

Kajian *Integrated Waste Management*: Strategi Mitigasi Emisi Karbon dan Polusi Lingkungan

Darwis Baso¹⁾*

¹⁾ Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Muslim Indonesia, Makassar

*Email: darwisbs@gmail.com

Abstrak

Peningkatan timbunan sampah dan tekanan lingkungan perkotaan menyebabkan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon dan berbagai bentuk polusi, sehingga diperlukan strategi pengelolaan yang lebih terpadu dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menilai mitigasi emisi karbon melalui penerapan *Integrated Waste Management* (IWM) dan teknologi *Waste-to-Energy* (WtE), serta mengevaluasi efektivitas IWM dalam mengurangi polusi lingkungan. Kajian ini dilakukan menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap artikel *peer-reviewed* terbit tahun 2021-2025, yang dipilih berdasarkan kriteria inklusi-eksklusi untuk menjamin relevansi ilmiah dan metodologis. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan IWM yang mencakup reduksi sumber, pemilahan, daur ulang, komposting, dan pemanfaatan residu melalui WtE mampu secara signifikan menurunkan emisi karbon. Mekanisme mitigasi ini terjadi melalui minimisasi pembuangan ke TPA optimalisasi pemulihan material, dan substitusi energi fosil melalui konversi residu non-daur ulang menjadi energi rendah karbon. Selain itu, efektivitas IWM terbukti dalam mengurangi polusi udara, lindi, dan pencemar sekunder dengan menekan pembakaran terbuka serta pembuangan residu tidak terolah. Integrasi IWM-WtE, termasuk penerapan teknologi seperti gasifikasi, pyrolysis berbasis biochar, dan insinerasi dengan *carbon capture*, memperkuat potensi mitigasi dan pengendalian polusi. Temuan ini menegaskan bahwa sinergi IWM dan WtE merupakan strategi holistik yang mampu secara simultan menekan emisi karbon dan polusi lingkungan. Sehingga menjadi pendekatan penting dalam mewujudkan sistem pengelolaan sampah yang rendah emisi dan berkelanjutan.

Kata kunci: emisi karbon; *integrated waste management*; strategi mitigasi; *waste-to-energy*

Abstract

The increasing volume of solid waste and escalating pressures in urban environments have significantly contributed to carbon emissions and various forms of pollution, thereby necessitating more integrated and sustainable waste management strategies. This study aims to assess carbon emission mitigation through the implementation of Integrated Waste Management (IWM) and Waste-to-Energy (WtE) technologies, as well as to evaluate the effectiveness of IWM in reducing environmental pollution. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted using peer-reviewed articles published between 2021 and 2025, selected through rigorous inclusion exclusion criteria to ensure scientific and methodological relevance. The findings indicate that IWM practices encompassing source reduction, segregation, recycling, composting, and residual treatment through WtE can significantly reduce carbon emissions. This mitigation is achieved through minimizing landfill disposal, optimizing material recovery, and substituting fossil-based energy by converting non-recyclable residues into low-carbon energy. Additionally, IWM proves effective in reducing air pollution, leachate formation, and secondary contaminants by limiting open burning and the disposal of untreated waste. The integration of IWM and WtE, including technologies such as gasification, biochar-based pyrolysis, and incineration equipped with carbon capture, further enhances mitigation potential and pollution control. These findings confirm that the synergy between IWM and WtE constitutes a holistic strategy capable of simultaneously reducing carbon emissions and environmental pollution, making it a crucial approach for achieving low-emission and sustainable waste management systems.

Keywords: carbon emissions, *integrated waste management*, mitigation strategies, *waste-to-energy*

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang pesat menjadi faktor utama meningkatnya timbulan sampah perkotaan (*Municipal Solid Waste/MSW*). Secara global, timbulan sampah meningkat dari sekitar 0,64 miliar ton per tahun pada 1970 menjadi lebih dari 2 miliar ton pada 2019 (Maalouf & Agamuthu, 2023). Menurut laporan *World Bank*, timbulan MSW global meningkat dari 2,01 miliar ton pada 2016 menjadi 3,40 miliar ton per tahun pada 2050 (Chuenwong *et al.*, 2022). Peningkatan ini dipicu oleh perubahan gaya hidup, pola konsumsi, dan industrialisasi yang memperberat beban pengelolaan lingkungan (Ahmed *et al.*, 2024). Kondisi ini menegaskan perlunya sistem pengelolaan sampah berkelanjutan untuk menekan tekanan lingkungan perkotaan.

Integrated Waste Management (IWM) menjadi pendekatan strategis dalam memitigasi dampak lingkungan dari sistem pengelolaan sampah yang masih didominasi tempat pembuangan sampah (Rasheed *et al.*, 2021). IWM menggabungkan prediksi timbulan, pemantauan *real-time*, pemilahan sejak sumber, serta pembuangan terotomatisasi guna meningkatkan efisiensi pengelolaan (Atofarati *et al.*, 2025). Sistem tempat pembuangan sampah konvensional memicu emisi metana (CH_4), pencemaran lindi, dan risiko kesehatan masyarakat (Abedi *et al.*, 2023).

Sementara peningkatan volume sampah akibat urbanisasi mempercepat emisi gas rumah kaca (GRK) dan memperburuk pencemaran (Hajam *et al.*, 2023). Studi menunjukkan bahwa skenario pengelolaan dengan mereduksi emisi sebesar 156% dibandingkan skenario *business-as-usual* (BAU). Dengan menggunakan pendekatan *net accounting* berbasis *system expansion* (*net avoided emissions*) dalam kerangka *Life Cycle Assessment* (LCA) *cradle-to-grave*, yang memasukkan kredit emisi dari substitusi energi dan pemulihan material. Nilai >100% menunjukkan bahwa emisi yang dihindari di luar sistem pengelolaan sampah melebihi emisi yang dihasilkan di dalam sistem (Harfadli *et al.*, 2025).

