

Review: Pengelolaan Limbah Kota Melalui Teknologi Waste-to-Energy: Tinjauan Potensi, Tantangan dan Dampak Lingkungan

Nurmustaqimah¹, Siti Jamilatun^{2*}, Aster Rahayu³, Yuliza Nuryanti⁴

¹ Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Tamanan, Bantul, Yogyakarta, 55166

² Magister Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55284

*Corresponding Author: sitijamilatun@che.uad.ac.id

ABSTRAK

Permintaan energi yang terus meningkat di seluruh dunia akibat perkembangan ekonomi, industrialisasi, dan urbanisasi berkontribusi pada peningkatan volume sampah perkotaan atau *municipal solid waste* (MSW). Pengelolaan sampah yang kurang optimal menyebabkan dampak lingkungan dan sosial yang serius, termasuk polusi udara, pencemaran tanah dan air, serta risiko kesehatan bagi masyarakat. Teknologi *Waste-to-Energy* (WTE) menawarkan solusi inovatif untuk mengurangi volume sampah sekaligus menghasilkan energi alternatif. Artikel ini mengkaji secara komprehensif berbagai metode konversi dalam teknologi WTE, khususnya konversi termokimia seperti insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi. Setiap metode dibahas dalam konteks potensi pengurangan volume sampah, efisiensi energi, dan tantangan implementasinya. Hasil kajian menunjukkan bahwa insinerasi mampu mengurangi volume sampah hingga 90% dan menghasilkan listrik, namun juga menimbulkan risiko emisi gas berbahaya dan residu abu. Sementara itu, pirolisis dan gasifikasi menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi dan produk bernilai, Artikel ini juga membahas pentingnya regulasi dan penerapan teknologi yang ramah lingkungan untuk meminimalkan dampak negatif. Tinjauan teknologi WTE memiliki potensi besar untuk diterapkan di berbagai wilayah dengan modifikasi sesuai karakteristik sampah lokal dan kapasitas energi yang dibutuhkan khususnya dikota yogyakarta.

Kata kunci: Konversi energi; Lingkungan; Sampah Kota; *Waste-to-Energy*.

ABSTRACT

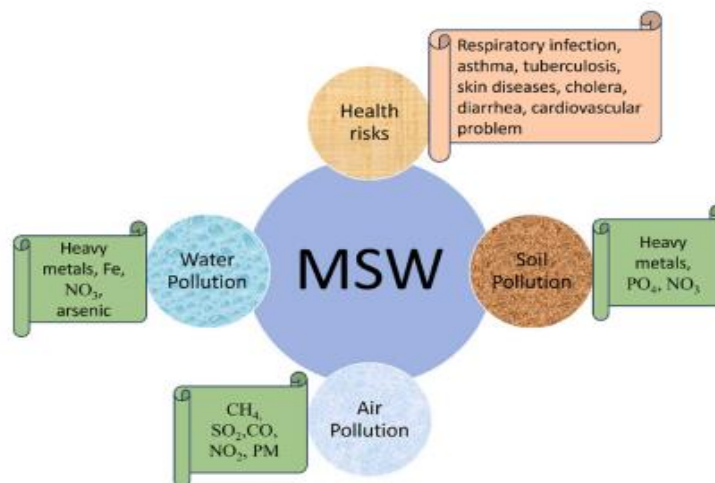
Growing energy demand worldwide due to economic development, industrialisation and urbanisation contributes to an increase in the volume of municipal solid waste (MSW). Sub-optimal waste management causes serious environmental and social impacts, including air pollution, soil and water pollution, and public health risks. *Waste-to-Energy* (WTE) technology offers an innovative solution to reduce waste volume while generating alternative energy. This article comprehensively reviews various conversion methods in WTE technology, particularly thermochemical conversions such as incineration, pyrolysis, and gasification. Each method is discussed in the context of its waste volume reduction potential, energy efficiency, and implementation challenges. The results show that incineration can reduce waste volume by up to 90% and generate electricity, but also poses risks of hazardous gas emissions and ash residue. Meanwhile, pyrolysis and gasification offer higher energy efficiency and valuable products, but require high investment costs and specific operational conditions. The article also discusses the importance of regulation and implementation of environmentally friendly technologies to minimise negative impacts. This review concludes that WTE technology has great potential to be applied in various regions with modifications according to local waste characteristics and the required energy capacity, especially in Yogyakarta.

