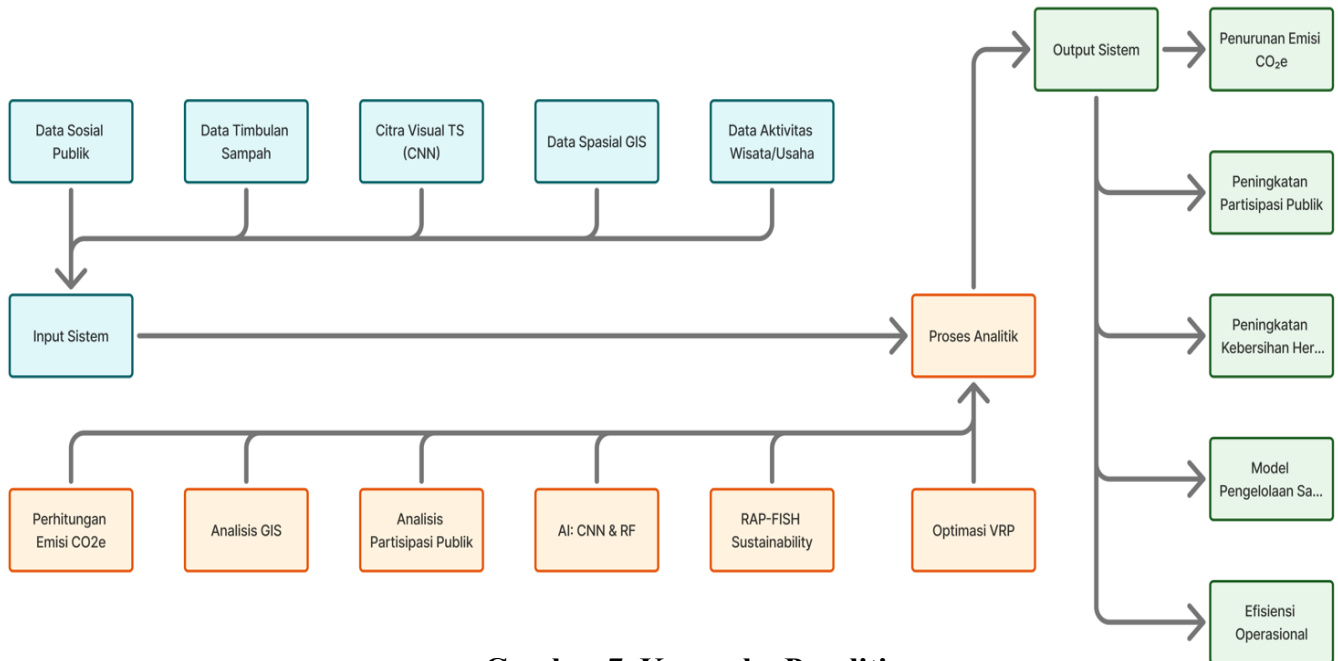
- Partisipasi Publik Digital: pemodelan pelaporan publik (*civic-tech*) berdasarkan teori Arnstein & literatur digital participation (Buntaine et al., 2021; Cárdenas-León et al., 2024).
- Sustainability Assessment (RAP-FISH / RAP-WASTE): dimensi teknis, sosial, kelembagaan, lingkungan, dan *heritage conservation* (Pitcher & Preikshot, 2001; Fauzi & Anna, 2002).

C. Output Sistem

- Model Pengelolaan Sampah Berkelanjutan di Situs Kota Lama Semarang
- Efisiensi operasional (waktu, jarak, biaya)
- Penurunan emisi CO₂e
- Peningkatan partisipasi public
- Peningkatan kondisi kebersihan *heritage*
- Indeks keberlanjutan (RAP-FISH)

SEKOLAH PASCASARJANA

Gambar 7 menggambarkan alur logis penelitian mulai dari sumber data, tahapan analisis, hingga keluaran sistem yang digunakan dalam penyusunan Model Pengelolaan Sampah Berkelanjutan di Lingkungan Situs Kota Lama Semarang.



Gambar 7. Kerangka Penelitian
Sumber: Sintesis literatur, diolah peneliti (2025)

Gambar 7 menegaskan hubungan keterkaitan antara domain teoritis, variabel penelitian, serta metode analitik yang digunakan untuk menjawab tujuan penelitian secara terstruktur.