Upaya penerapan konsep *Integrated Sustainable Waste Management* (ISWM) melalui strategi 3R, bank sampah komunitas, dan regulasi pendukung telah diterapkan di berbagai negara. Namun, tantangan seperti keterbatasan pendanaan, rendahnya partisipasi publik, serta pengelolaan tempat pembuangan sampah (TPA) yang belum efisien masih menjadi hambatan (Handini, 2022). IWM sangat terkait dengan konsep *circular economy* dan penggunaan teknologi *Waste-to-Energy* (WtE), komposting, serta digitalisasi sistem pengelolaan (Almansour & Akrami, 2024). WtE berperan penting dalam mengurangi volume sampah,

menurunkan emisi metana, dan menyediakan energi pengganti bahan bakar fosil (Abedin *et al.*, 2025).

Evaluasi melalui LCA dan *prospective* LCA (pLCA) membantu menilai dampak berbagai teknologi pengelolaan seperti insinerator, sistem biogas, dan daur ulang (Sacchi *et al.*, 2022). Integrasi teknologi digital seperti IoT, *blockchain*, dan *big data* juga memperkuat pengambilan keputusan. Selain itu, meningkatnya perhatian terhadap konstruksi berkelanjutan mendorong adopsi praktik bangunan hijau yang berkontribusi pada efisiensi sumber daya (Masri *et al.*, 2024). Pengelolaan sampah berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui penerapan 3R, komposting, dan teknologi WtE yang dapat menurunkan emisi karbon serta polusi udara (Chen *et al.*, 2023; Ofremu *et al.*, 2025). *Circular economy* (CE) dan pendekatan *zero-waste* memberikan arah jangka panjang menuju sistem pengelolaan sampah yang minim limbah dan rendah karbon (Sund *et al.*, 2025).

Meskipun banyak penelitian terkait pengelolaan sampah, sebagian besar masih bersifat parsial dan berfokus pada teknologi atau kebijakan tertentu. Hal ini menciptakan kesenjangan dalam evaluasi komprehensif efektivitas IWM dalam menurunkan emisi, polusi, dan meningkatkan efisiensi sumber daya. Oleh karena itu, penelitian ini menyajikan sintesis literatur tahun 2021-2025 dengan mengkaji peran IWM dan WtE dalam mitigasi dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menilai mitigasi emisi karbon melalui penerapan IWM dan teknologi WtE; dan (2) mengevaluasi efektivitas IWM dalam mengurangi polusi lingkungan.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Desain penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi dan mensintesis bukti ilmiah terkait efektivitas IWM dalam mitigasi dampak lingkungan. Metode ini dipilih karena menyediakan kerangka analisis yang terstruktur dan dapat direplikasi (Akl *et al.*, 2024).

2.2 Protokol dan standar

Protokol dan standar mengikuti pedoman PRISMA 2020 dan LSR untuk memastikan transparansi dan replikasi hasil (Akl *et al.*, 2024; Martinez *et al.*, 2024) mencakup kriteria inklusi dan eksklusi, strategi pencarian literature, *screening* dan seleksi, ekstraksi data, *quality appraisal* dan karakteristik studi.

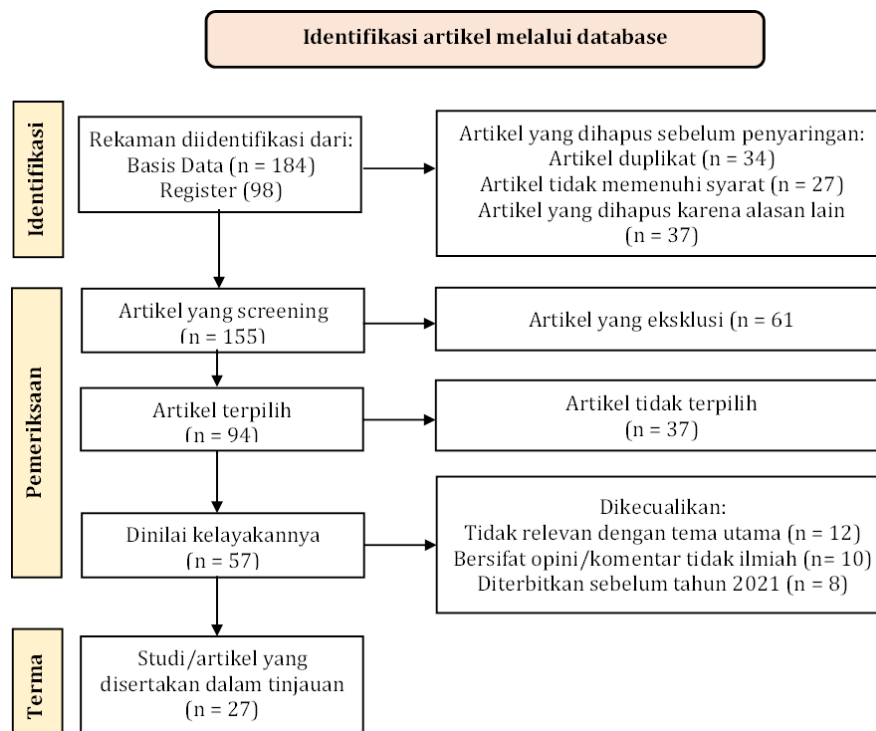
2.3 Database dan strategi pencarian

Literatur untuk penelitian ini dicari dari beberapa database bereputasi, yaitu *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Google Scholar*, dan Garuda. Dengan periode pencarian tanggal 3-17 November 2025. Strategi pencarian diformulasikan menggunakan kombinasi operator Boolean, yakni "*integrated waste management*" OR "*IWM*" AND "*waste to energy*" OR "*WtE*" AND "*carbon emission*" OR "*green house gas*" OR "*environmental pollution*".