Keyword: Energy conversion; Environment; Municipal solid waste; *Waste-to-Energy*.

1. PENDAHULUAN

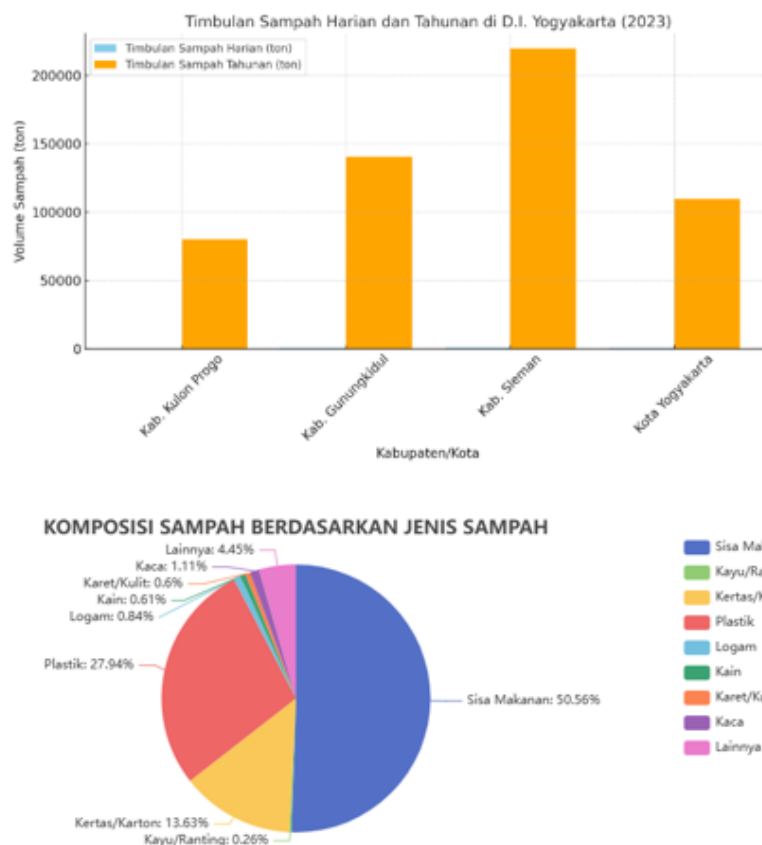
Pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, urbanisasi, dan standar hidup yang semakin tinggi telah menyebabkan peningkatan permintaan energi secara cepat, yang pada gilirannya juga meningkatkan produksi sampah kota *municipal solid waste* (MSW) di seluruh dunia (Kaur et al., 2023). Diperkirakan bahwa timbulan sampah perkotaan akan meningkat dari 2,1 miliar ton pada tahun 2023 menjadi 3,8 miliar ton pada tahun 2050 (Global Waste Management Outlook 2024, 2024). Kemajuan teknologi kini menawarkan solusi untuk mengatasi permasalahan ini. Salah satunya adalah pendekatan Waste-to-Energy (WTE) yang tidak hanya mengurangi volume sampah, tetapi juga menghasilkan energi alternatif yang ramah lingkungan.

Pembuangan sampah yang tidak tepat menciptakan krisis lingkungan yang serius, mengancam keselamatan masyarakat, serta menyebabkan masalah sosial dan ekonomi, seperti polusi udara, kontaminasi tanah, dan pencemaran air (baik permukaan maupun tanah). Dalam konteks ini, teknologi termokimia seperti insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi dapat membantu mengurangi dampak negatif pembuangan sampah sekaligus menghasilkan energi terbarukan (Xiao et al., 2020). Studi menunjukkan bahwa teknologi WTE telah berhasil diterapkan di beberapa negara maju, seperti Jepang yang telah untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta memitigasi dampak lingkungan dari pengelolaan sampah konvensional (Ross Waugh, 2024). Gambar 1. menggambarkan risiko lingkungan dan kesehatan dari pembuangan MSW yang tidak tepat



Gambar 1. Resiko kesehatan dan lingkungan yang ditimbulkan oleh pembuangan sampah kota (MSW)