Tabel 12. Variabel Penelitian dan Definisi Operasional

No	Dimensi	Variabel Utama	Definisi Operasional	Indikator	Referensi
1	Teknologi AI	Akurasi CNN	Tingkat keberhasilan CNN dalam mengklasifikasi kondisi TS	Akurasi (%), precision, recall, F1-score	Malik et al. (2023); LeCun et al. (2015)

No	Dimensi	Variabel Utama	Definisi Operasional	Indikator	Referensi
2	Teknologi – AI	Error Prediksi RF	Tingkat kesalahan model RF dalam memprediksi timbulan	MAE, RMSE, R ²	Liang et al. (2021)
3	Teknologi – GIS	Spatial Fit <i>Heritage</i>	Kesesuaian lokasi dengan zona <i>heritage</i>	Overlay GIS, indeks kedekatan	Martins & Cró (2021); Gutama & Iresha (2023)
4	Teknologi – Optimasi	Efisiensi VRP	Efisiensi rute angkut hasil optimasi VRP	Jarak tempuh, durasi, konsumsi BBM	Laporte (2009); Iqbal et al. (2022)
5	Lingkungan – Emisi	Emisi CO ₂ e Pengangkutan	Besaran emisi CO ₂ e dari pengangkutan sampah	Faktor emisi IPCC, liter BBM, km/jam	IPCC (2019); KESDM (2023)
6	Sosial–Partisipasi	Intensitas Pelaporan Digital	Tingkat laporan publik melalui kanal digital	Jumlah laporan, frekuensi bulanan	Buntaine et al. (2021); Siwawa (2025)
7	Sosial–Partisipasi	Tingkat Keterlibatan Publik	Proporsi publik yang berpartisipasi aktif	% pengguna aktif	Arnstein (1969); Dong et al. (2023)
8	Kelembagaan	Dukungan Regulasi	Ketersediaan kebijakan dan SOP pendukung	Jumlah SOP, tingkat implementasi	Sari et al. (2019)
9	Finansial	Efisiensi Biaya Operasional	Penghematan biaya angkut	% penghematan rerata biaya	Ahmed et al. (2023)

No	Dimensi	Variabel Utama	Definisi Operasional	Indikator	Referensi
			sampah pasca optimasi VRP		
10	<i>Heritage</i>	Indeks Kebersihan Kawasan <i>Heritage</i>	Tingkat kebersihan ruang publik berdasarkan observasi dan survei	Skor observasi, rating persepsi publik	Montacchini et al. (2024)
11	Sustainability	Indeks Keberlanjutan RAP-FISH	Nilai keberlanjutan sistem persampahan	Ordinasi dimensi A–F	Pitcher & Preikshot (2001); Fauzi & Anna (2002)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Kerangka penelitian ini berfungsi sebagai alur logis yang menghubungkan teori, variabel, dan metode. Analisis eksisting (Tujuan 1) memberikan dasar bagi pemilihan teknologi digital (Tujuan 2). Temuan sosial dan pola partisipasi publik (Tujuan 3) digunakan untuk mendesain model integratif berbasis AI–GIS–VRP–partisipasi digital (Tujuan 4). Selanjutnya, kinerja model dievaluasi melalui simulasi efisiensi teknis, emisi CO_{2e}, dan indeks keberlanjutan RAP-FISH (Tujuan 5). Kerangka ini memastikan bahwa keseluruhan penelitian bergerak pada jalur yang konsisten dan mengikuti pedoman ilmiah UNDIP untuk penyusunan disertasi.

2.11 Kisi-Kisi Penelitian

Kisi-kisi penelitian berfungsi sebagai matriks konseptual yang menghubungkan teori, fokus analisis, variabel penelitian, metode pengumpulan data, serta hasil yang diharapkan. Penyusunan kisi-kisi ini penting untuk

memastikan konsistensi antara kerangka teori (Bab II), kerangka konseptual (Bab III), serta desain metodologi (Bab IV), sehingga seluruh komponen penelitian bergerak pada alur ilmiah yang terstruktur.

Dalam konteks Situs Kota Lama Semarang, kisi-kisi ini mencakup integrasi teori ISWM, partisipasi publik, *smart city*, teknologi digital prediktif (CNN–RF), GIS, optimasi rute VRP, perhitungan emisi CO₂e (IPCC), kelembagaan kolaboratif, dan keberlanjutan sistem persampahan (RAP-FISH). Tabel 13 menampilkan kisi-kisi penelitian secara lengkap.