Setelah pencarian awal, dilakukan deduplikasi dengan mengekspor seluruh artikel ke format RIS dan menggabungkannya dalam *Mendeley*. Duplikasi diidentifikasi berdasarkan judul, penulis, dan tahun publikasi. Kemudian diverifikasi secara manual untuk memastikan tidak terjadi penghapusan studi berbeda. Artikel duplikat dihapus hingga diperoleh basis data artikel unik, dan seluruh proses didokumentasikan untuk penyusunan diagram PRISMA.

2.4 Screening dan eksklusi Full-Text

Setelah deduplikasi, artikel diseleksi melalui screening judul dan abstrak oleh dua reviewer independen; konflik diselesaikan oleh reviewer ketiga. Artikel yang lolos tahap ini dievaluasi *full-text* dan dieksklusi jika tidak relevan, tidak tersedia *full-text*, berupa editorial/opini, fokus pada konteks non-MSW, atau tidak menggunakan metode empiris. Eksklusi dicatat secara sistematis untuk menjamin transparansi proses seleksi. Proses seleksi secara keseluruhan diilustrasikan dalam Diagram Alur PRISMA pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram tinjauan sistematis -PRISMA

Berdasarkan proses pencarian sistematis dari beberapa database bereputasi, sebanyak 27 studi memenuhi kriteria inklusi. Studi-studi tersebut kemudian dipilih sebagai studi akhir yang menjadi dasar untuk sintesis dan analisis lebih lanjut. Literatur ini mewakili kajian terkini yang relevan dengan topik penelitian dan mendukung penarikan kesimpulan yang komprehensif

2.5 Penilaian kualitas/risiko bias

Setiap studi yang lolos *full-text* dinilai kualitasnya menggunakan adaptasi *checklists Joanna Briggs Institute* (JBI), mencakup validitas metode, kecukupan data, kejelasan outcome (emisi karbon, polusi, efisiensi energi), kesesuaian konteks, dan potensi bias publikasi. Dua reviewer menilai secara independen, konflik diselesaikan *reviewer* ketiga. Skor dikategorikan: tinggi ($\geq 80\%$), sedang (60-79%), dan rendah ($< 60\%$). Studi kualitas rendah tetap dicatat sebagai risiko bias tinggi namun tetap digunakan dalam sintesis naratif.

2.6 Ekstraksi data dan tabel karakteristik studi

Data dari studi yang memenuhi kriteria inklusi diekstraksi ke dalam tabel karakteristik studi. Tabel 1 menyajikan analisis sistematis efektivitas IWM dan WtE dalam mitigasi emisi karbon dan pengendalian polusi lingkungan.

Tabel 1. Karakteristik 27 studi pengelolaan limbah, IWM, dan WtE

No	Penulis & Tahun	Lokasi	Jenis Teknologi/IWM	Metrik / Indikator	Temuan Utama	Quality Score
1	Abedi <i>et al.</i> , 2023	Iran	Landfill, Biogas	Emisi CH ₄ , COD, Biogas rate	Mitigasi karbon , efisiensi pengolahan leachate	Tinggi
2	Abedin <i>et al.</i> , 2025	AS, Eropa, Asia	Energi recovery dari limbah padat	Energi listrik, Emisi CO ₂	WtE meningkatkan <i>recovery energi</i> & mengurangi beban karbon	Tinggi
3	Ahmed <i>et al.</i> , 2024	India, UAE, Singapura	AI & IoT untuk pengelolaan limbah	Efisiensi pengumpulan, pengurangan sampah	Digitalisasi meningkatkan efektivitas IWM dan partisipasi publik	Tinggi
4	Almansour & Akrami, 2024	UAE, AS, Jepang, Swedia	Kebijakan zero waste / IWM	Reduksi limbah, compliance	Kebijakan nasional penting untuk pengurangan limbah & emisi	Tinggi
5	Anokye <i>et al.</i> , 2024	Ghana	Open dumping / burning	Polusi udara (PM, CO), kesehatan	Open burning berdampak signifikan terhadap polusi & kesehatan; IWM direkomendasikan	Tinggi
6	Atofarati <i>et al.</i> , 2025	Nigeria,	Smart waste management	Pengumpulan limbah, partisipasi publik	Solusi digital & <i>smart collection</i> meningkatkan pengelolaan limbah kota	Tinggi
7	Bjelić <i>et al.</i> , 2024	Serbia, Bosnia	WtE (incineration, bioenergy)	Emisi CO ₂ , energi terbarukan	WtE dapat mengurangi emisi dan mendukung <i>circular economy</i>	Tinggi