Yogyakarta, sebagai kota pariwisata dan pendidikan, menghadapi tantangan signifikan dalam pengelolaan limbah kota. Produksi sampah terus meningkat seiring pertumbuhan populasi, aktivitas wisata, dan urbanisasi. Yogyakarta mengalami krisis sampah yang signifikan ketika Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang melayani Kota Yogyakarta, Kabupaten Sleman, dan Kabupaten Bantul ditutup paksa oleh warga sekitar. Penutupan ini disebabkan oleh tumpukan sampah yang terus meningkat tanpa pengelolaan yang memadai, menimbulkan bau menyengat, ancaman longsor, serta serangga yang berisiko menyebarkan penyakit. Selain itu, pencemaran air tanah oleh limbah cair dari sampah juga menjadi masalah serius, mengancam kualitas sumber air bersih warga dan memperburuk kondisi lingkungan di sekitar TPA (Habibah et al., 2020).



Gambar 2. Volume timbunan dan komposisi sampah

Dari grafik diatas (Gambar 1.1) volume sampah kota Yogyakarta rata rata mencapai 300,56 ton perhari dan 109.704,11 ton per tahun dengan didominasi oleh sampah organik (50-60%), yang terdiri dari sisa makanan dan limbah pasar, serta sampah anorganik (40-50%), seperti plastik, kertas, logam, dan kaca. Dominasi sampah organik ini memberikan potensi besar untuk dikelola melalui proses biokimia, seperti anaerobic digestion, sementara sampah plastik memiliki peluang untuk diolah menggunakan metode pirolisis atau insinerasi. Namun, pengelolaan sampah saat ini masih menghadapi berbagai tantangan, di mana sebagian besar limbah dibuang ke TPST Piyungan yang mendekati kapasitas maksimal. Tingkat daur ulang juga masih tergolong rendah, sehingga banyak sampah yang belum diolah secara optimal (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2024).

Dalam hal ini, perubahan metode pembuangan dengan teknologi konversi energi menjadi solusi yang menjanjikan untuk menghasilkan energi dari MSW. Berbagai teknologi inovatif untuk pengolahan sampah telah dikembangkan, seperti proses termal, termokimia, biologis, dan biokimia. Teknologi ini dapat membantu mengurangi dampak negatif dari akumulasi sampah, menurunkan emisi gas rumah kaca, dan meningkatkan efisiensi energi (Traven, 2023).

Meskipun teknologi pengolahan sampah menawarkan banyak manfaat, penerapannya di beberapa negara masih terkendala oleh berbagai tantangan, seperti biaya awal yang tinggi, keterbatasan infrastruktur, serta kurangnya dukungan kebijakan yang efektif. Hambatan-hambatan ini perlu diatasi untuk memastikan teknologi ini dapat digunakan secara luas dan berkelanjutan.

Jurnal review ini bertujuan untuk memberikan tinjauan komprehensif mengenai teknologi pengolahan sampah, termasuk konversi termokimia seperti pirolisis, insinerasi, dan gasifikasi. Fokus

utama adalah mengeksplorasi potensi dan tantangan dalam mengurangi sampah kota serta memanfaatkan sampah sebagai sumber energi alternatif.