Tabel 13. Kisi-Kisi Penelitian

No	Teori/ Landasan	Fokus Analisis	Variabel Utama	Metode Pengumpulan Data	Hasil yang Diharapkan	Referensi
1	ISWM (<i>Integrated Sustainable Waste Management</i>)	Analisis kondisi eksisting sistem persampahan	Aspek teknis-operasional, kelembagaan, finansial, regulasi	Observasi lapangan, wawancara, analisis dokumen	Pemahaman komprehensif mengenai efektivitas sistem eksisting	Zurbrugg et al. (2012); Beck & Ferasso (2023)
2	<i>Urban Heritage Studies</i>	Kesesuaian pengelolaan sampah dengan konservasi visual dan budaya	Indeks Kebersihan <i>Heritage</i>	Observasi visual, survei	Identifikasi dampak sampah terhadap integritas visual <i>heritage</i>	Montacchini et al. (2024); Martins & Cró (2021)
3	GIS & <i>Spatial Modelling</i>	Distribusi ruang, pola timbulan, dan	Spatial Density, Overlay <i>Heritage</i>	Data GIS, GPS, pemetaan lokasi TS	Peta GIS berbasis hotspot dan zona	Gutama & Iresha (2023)

No	Teori/ Landasan	Fokus Analisis	Variabel Utama	Metode Pengumpulan Data	Hasil yang Diharapkan	Referensi
		relasi dengan zona <i>heritage</i>			perlindungan <i>heritage</i>	
4	<i>Machine learning</i> (CNN)	Deteksi visual kondisi tempat sampah	Akurasi CNN	Dataset citra, labeling citra, training & testing	Model CNN dengan akurasi tinggi untuk klasifikasi kondisi TS	Malik et al. (2023); LeCun et al. (2015)
5	<i>Machine learning</i> (<i>Random Forest Regression</i>)	Prediksi timbulan berdasarkan aktivitas wisata, jenis usaha, dan cuaca	MAE, RMSE, R ²	Dataset timbulan, data sosial-ekonomi	Prediksi timbulan adaptif untuk rute angkut	Liang et al. (2021); Ahmed et al. (2023)
6	<i>Operation Research</i> – VRP	Optimasi rute pengangkutan sampah	Efisiensi Rute (jarak, waktu, biaya)	Data rute eksisting, kapasitas armada, lokasi TS	Model VRP untuk peningkatan efisiensi operasional	Laporte (2009); Iqbal et al. (2022)
7	IPCC 2006/2019 <i>Guidelines</i>	Perhitungan emisi pengangkutan sampah	Emisi CO _{2e} (transport sector)	Data konsumsi BBM harian, jarak tempuh	Nilai CO _{2e} untuk skenario eksisting vs model optimal	IPCC (2019); KESDM (2023)
8	<i>Arnstein's Ladder</i> & <i>Digital Participation</i>	Efektivitas partisipasi publik digital	tingkat keterlibatan publik	Survei, wawancara	Model partisipasi publik digital multisegmen	Arnstein (1969); Dong et al. (2023);

No	Teori/ Landasan	Fokus Analisis	Variabel Utama	Metode Pengumpulan Data	Hasil yang Diharapkan	Referensi
					(warga– usaha– wisatawan)	Cárdenas- León et al. (2024)
9	<i>Collaborative Governance</i>	Kelembagaan dan koordinasi lintas instansi	Dukungan regulasi, SOP integratif	Wawancara kelembagaan, analisis dokumen	Usulan SOP persampahan <i>heritage</i> berbasis data	Ansell & Gash (2008); Sari et al. (2019)
10	Smart city Framework	Integrasi digital untuk pengelolaan lingkungan	IoT readiness, digital reporting	Observasi infrastruktur, studi kelayakan digital	Rekomendasi sistem persampahan digital yang adaptif	Chourabi et al. (2012)
11	<i>Sustainability Assessment</i> (RAP-FISH / RAP- WASTE)	Penilaian keberlanjutan sistem persampahan	Dimensi A–F (teknis, sosial, kelembagaan, finansial, lingkungan, <i>heritage</i>)	Data kuantitatif dan kualitatif pada setiap atribut	Indeks keberlanjutan sistem persampahan <i>heritage</i>	Pitcher & Preikshot (2001); Fauzi & Anna (2002)
12	<i>Cost–Benefit & Environmental Efficiency</i>	Evaluasi performa model final	Efisiensi biaya dan peningkatan kualitas lingkungan	Analisis finansial & CO ₂ e	Bukti kuantitatif efektivitas model integratif	Ahmed et al. (2023); IPCC (2019)

Sumber: sintesis literatur, diolah peneliti (2024)

Kisi-kisi penelitian ini memastikan bahwa seluruh komponen penelitian bergerak secara selaras mulai dari:

1. Teori → kerangka konseptual (Bab III)
2. Kerangka konseptual → metode penelitian (Bab IV)

3. Metode → hasil analisis (Bab V)
4. Hasil → model final dan kebijakan (Bab VI)

Pendekatan penelitian ini bersifat *mixed-methods explanatory*, di mana hasil kuantitatif (AI, GIS, VRP, CO₂e, RAP-FISH) digunakan untuk memperkuat temuan kualitatif mengenai aspek sosial, *heritage*, dan kelembagaan.



SEKOLAH PASCASARJANA