No	Penulis & Tahun	Lokasi	Jenis Teknologi/IWM	Metrik / Indikator	Temuan Utama	Quality Score
8	Ceraso & Cesaro, 2024	Global	LCSA pada MSW	LCA, <i>cost-benefit, sustainability</i>	LCSA menunjukkan IWM/WtE paling efisien untuk keberlanjutan lingkungan	Tinggi
9	Chen <i>et al.</i> , 2023	China	<i>Renewable energy, WtE</i>	Emisi CO ₂ , kualitas udara	Integrasi energi terbarukan & WtE mengurangi polusi udara dan emisi karbon	Tinggi
10	Fan <i>et al.</i> , 2022	China	<i>Forecasting plastik & intervensi</i>	Proyeksi limbah, risiko lingkungan	Prediksi dan strategi mitigasi penting untuk pengelolaan plastik berkelanjutan	Tinggi
11	Chuenwong <i>et al.</i> , 2022	Thailand	Pengelolaan MSW	Proyeksi emisi GRK dari sektor MSW hingga 2030	<i>On-site waste sorting</i> terbukti pengurangan GRK	Tinggi
12	Hajam <i>et al.</i> , 2023	India	<i>Vermi-transformation</i>	Reduksi organik, GHG	<i>Vermi-composting</i> mengurangi limbah organik & emisi metana	Tinggi
13	Handini, 2022	Indonesia	<i>Household IWM</i>	Pengurangan sampah rumah tangga	<i>Integrated SWM</i> meningkatkan pengelolaan limbah rumah tangga	Tinggi
14	Harfadli <i>et al.</i> , 2025	Indonesia	<i>MSW scenario analysis</i>	Emisi CO ₂ , air, tanah	Evaluasi skenario IWM menunjukkan prioritas pengurangan emisi & polusi	Tinggi
15	Jamilatun <i>et al.</i> , 2023	Indonesia	WtE MSW	Emisi CO ₂ , energi listrik	Teknologi WtE menurunkan emisi, efisiensi energi	Tinggi
16	Lisbona <i>et al.</i> , 2023	Spanyol	WtE	Emisi, energi listrik	Tren global WtE menunjukkan pengurangan emisi & potensi energi signifikan	Tinggi
17	Masri <i>et al.</i> , 2024	Indonesia	<i>Green building, IWM</i>	<i>Energy use</i> , emisi CO ₂	<i>Green building & IWM</i> mengurangi jejak karbon kantor	Tinggi
18	Materazzi <i>et al.</i> , 2024	Eropa	WtE, WtH, CCS	Emisi CO ₂ , LCA	<i>Carbon-negative treatment</i> tercapai melalui integrasi CCS dan WtE	Tinggi
29	Ofremu <i>et al.</i> , 2025	Nigeria	<i>Climate change & waste</i>	Emisi, polusi udara, kesehatan	IWM & mitigasi adaptif untuk kesehatan	Tinggi
20	Maalouf & Agamuthu, 2023	Afrika	<i>Material flow analysis</i>	Tren MSW, <i>material flow analysis</i>	<i>Integrated SWM</i> fokus pada kebijakan, ekonomi sirkular, pemisahan limbah	Sedang
21	Rasheed <i>et al.</i> , 2021	Pakistan	COVID-19 & SWM	Emisi, sosial-ekonomi	Pandemi memperburuk dampak limbah; strategi IWM adaptif	Sedang
22	Sacchi <i>et al.</i> , 2022	Swiss, Jerman, Belanda	LCA <i>prospective</i> (PREMISE)	CO ₂ , energi	Database LCA membantu evaluasi dampak masa depan IWM/WtE	Tinggi
23	Santosa <i>et al.</i> , 2025	Indonesia	<i>Gas Turbine Generator</i>	Emisi CO ₂ , LCA	Unit GPF pengurangan emisi, optimasi energi	Tinggi

No	Penulis & Tahun	Lokasi	Jenis Teknologi/IWM	Metrik / Indikator	Temuan Utama	Quality Score
24	Soni <i>et al.</i> , 2025	India	WtE technologies	Emisi CO ₂ , <i>resource recovery</i>	Teknologi WtE mendukung <i>recovery</i> material & mitigasi emisi karbon	Tinggi
25	Sund <i>et al.</i> , 2025	Uni Eropa	EU waste management	Cost, emisi CO ₂	<i>Assessment</i> sistemik menunjukkan efisiensi ekonomi & lingkungan optimal	Tinggi
26	Syafrudin <i>et al.</i> , 2021	Indonesia	Integrated SWM	Emisi GHG, pengelolaan limbah	Integrasi IWM menurunkan emisi GRH kota secara signifikan	Tinggi
27	Xiao <i>et al.</i> , 2023	China	Public participation in waste separation	Partisipasi publik, pengurangan limbah	Partisipasi publik mendukung keberhasilan IWM dan pengurangan polusi	Tinggi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Gambaran Umum Temuan Tinjauan

Tinjauan sistematis terhadap 27 artikel terbitan 2021-2025 menunjukkan meningkatnya perhatian global terhadap pengelolaan sampah terpadu (IWM) dan penerapan prinsip ekonomi sirkular. Studi-studi tersebut menyoroti tantangan berkelanjutan seperti kesenjangan infrastruktur, keterbatasan teknologi, dan rendahnya efektivitas kebijakan. Beberapa literatur menegaskan bahwa pengelolaan sampah kini dipahami sebagai sistem multidimensional yang mencakup aspek lingkungan, sosial, ekonomi, dan teknologi.

Hasil telaah menunjukkan bahwa penelitian terkait IWM dalam mitigasi dampak lingkungan terdapat beberapa tematik utama. Pertama, mitigasi emisi karbon melalui IWM dan WtE, yang menyoroti kontribusi insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi dalam menurunkan emisi GRK serta mengurangi ketergantungan pada TPA. Kedua, efektivitas IWM dalam pengurangan polusi dan volume limbah, yang menekankan peran pemilahan sejak sumber, partisipasi masyarakat, teknologi pemrosesan lanjutan, serta penerapan LCA dalam meminimalkan polusi udara, air, dan tanah.