2. TEKNOLOGI WASTE-TO-ENERGY (WTE)

Teknologi WTE merupakan salah satu teknologi konversi biologis dan termokimia yang memanfaatkan panas yang dihasilkan dari pengolahan limbah (Alao et al., 2022). Teknologi termokimia yang dapat digunakan untuk mengubah limbah padat menjadi sumber energi diwakili oleh insinerasi, hidrotermal pencairan, karbonisasi hidrotermal, pirolisis, gasifikasi, perulangan kimiawi, dll. Insinerasi sampah adalah solusi limbah menjadi energi di mana limbah dibakar pada kondisi suhu tinggi dan uap panas berlebih dihasilkan melalui pertukaran panas dengan gas buang (Palone et al., 2025). Proses terkomikimia merupakan proses pembakaran massal diman metode ini merupakan salah satu yang paling umum digunakan, dengan data menunjukkan bahwa 90% dari pabrik WTE di dunia menggunakan teknologi ini karena efisiensinya yang tinggi dan biaya yang lebih rendah. Pembakaran massal menggunakan oksigen berlebih, gasifikasi menggunakan oksigen terbatas, sedangkan pirolisis berlangsung tanpa oksigen sama sekali (Manikandan et al., 2023). Gasifikasi merupakan proses endotermik yang berlangsung dengan memaparkan bahan baku ke agen pengoksidasi, keuntungan utama dari teknologi ini adalah komposisi syngas dapat diatur dengan menyesuaikan komposisi zat pengoksidasi dan laju alir. Di sisi lain, pirolisis menawarkan alternatif yang lebih fleksibel untuk menghasilkan produk bahan bakar cair atau gas yang berpotensi digunakan sebagai sumber energi dan likuifaksi cocok untuk limbah yang memiliki kadar air tinggi dan memungkinkan produksi bio-oil. Berikut tabel 1, merangkum kelebihan dan kekurangan dari masing-masing metode konversi termokimia, yang mengkaji potensi teknologi ini dalam pengelolaan limbah dan produksi energi.

Tabel 1. Kelebihan dan kekurang teknologi termokimia

Termokimia	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
<i>Incineration</i>	- mengurangi volume sampah sebesar 70%–90%. - Menghasilkan panas dari pembakaran sampah yang bisa digunakan untuk memproduksi listrik. - Residu dari pembakaran sampah bisa dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk konstruksi. - Penggunaan residu pembakaran sampah untuk bahan bangunan bisa mengurangi sekitar 3% - Pembakaran sampah dengan bahan bakar dari sampah (Refuse-Derived Fuel) memungkinkan pembakaran dalam jumlah besar dengan efisiensi yang lebih tinggi.	- Menghasilkan abu terbang dan abu dasar, serta residu dari alat pengendalian polusi udara, yang perlu penanganan khusus. - Pengolahan residu membutuhkan biaya yang cukup besar. - Sampah perlu disortir dan diolah terlebih dahulu sebelum dibakar. - Efisiensi pembakaran sampah bisa dipengaruhi oleh kondisi operasional. - Biaya pembangunan pabrik pembakaran sampah relatif tinggi.	(Alao et al., 2022)

<i>Pyrolysis</i>	- Pirolisis sampah menghasilkan produk padat (arang), cair (minyak), dan gas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. - efisien dalam mengelola sampah, dengan sekitar 80% - energi dapat dimanfaatkan, serta dampak lingkungan yang lebih rendah. - investasi awal yang lebih rendah. - Produk akhir bisa dipilih (padat, cair, atau gas) dengan mengatur kondisi proses. - Minyak yang dihasilkan dari pirolisis bisa digunakan untuk membuat polimer baru. - Uap bisa diolah menjadi berbagai bahan kimia bernilai tinggi. - Proses tidak terlalu menyebabkan korosi, dan biaya perawatan lebih rendah.	- Sampah harus dikeringkan terlebih dahulu sebelum diproses dalam pirolisi - menghasilkan gas beracun seperti HCl, SO₂, dan NH₃. - Terkadang produk akhir tercemar oleh logam berat. - Produk cair yang dihasilkan sering kali mengandung banyak air, menyebabkan terbentuknya kokas.	(Kulas, 2022)
------------------	--	--	---------------

<i>Gasification</i>	- teknologi produksi energi bersih. - Menghasilkan hidrogen (H₂) yang memiliki nilai kalor tinggi (141,7 MJ/kg). - Dapat memproses semua jenis residu biologis. - Efisiensi gasifikasi sampah kota (MSW) cukup tinggi. - Investasi modal relatif rendah dan teknologi cukup sederhana.	- Menghasilkan tar sebagai produk sampingan. - Biaya pemasangan dan operasional tinggi. - Terjadi korosi pada tabung reaktor selama reaksi kimia - Ada kemungkinan kerusakan mesin akibat residu karbon. - Lebih cocok untuk pabrik skala besar	(Ławiński et al., 2022)
---------------------	---	---	-------------------------

<i>Liquefaction</i>	- Cocok untuk limbah dengan kadar air tinggi (>50%). - Biomassa mentah bisa langsung digunakan tanpa perlu mengurangi kadar air. - Menghasilkan bio-oil sebagai produk utama.	- Kandungan kelembaban pada sampah perlu dikurangi untuk pirolisis. - Pirolisis menghasilkan gas beracun seperti HCl, SO₂, dan NH₃.	(Mathan ker et al., 2021a)
---------------------	--	--	----------------------------

-
- Metode ini efektif dalam biaya untuk produksi bio-oil dari biomas
 - Menghasilkan arang sebagai residu padat yang memiliki banyak kegunaan.
-

3. TEKNOLOGI KONVERSI TERMOKIMIA MENJADI ENERGI

3.1 Insinerisasi

Insinerasi adalah proses pembakaran oksidatif dalam kondisi aerobik pada suhu tinggi dengan tujuan pemulihan energi dan penurunan volume (Duan et al., 2022). Teknik ini sangat menarik karena mampu mengurangi volume limbah hingga 95-96% dan menghancurkan bakteri serta bahan kimia berbahaya. Selain itu, insinerasi dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Idris et al., 2024). Panas yang dihasilkan dari proses insinerasi dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, yang berkontribusi dalam mengurangi kelangkaan energi (Karim & Corazzini, 2019). Namun, insinerasi juga menghasilkan gas buang (seperti CO₂, N₂O, SO₂) dan abu, yang membutuhkan pengelolaan khusus. Insinerasi berlangsung pada suhu antara 850°C hingga 1650°C dan mengubah komponen limbah yang mudah terbakar menjadi panas. Faktor seperti kelembaban, ukuran partikel, nilai kalor, dan metode pasokan oksigen mempengaruhi jumlah panas yang dihasilkan selama proses insinerasi (Hu et al., 2018).

3.2 Gasifikasi

Energi yang terkandung dalam limbah dapat dikonversi menjadi bahan kimia energi yang terkandung dalam gas sintesis melalui gasifikasi, yang merupakan proses WTE. Proses gasifikasi adalah proses termokimia yang dilakukan dengan menggunakan lebih sedikit udara daripada stoikiometri untuk pembakaran proses, dan menggunakan suhu tinggi, antara 800 dan 1200 °C, tergantung pada bahan baku dan teknologinya. Gas sintesis adalah produk utama dari proses gasifikasi. Ini berisi karbon monoksida dan hidrogen di antara senyawa lainnya, dan memiliki banyak aplikasi untuk produksi energi, dalam bentuk panas, listrik atau bahan bakar nabati, dan bahkan hidrogen (Duan et al., 2022). Gasifikasi menghasilkan gas yang mudah terbakar, yang disebut gas sintesis (syngas), yang mengandung hidrogen, karbon monoksida, dan sedikit metana, serta beberapa pengotor. Kualitas dan jumlah syngas yang dihasilkan bergantung pada suhu operasi dan agen gasifikasi seperti udara, oksigen murni, atau uap. Gasifikasi lebih cocok untuk bahan homogen berbasis karbon dengan nilai kalor tinggi. Salah satu keunggulan gasifikasi dibandingkan pembakaran konvensional adalah emisi yang lebih rendah, karena atmosfer yang kekurangan oksigen tidak mendukung pembentukan senyawa berbahaya seperti dioksin dan furan (Shah et al., 2023).

3.3 Pirolisis

Pirolisis melibatkan dekomposisi limbah padat dalam lingkungan yang sepenuhnya kekurangan oksigen pada suhu tinggi (300–900°C) untuk menghasilkan produk energi dalam bentuk padat, cair, dan gas (Al-Rumaihi et al., 2022). Pirolisis menghasilkan arang, minyak pirolisis, dan gas sintesis (syngas). Produk pirolisis sangat bergantung pada laju pemanasan, suhu proses, waktu tinggal, komposisi dan karakteristik bahan baku, serta jenis reaktor yang digunakan (V & Panwar, 2024).

Limbah plastik sangat cocok untuk pirolisis karena menghasilkan minyak sebagai produk utama, sedangkan biomassa kayu menghasilkan syngas dan arang sebagai produk utama. Namun, jenis plastik

seperti PVC tidak cocok untuk pirolisis karena menghasilkan senyawa beracun seperti dioksin dan furan (Sharuddin et al., 2016).