Kedua tema utama ini memberikan gambaran holistik mengenai arah penelitian IWM. Temuan tersebut menunjukkan adanya pergeseran dari pendekatan berbasis teknologi tunggal menuju sistem pengelolaan yang lebih terintegrasi, menghubungkan inovasi teknologi, tata kelola, ekonomi sirkular, dan partisipasi publik. Pendekatan multidimensional ini menjadi dasar penting dalam pengembangan strategi pengelolaan sampah perkotaan yang berkelanjutan dan beremisi rendah.

3.2 Mitigasi emisi karbon melalui *Integrated Waste Management* dan teknologi *Waste-to-Energy*

Literatur menunjukkan bahwa penerapan IWM secara sistematis berkontribusi signifikan terhadap mitigasi emisi karbon melalui pengurangan sampah dari sumbernya, pemilahan, daur ulang, serta konversi energi yang lebih optimal (Syafudin *et al.*, 2021). Pendekatan IWM berbasis ekonomi sirkular terbukti mampu menurunkan emisi GRK sekaligus meningkatkan efisiensi energi (Abedi *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2022; Mahmud *et al.*, 2023). *Anaerobic digestion* dan resirkulasi lindi berpotensi menurunkan emisi metana dan meningkatkan degradasi bahan organik dibandingkan penimbunan konvensional, dengan kinerja yang bergantung pada karakteristik limbah dan kondisi operasional sistem (Abedi *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2022).

Secara teknologi, *waste-to-energy* (WtE) berkontribusi signifikan terhadap mitigasi karbon melalui substitusi energi fosil. Penilaian dilakukan menggunakan LCA dengan batas sistem *cradle-to-grave* dan pendekatan *system expansion*, hasil yang dilaporkan merupakan *net avoided emissions*. Analisis mencakup proses insinerasi WtE dengan pemulihan energi, pemulihan logam, pengelolaan residu, serta penghindaran landfill dan substitusi listrik sesuai *grid mix*. Dengan pendekatan ini, WtE dilaporkan mampu mengurangi emisi GRK sekitar 500-700 kg CO₂e per ton MSW (*as-received*), yang dipengaruhi oleh komposisi limbah, efisiensi sistem, *grid mix*, dan tingkat pemulihan logam, serta berpotensi meningkat dengan penerapan teknologi *carbon capture and storage* (CCS) dalam skenario transisi menuju *net-zero emissions* (Materazzi *et al.*, 2024).

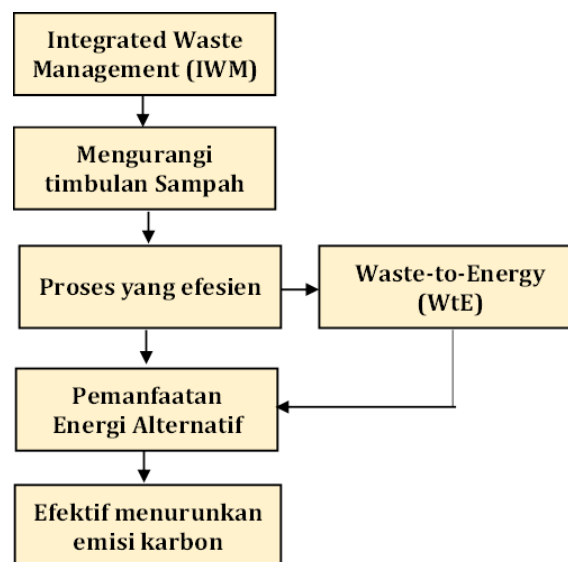
Sistem insinerasi *fluidized bed* dan WtE berbasis gasifikasi juga terbukti menurunkan emisi siklus hidup dibandingkan teknologi termal konvensional (Chen *et al.*, 2023). *Pyrolysis* dan gasifikasi menawarkan potensi dekarbonisasi tambahan: *pyrolysis* menghasilkan jejak karbon lebih rendah dan *biochar* sebagai penyerap karbon, sementara gasifikasi mengonversi sampah menjadi *syngas* untuk energi rendah karbon (Bjelić *et al.*, 2024; Jamilatun *et al.*, 2023).

Sistem WtE hibrida yang menggabungkan proses biologis dan termokimia dilaporkan berpotensi meningkatkan pemulihan energi dan mengurangi emisi GRK jika dibandingkan dengan sistem konvensional, tergantung pada konfigurasi proses dan asumsi LCA yang digunakan (Soni *et al.*, 2025). Pada saat yang sama, emisi CO₂ tetap menjadi kontributor terbesar terhadap dampak lingkungan, menunjukkan bahwa pembakaran bahan bakar pada *Greenhouse Gas* (GHG) masih menjadi sumber utama pemanasan global (Syafudin *et al.*, 2021).

Tingginya emisi ini menegaskan urgensi penerapan CCS atau transisi menuju bahan bakar rendah karbon (Santosa *et al.*, 2025).

Implementasi IWM-WtE masih menghadapi tantangan teknologi, pendanaan, dan regulasi (Suryawan *et al.*, 2023). Namun, kesesuaiannya dengan *Nationally Determined Contributions* (NDC), pembangunan rendah karbon, dan kebijakan energi bersih menempatkan IWM-WtE sebagai strategi mitigasi karbon yang strategis (Abedin *et al.*, 2025; Masri *et al.*, 2024).

Integrasi IWM-WtE menawarkan jalur yang efektif untuk menurunkan emisi GRK melalui minimisasi sampah, pemrosesan yang lebih efisien, dan pemanfaatan energi alternatif. Pendekatan ini mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan dan ramah iklim, sekaligus memperkuat tujuan pembangunan ekonomi sirkular rendah emisi. Diagram berikut menggambarkan konsep integrasi IWM-WtE berkontribusi terhadap mitigasi emisi karbon.



Gambar 2. Diagram konsep integrasi IWM-WtE

Berdasarkan Gambar 2, integrasi antara pengurangan timbunan sampah, peningkatan efisiensi pemrosesan, dan penerapan teknologi WtE membentuk jalur mitigasi emisi yang lebih efektif dalam kerangka IWM. Kombinasi ini tidak hanya menekan emisi dari TPA dan praktik pembuangan konvensional, tetapi juga menggantikan energi fosil melalui produksi listrik, panas, atau biogas dari konversi sampah, sehingga menghasilkan mekanisme ganda yang mengurangi sumber emisi sekaligus menyediakan energi rendah karbon.

Keunikan konsep IWM-WtE terletak pada pendekatan sistemik yang memadukan minimisasi sampah dengan teknologi biologis, termokimia, dan WtE generasi baru. Termasuk

insinerasi CCS, gasifikasi, *pyrolysis* berbasis *biochar*, hingga sistem hibrida yang terbukti secara empiris menurunkan emisi lebih signifikan.

3.3 Efektivitas *Integrated Waste Management* dalam pengurangan polusi dan limbah

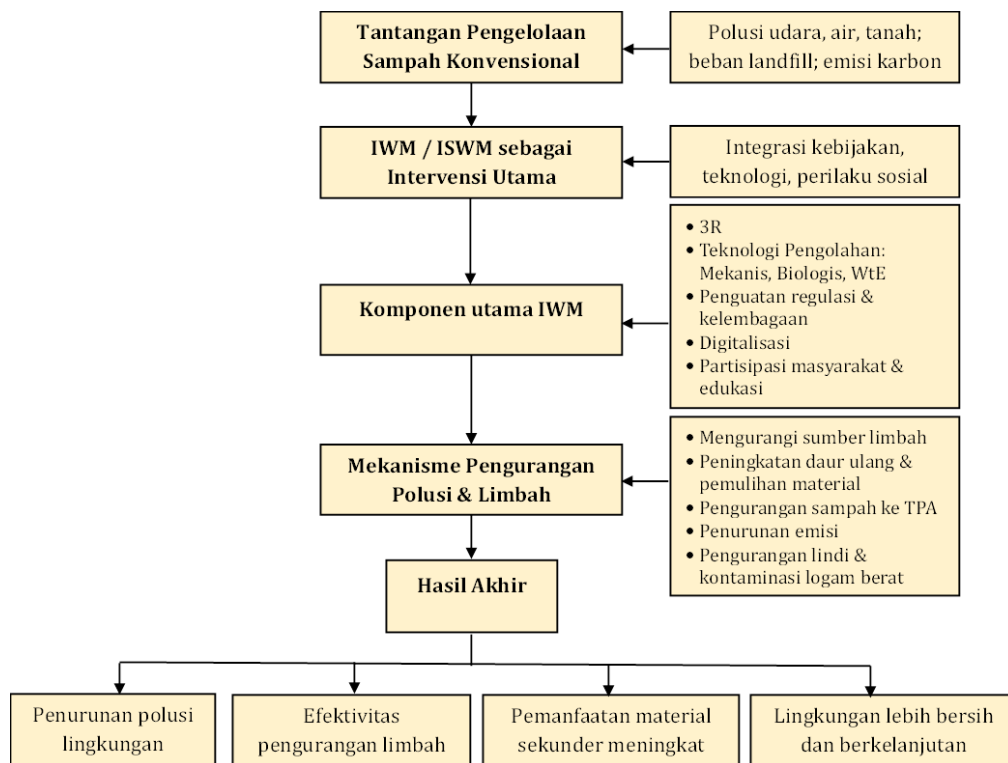
IWM efektif menurunkan emisi karbon dan mengurangi polusi yang muncul akibat pengelolaan sampah yang tidak terkontrol. Melalui integrasi kebijakan, teknologi, dan perilaku sosial, IWM mampu meminimalkan pencemaran tanah, air, dan udara. Penerapan ISWM di Indonesia menunjukkan kemajuan dalam kelembagaan, kapasitas teknis, dan kolaborasi multipihak, meski masih terkendala pendanaan, regulasi lemah, dan infrastruktur daur ulang yang terbatas (Handini, 2022).

Evaluasi berbasis LCA menunjukkan bahwa pendekatan pengelolaan sampah terintegrasi, meliputi guna ulang, daur ulang, dan pemulihan memberikan kinerja lingkungan yang lebih baik dibandingkan penimbunan. Sementara kombinasi daur ulang mekanis dan pengolahan biologis juga mampu mencapai keseimbangan antara manfaat lingkungan dan ekonomi (Ceraso & Cesaro, 2024; Sacchi *et al.*, 2022). Sebaliknya, praktik open dumping dan pembakaran terbuka meningkatkan polusi PM_{2.5}, dioksin, furan, serta kontaminasi logam berat (Anokye *et al.*, 2024). Sistem WtE modern secara signifikan dapat menurunkan emisi partikulat dan bahan berbahaya hingga berada di bawah standar WHO (Harfadli *et al.*, 2025).

Faktor sosial dan perilaku memegang peranan penting, di mana edukasi publik dan partisipasi masyarakat meningkatkan pemilahan sampah dari sumber, serta memperkuat jaringan daur ulang (Chuenwong *et al.*, 2022). Digitalisasi dapat memperkuat IWM melalui pemantauan berbasis IoT dan machine learning yang memungkinkan pelacakan polusi secara *real-time*, meningkatkan kualitas pengumpulan data, dan mendukung tata kelola sampah dalam kerangka *smart city* (Xiao *et al.*, 2023). Secara ekologis, IWM mengurangi tekanan pada tempat pembuangan sampah dan mendorong pemanfaatan material sekunder, selaras dengan prinsip *zero-waste* dan ekonomi sirkular (Ofremu *et al.*, 2025).