Pirolisis dapat dikategorikan menjadi tiga jenis berdasarkan laju pemanasan: pirolisis lambat, cepat, dan kilat, dengan perbedaan pada suhu dan produk yang dihasilkan. Selama proses pirolisis, campuran produk yang sangat heterogen terbentuk. Campuran ini terdiri dari fase cair, fase padat/arang, dan material gas, seperti karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), metana (CH_4), dan hidrogen (H_2). Minyak pirolisis mengandung partikel padat, senyawa aromatik, alifatik beroksigen, kadar air yang tinggi berkisar antara 15–30 wt%, beberapa oksigenat, dan senyawa nitrogen. Oleh karena itu, diperlukan pemrosesan lebih lanjut sebelum dapat digunakan sebagai bahan bakar transportasi (Rodionova et al., 2022).

3.4 Hydrothermal Liquefaction (HTL)

Teknologi pencairan hidrotermal mengubah biomassa menjadi biochar hidrotermal dalam sistem tertutup dengan air sebagai media di bawah tekanan dan suhu tertentu. Proses ini efektif dalam mengubah biomassa menjadi biomassa dengan kepadatan energi yang lebih tinggi (Mathanker et al., 2021b). Hydrothermal liquefaction (HTL) dilakukan dalam pelarut (biasanya air sub- atau super-kritis) pada suhu sedang (250–375°C) dan tekanan tinggi (5–25 MPa) untuk menghasilkan bio crude oil sebagai produk utama, bersama dengan produk sampingan berupa padatan, gas, dan fase cair. Teknik ini menarik karena dapat memproses biomassa basah secara langsung menjadi bahan bakar cair tanpa memerlukan tahap pengeringan yang mahal dan mengurangi kebutuhan energi. Selain biocrude oil, HTL juga menghasilkan produk bernilai tambah seperti perekat, resin, bio-polimer, dan busa poliuretan (Jiang et al., 2018).

Berikut merupakan (Tabel 2) perbandingan berbagai teknologi konversi termokimia yang digunakan dalam pengolahan limbah menjadi energi dan produk lain. Teknologi-teknologi ini meliputi incineration, pirolisis, gasifikasi, dan liquefaction. Setiap teknologi memiliki rentang suhu operasi, tingkat pemanasan, dan jenis produk yang dihasilkan dengan distribusi produk yang berbeda-beda.

Tabel 2. Teknologi Konversi Termokimia: Suhu Operasi, Tingkat Pemanasan, dan Produk yang Dihasilkan (Chand Malav et al., 2020).

Teknologi	Suhu Operasi	Tingkat Pemanasan	Produk Dan Distribusi
Incineration	800–1200	-	Heat, Gas
			Bottoms > Ash > slag > gas
pirolisis	slow 300-700	0.1–1	Bio-oil, Char, Gas
			Char > Bio-oil > Gas
	menengah 500-600	2–10	Bio-oil, Char, Gas
			Bio-oil > Char > Gas
	cepat 400-500	10–200	Bio-oil, Char, Gas
			bio-oil > Gas > Char
		1000	Bio-oil, Char, Gas

	flash 800-1000		bio-oil > Gas > Char
gasifikasi	500–900	variabel	Char, Syngas Syngas > Char
<i>Liquefaction</i>	250–450	0.05–5	Tar, Bio-oil Bio-oil > Tar

4. DAMPAK LINGKUNGAN

Dampak lingkungan dari teknologi pengolahan limbah perkotaan seperti insinerasi, pirolisis, gasifikasi, dan likuifaksi dapat dinilai melalui berbagai faktor, termasuk emisi gas rumah kaca (GRK), emisi zat berbahaya, dan dampak dari bahan residu yang dihasilkan. Salah satu keuntungan utama teknologi ini adalah kemampuannya untuk mengurangi emisi GRK dibandingkan dengan penimbunan sampah tradisional. Sebagai contoh, insinerasi dapat meminimalkan emisi metana yang biasa terjadi di tempat pembuangan akhir (TPA) karena penguraian anaerobik sampah organik. Meskipun insinerasi menghasilkan CO₂, total emisi dari insinerasi sering kali lebih rendah dibandingkan dengan penimbunan sampah, terutama jika memperhitungkan metana yang akan dihasilkan dari proses penguraian (Abubakar et al., 2022). Teknologi seperti pirolisis dan gasifikasi bahkan lebih menguntungkan karena mampu mengubah sampah menjadi gas atau minyak yang kaya energi sambil mengeluarkan lebih sedikit GRK dibandingkan dengan insinerasi dan penimbunan sampah (Shahbazi et al., 2023).