Pada Gambar 3, integrasi IWM dan WtE membentuk sistem kerangka kerja sebagai solusi pengelolaan sampah yang mampu menekan timbulan, meningkatkan pemulihan material, dan sekaligus mengurangi emisi karbon serta polusi. Melalui tahapan reduksi sumber, pemilahan, daur ulang, komposting, hingga pemanfaatan residu melalui WtE, aliran limbah dapat diproses secara lebih efisien sehingga menghasilkan dampak lingkungan yang lebih rendah dan mendukung transisi menuju pengelolaan sampah berkelanjutan.

Integrasi dimensi teknis, sosial, dan digital dalam kerangka IWM memperlihatkan bagaimana keterpaduan antar komponen mampu menurunkan polusi sekaligus memperkuat ketangguhan sistem pengelolaan sampah perkotaan. Pendekatan ini memposisikan sampah sebagai sumber daya melalui praktik 3R, teknologi pengolahan, penguatan kelembagaan, dan digitalisasi untuk meningkatkan kualitas data serta efisiensi operasional.



Gambar 3. Kerangka kerja efektivitas IWM

Berdasarkan Gambar 3, kerangka terpadu tersebut menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai mekanisme reduksi emisi, peningkatan daur ulang, penurunan ketergantungan pada TPA, dan optimalisasi pemulihan sumber daya. Selain itu, integrasi ini menawarkan perspektif berbasis data yang lebih adaptif dibandingkan model konvensional yang hanya berfokus pada satu metode pengelolaan, sehingga mendukung pembangunan perkotaan yang berkelanjutan, rendah karbon, dan ramah lingkungan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi IWM dan WtE secara signifikan meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah melalui pengurangan timbulan, peningkatan pemulihan material, serta penurunan emisi dan polusi. Melalui tahapan reduksi sumber, pemilahan, daur ulang, komposting, dan pemanfaatan residu melalui WtE, aliran limbah berhasil dialihkan dari TPA sebagai sumber utama emisi dan pencemar lingkungan.

WtE berperan sebagai jalur energi rendah karbon yang mengonversi residu non-daur ulang menjadi listrik atau panas, sehingga mengurangi ketergantungan pada energi fosil serta menekan polusi udara dan produksi lindi. Integrasi IWM-WtE menghasilkan manfaat ganda berupa mitigasi GRK dan pengurangan berbagai bentuk polusi dalam satu kerangka terpadu. Temuan ini memperkuat dasar strategis bagi pengembangan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan dan rendah emisi.

4. KESIMPULAN

Kajian sistematis ini menegaskan bahwa penerapan IWM dan teknologi WtE secara konsisten terbukti efektif dalam memitigasi emisi karbon dan mengurangi polusi lingkungan. Integrasi IWM-WtE menghasilkan mekanisme mitigasi ganda melalui penurunan timbulan sampah, optimalisasi pemulihan material, serta konversi residu menjadi energi rendah karbon yang menggantikan penggunaan energi fosil. Pendekatan IWM-WtE secara signifikan menekan emisi dan polutan yang bersumber dari TPA, pembakaran terbuka, serta pembuangan residu tidak terolah. Sinergi IWM-WtE menawarkan kerangka pengelolaan sampah yang lebih holistik dan berkelanjutan, karena mampu sekaligus mengurangi emisi karbon dan meminimalkan berbagai bentuk polusi. Temuan ini memperkuat bahwa strategi integratif IWM-WtE merupakan pendekatan yang relevan, adaptif, dan efektif dalam mendukung tata kelola lingkungan yang rendah emisi dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abedi, S., Nozarpour, A., Tavakoli, O. (2023). Evaluation of biogas production rate and leachate treatment in Landfill through a water-energy nexus framework for integrated waste management. *Energy Nexus*, 11, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100218>
- Abedin, T., Pasupuleti, J., Paw, J. K. S., Tak, Y. C., Islam, M. R., Basher, M. K., Nur-E-Alam, M. (2025). From waste to worth: advances in energy recovery technologies for solid waste management. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1–27. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03204-x>
- Ahmed, K., Dubey, M. K., Kumar, A., Dubey, S. (2024). Artificial intelligence and IoT driven system architecture for municipality waste management in smart cities: A review. *Measurement: Sensors*, 36, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101395>
- Akl, E. A., Khabsa, J., Iannizzi, C., Piechotta, V., Kahale, L. A., Barker, J. M., McKenzie, J. E., Page, M. J., Skoetz, N. (2024). Extension of the PRISMA 2020 statement for living systematic reviews (PRISMA-LSR): checklist and explanation. *BMJ*, 2024;387:e079183. <https://doi.org/10.1136/bmj-2024-079183>
- Almansour, M., Akrami, M. (2024). Towards zero waste: An in-depth analysis of national policies, strategies, and case studies in waste minimisation. *Sustainability (Switzerland)*, 16(22), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su162210105>
- Anokye, K., Mohammed, A. S., Agyemang, P., Agya, B. A., Amuah, E. E. Y., Sodoke, S. (2024). A systematic