Namun, meskipun teknologi ini menawarkan banyak manfaat, terdapat tantangan signifikan terkait pengelolaan emisi gas berbahaya. Insinerasi, misalnya, dapat melepaskan dioksin dan furan, senyawa beracun yang terbentuk selama pembakaran bahan organik yang mengandung klorin. Walaupun insinerator modern dilengkapi dengan sistem kontrol emisi canggih untuk mengurangi emisi ini secara signifikan, masih ada risiko pelepasan dioksin yang melebihi standar keamanan jika fasilitas tersebut tidak dikelola dengan baik. Penelitian menunjukkan bahwa fasilitas yang dioperasikan dengan buruk dapat menghasilkan dioksin pada tingkat yang berbahaya, yang seringkali memicu kekhawatiran publik dan penentangan terhadap pembangunan fasilitas insinerasi baru (Grzesik, 2018).

Selain itu, abu yang dihasilkan dari proses insinerasi, terutama abu terbang, dapat berdampak negatif pada kualitas tanah dan air jika tidak ditangani dengan benar. Residu ini mengandung logam berat dan zat berbahaya lainnya yang dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah. Oleh karena itu, metode pembuangan atau pengolahan abu yang tepat sangat penting untuk mengurangi risiko pencemaran. Teknologi pirolisis dan gasifikasi juga menghasilkan residu padat yang memerlukan pengelolaan hati-hati. Namun, residu dari kedua teknologi ini umumnya lebih aman dibandingkan dengan insinerasi, karena menghasilkan abu yang kurang berbahaya (Zaman, 2010).

5. KESIMPULAN

Pengelolaan limbah kota merupakan tantangan global yang semakin mendesak akibat pertumbuhan populasi dan urbanisasi. Teknologi Waste-to-Energy (WtE) menawarkan solusi efektif dengan mengubah limbah menjadi energi, tetapi penerapannya masih dihadapkan pada berbagai tantangan, seperti biaya tinggi dan dampak lingkungan. Berbagai teknologi konversi termokimia, seperti insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan dalam hal efisiensi dan

dampak lingkungan. Oleh karena itu, penting untuk terus mengembangkan dan menerapkan teknologi yang dapat meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan serta kesehatan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abubakar, I. R., Maniruzzaman, K. M., Dano, U. L., AlShihri, F. S., AlShammari, M. S., Ahmed, S. M. S., Al-Gehlani, W. A. G., & Alrawaf, T. I. (2022). Environmental Sustainability Impacts of Solid Waste Management Practices in the Global South. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12717. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912717>
- Alao, M. A., Popoola, O. M., & Ayodele, T. R. (2022). Waste-to-energy nexus: An overview of technologies and implementation for sustainable development. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100034>
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., Mckay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112715. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>
- Chand Malav, L., Yadav, K. K., Gupta, N., Kumar, S., Sharma, G. K., Krishnan, S., Rezanian, S., Kamyab, H., Pham, Q. B., Yadav, S., Bhattacharyya, S., Yadav, V. K., & Bach, Q.-V. (2020). A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123227>
- Duan, Y., Tarafdar, A., Kumar, V., Ganeshan, P., Rajendran, K., Shekhar Giri, B., Gómez-García, R., Li, H., Zhang, Z., Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Taherzadeh, M. J., Sarsaiya, S., Jain, A., & Kumar Awasthi, M. (2022). Sustainable biorefinery approaches towards circular economy for conversion of biowaste to value added materials and future perspectives. *Fuel*, 325, 124846. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124846>
- Global Waste Management Outlook 2024. (2024). *Beyond an age of waste Turning rubbish into a resource*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- Grzesik, K. (2018). The environmental impact of municipal waste management systems. *E3S Web of Conferences*, 45, 00020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500020>
- Habibah, E., Novianti, F., & Saputra, H. (2020). Analisis terhadap faktor yang berpengaruh terhadap penerapan kebijakan pengelolaan sampah di Yogyakarta menggunakan pemodelan sistem dinamis. *Jurnal Analisa Sosiologi*, 9.
- Hu, Y., Cheng, H., & Tao, S. (2018). The growing importance of waste-to-energy (WTE) incineration in China's anthropogenic mercury emissions: Emission inventories and reduction strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.026>
- Idris, M., Setyawan, M., & Mufrodi, Z. (2024). Teknologi Insinerasi Sebagai Solusi Pengolahan Sampah Perkotaan dan Pemulihan Energi : A Review. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2024, April*. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/22490/10451>
- Jiang, W., Kumar, A., & Adamopoulos, S. (2018). Liquefaction of lignocellulosic materials and its applications in wood adhesives—A review. *Industrial Crops and Products*, 124, 325–342. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.053>

- Karim, M., & Corazzini, B. (2019). The current status of MSW disposal and energy production: a brief review of waste incineration. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 4(1). <https://doi.org/10.15406/mojes.2019.04.00129>
- Kaur, A., Bharti, R., & Sharma, R. (2023). Municipal solid waste as a source of energy. *Materials Today: Proceedings*, 81, 904–915. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.286>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional: SIPSN*. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- Kulas, D. G. (2022). *Towards A Circular Economy: Liquid-Fed Fast Pyrolysis Of Waste Polyolefin Plastics* [Michigan Technological University]. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etr/1427>
- Ławińska, O., Korombel, A., & Zajemska, M. (2022). Pyrolysis-Based Municipal Solid Waste Management in Poland—SWOT Analysis. *Energies*, 15(2), 510. <https://doi.org/10.3390/en15020510>
- Manikandan, S., Vickram, S., Sirohi, R., Subbaiya, R., Krishnan, R. Y., Karmegam, N., Sumathijones, C., Rajagopal, R., Chang, S. W., Ravindran, B., & Awasthi, M. K. (2023). Critical review of biochemical pathways to transformation of waste and biomass into bioenergy. *Bioresour Technol*, 372, 128679. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128679>
- Mathanker, A., Das, S., Pudasainee, D., Khan, M., Kumar, A., & Gupta, R. (2021a). A Review of Hydrothermal Liquefaction of Biomass for Biofuels Production with a Special Focus on the Effect of Process Parameters, Co-Solvents, and Extraction Solvents. *Energies*, 14(16), 4916. <https://doi.org/10.3390/en14164916>
- Palone, O., Cedola, L., Rispoli, F., & Borello, D. (2025). Municipal solid waste thermochemical conversion to substitute natural gas: Comparative techno-economic analysis between updraft gasification and chemical looping. *Energy Conversion and Management*, 324, 119294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119294>
- Rodionova, M. V., Bozieva, A. M., Zharmukhamedov, S. K., Leong, Y. K., Chi-Wei Lan, J., Veziroglu, A., Veziroglu, T. N., Tomo, T., Chang, J.-S., & Allakhverdiev, S. I. (2022). A comprehensive review on lignocellulosic biomass biorefinery for sustainable biofuel production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(3), 1481–1498. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.122>
- Ross Waugh. (2024, January 26). *Japan's Pioneering Waste-to-Energy Solution and Its Global Impact*. Inframanage.
- Shah, H. H., Amin, M., Iqbal, A., Nadeem, I., Kalin, M., Soomar, A. M., & Galal, A. M. (2023). A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. *Frontiers in Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>
- Shahbazi, A., Moeinaddini, M., Abdoli, M. A., Hosseinzadeh, M., Jaafarzadeh, N., & Sinha, R. (2023). Environmental Damage of Different Waste Treatment Scenarios by Considering Avoided Emissions Based on System Dynamics Modeling. *Sustainability*, 15(23), 16158. <https://doi.org/10.3390/su152316158>
- Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>
- V, K. K., & Panwar, N. L. (2024). Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: a review. *Clean Energy*, 8(4), 61–78. <https://doi.org/10.1093/ce/zkae036>

- Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Francisco, M.-J., Pan, H., & Wu, F. (2020). An overview of the municipal solid waste management modes and innovations in Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 29943–29953. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09398-5>
- Zaman, A. U. (2010). Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(2), 225–234. <https://doi.org/10.1007/BF03326132>