- review of the impacts of open burning and open dumping of waste in Ghana: A way forward for sustainable waste management. *Cleaner Waste Systems*, 8, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100152>
- Atofarati, E. O., Adogbeji, V. O., Enweremadu, C. C. (2025). Sustainable smart waste management solutions for rapidly urbanizing African Cities. *Utilities Policy*, 95, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.101961>
- Bjelić, D., Markić, D. N., Prokić, D., Malinović, B. N., Panić, A. A. (2024). “Waste to energy” as a driver towards a sustainable and circular energy future for the Balkan countries. *Energy, Sustainability and Society*, 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13705-023-00435-y>
- Ceraso, A., Cesaro, A. (2024). Life cycle sustainability assessment of municipal solid waste management systems: A review. *Journal of Environmental Management*, 368, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122143>
- Chen, X. H., Tee, K., Elnahass, M., Ahmed, R. (2023). Assessing the environmental impacts of renewable energy sources: A case study on air pollution and carbon emissions in China. *Journal of Environmental Management*, 345, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118525>
- Chuenwong, K., Wangjiraniran, W., Pongthanaisawan, J. (2022). Heliyon municipal solid waste management for reaching net-zero emissions in ASEAN tourism twin cities : A case study of Nan and Luang Prabang. *Heliyon*, 8(8), e10295. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10295>
- Fan, Y. Van, Jiang, P., Tan, R. R., Aviso, K. B., You, F., Zhao, X., Lee, C. T., Klemeš, J. J. (2022). Forecasting plastic waste generation and interventions for environmental hazard mitigation. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127330>
- Hajam, Y. A., Kumar, R., Kumar, A. (2023). Environmental waste management strategies and vermi transformation for sustainable development. *Environmental Challenges*, 13(6), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100747>
- Handini, W. (2022). The analysis of household waste management based on integrated sustainable waste management in Sungailiat City. *Sriwijaya Journal of Environment*, 7(1), 41–46. <https://doi.org/10.22135/sje.2022.7.1.41-46>
- Harfadli, M. M. arij, Ramadan, B. S., Ulimaz, M., Rachman, I., Matsumoto, T. (2025). Environmental impact and priority assessment of municipal solid waste management scenarios in Balikpapan City, Indonesia. *Cleaner Waste Systems*, 10, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100223>
- Jamilatun, S., Pitoyo, J., Setyawan, M. (2023). Technical, economic, and environmental review of waste to energy technologies from municipal solid waste. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 581–593. <https://doi.org/10.14710/jil.21.3.581-593>
- Maalouf, A., Agamuthu, P. (2023). Waste management evolution in the last five decades in developing countries – A review. *Waste Management & Research*, 41(9), 1420–1434. <https://doi.org/10.1177/0734242X231160099>
- Mahmud, T. S., Ng, K. T. W., Hasan, M. M., An, C., Wan, S. (2023). A cross-jurisdictional comparison on residential waste collection rates during earlier waves of COVID-19. *Sustainable Cities and Society*, 96(March), 104685. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104685>
- Martinez, C. E., Valdés, Jose R, F., Castillo, J. L., Castillo, J. V, Blanco Montecino, R. M., Morin Jimenez, J. E., Arriaga Escamilla, D., Diarte, E. (2024). 10 Steps to conduct a systematic review. *Cureus*, 15(12), 1–11. <https://doi.org/10.7759/cureus.51422>
- Masri, R. M., Purwaamijaya, I. M., Vitada, V., Hapsari, A. S. (2024). Evaluation and implementation of green building in office building (Case study: Munara 99 Sabilulungan Building). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(6), 1573–1580. <https://doi.org/10.14710/jil.22.6.1573-1580>
- Materazzi, M., Chari, S., Sebastiani, A., Lettieri, P., Paulillo, A. (2024). Waste-to-energy and waste-to-

- hydrogen with CCS: Methodological assessment of pathways to carbon-negative waste treatment from an LCA perspective. *Waste Management*, 173, 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.020>
- Ofremu, G. O., Raimi, B. Y., Yusuf, S. O., Dziwornu, B. A., Nnabuife, S. G., Eze, A. M., Nnajofofor, C. A. (2025). Exploring the relationship between climate change, air pollutants and human health: Impacts, adaptation, and mitigation strategies. *Green Energy and Resources*, 3, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2024.100074>
- Rasheed, R., Rizwan, A., Javed, H., Sharif, F., Zaidi, A. (2021). Socio-economic and environmental impacts of COVID-19 pandemic in Pakistan-an integrated analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(16), 26–43. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12070-7>
- Sacchi, R., Terlouw, T., Siala, K., Dirnaichner, A., Bauer, C., Cox, B., Mutel, C., Daioglou, V., Luderer, G. (2022). Prospective Environmental Impact Assessment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311>
- Santosa, D. T., Ni'am, A. C., Maulana, C. M. S. (2025). Analisis Life Cycle Assessment (LCA) pada instalasi unit gas turbine generator area Gas Processing Facility (GPF) di perusahaan pengolahan minyak dan gas bumi, Jawa Timur. *Environmental Engineering Journal ITATS*, 5(1), 40–49.
- Soni, A., Gupta, S. K., Rajamohan, N., Yusuf, M. (2025). Waste-to-energy technologies: A sustainable pathway for resource recovery and materials management. *Materials Advances*, 6(14), 4598–4622. <https://doi.org/10.1039/d5ma00449g>
- Sund, J. H., Albizzati, P. F., Scheutz, C., Tonini, D. (2025). Comprehensive assessment of environmental and economic impacts of the entire EU waste management system. *Waste Management*, 204, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114910>
- Syafurudin, S., Budihardjo, M. A., Yulastuti, N., Ramadan, B. S. (2021). Assessment of greenhouse gases emission from integrated solid waste management in Semarang city, Central Java, Indonesia. *Evergreen*, 8(1), 23–35. <https://doi.org/10.5109/4372257>
- Xiao, L., Fu, B., Lin, T., Meng, L., Zhang, O., Gao, L. (2023). Promoting and maintaining public participation in waste separation policies — A comparative study in Shanghai, China. *Resources, Environment and Sustainability*, 12, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100112>