



## Waste-to-Energy as Ultimate Solutions: Implementasi Tujuan Pembangunan Berkelanjutan

Erry Ika Rhofita<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya

Email Korespondensi(Penulis): [erryyikarhofita@uinsa.ac.id](mailto:erryyikarhofita@uinsa.ac.id)

**Diterima:** 08-04-2025

**Disetujui:** 25-04-2025

**Diterbitkan:** 28-04-2025

### Kata Kunci:

*anaerobic digestion, berkelanjutan, gasifikasi, insenerasi, pembangunan berkelanjutan, pirolisis, sampah menjadi energi*

### ABSTRAK

Pengelolaan limbah padat perkotaan menjadi prioritas penting untuk mengurangi dampak lingkungan dan isu penipisan sumber daya alam. Daur ulan *municipal solid waste* (MSW) adalah langkah awal untuk mentransformasi konsep pengelolaan linier menjadi valorisasi dan berkelanjutan. Studi ini bertujuan untuk menganalisis potensi manfaat MSW sebagai bahan baku untuk memproduksi energi dalam bentuk listrik dan/atau panas. Banyak daerah di Indonesia telah menerapkan teknologi konversi *waste-to-energy* (WtE) melalui metode biokimia (yaitu pencernaan anaerobik dan fermentasi) dan termokimia (yaitu insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis), meskipun belum tersebar secara merata. Namun, potensi MSW yang tidak terkelola di Indonesia dapat menghasilkan sekitar 65 ribu GWh listrik pada tahun 2050, yang dievaluasi secara termokimia, dengan asumsi bahwa jumlah MSW yang tidak terkelola adalah 35% dan efisiensi gasifikasi dan insinerasi masing-masing adalah 18 dan 23%. Dengan demikian, program WtE telah berkontribusi terhadap implementasi pembangunan berkelanjutan secara langsung sesuai dengan tujuan SDGs No 12 dan secara tidak langsung sesuai dengan SDGs No 7, 11,13, dan 14, serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat secara merata.

**Received:** 08-04-2025

**Accepted:** 25-04-2025

**Published:** 28-04-2025

### Keywords:

*anaerobic digestion, sustainability, gasification, incenerator, sustainable development, pyrolysis, waste-to-energy*

### ABSTRACT

*Municipal solid waste management is a critical priority for mitigating environmental impacts and natural resource depletion. MSW recycling represents a significant step toward transforming the concept of linear management into valorization and sustainability. This study aimed to analyze the potential benefits of utilizing MSW as a raw material for generating electricity and/or heat. Numerous regions in Indonesia have implemented WtE conversion technology through biochemical (i.e., anaerobic digestion and fermentation) and thermochemical (i.e., incineration, gasification, and pyrolysis) methods, although the distribution is not uniform. The potential of unmanaged MSW in Indonesia to produce approximately 65 thousand GWh of electricity in 2050 was evaluated thermochemically, assuming that the amount of unmanaged MSW is 35% and gasification and incineration efficiencies are 18 and 23%, respectively. Consequently, the WtE program has directly contributed to the implementation of sustainable development, aligning with SDG No. 12 and indirectly supporting SDGs No. 7, 11, 13, and 14 while also enhancing community welfare.*

## 1. PENDAHULUAN

Globalisasi dan industrialisasi dua hal yang menjadi penyebab penurunan kualitas lingkungan dan kuantitas sumber daya alam; yang menjadi permasalahan global yang memerlukan perhatian khusus (Huo & Peng, 2023). Namun, hal tersebut diperburuk dengan pertumbuhan populasi manusia yang sangat pesat; dan diperkirakan mencapai 10 miliar manusia pada tahun 2050 atau meningkat sekitar 30% dari tahun 2000 (Lutz & Kc, 2010). Secara langsung akan meningkatkan kuantitas sampah perkotaan atau *municipal solid waste* (MSW) yang diproduksi dan berpotensi memperburuk kualitas lingkungan, serta menimbulkan

berbagai masalah kesejahteraan manusia, yang berpengaruh terhadap kesehatan, keselamatan, maupun perekonomian secara umum; sehingga harus segera ditangani dengan tepat (Xiao et al., 2020). Secara detail, skenario *business-as-usual* memperkirakan jumlah MSW meningkat dari 2,1 miliar ton tahun 2023 menjadi 3,8 miliar ton tahun 2050. Namun, hanya sekitar 19% dari total jumlah MSW yang dihasilkan didaur ulang atau *recycle*, dan 70% sisanya dibuang di tempat pembuangan akhir (TPA) bahkan sekitar 36,5% MSW tidak dikelola secara tepat, misalnya dibakar, dibiarkan di lahan terbuka, atau dibuang ke badan air (United Nations Environment Programme & International Solid Waste Association, 2024). Hal serupa juga terjadi di Indonesia sekitar

40,18% MSW tidak terkelola pada tahun 2024. Kecenderungan pengelolaan MSW yang tidak tepat dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kurangnya kesadaran dan partisipasi masyarakat, tidak tersedianya fasilitas dan teknologi pengolahan, kurangnya pendanaan, dan lemahnya regulasi dan kebijakan terkait (Rhofita, 2024).

Selain itu, peningkatan kuantitas MSW secara signifikan dan terus-menerus, dari aspek volume dan kompleksitas, semakin memperluas tantangan pengelolaannya saat ini dan masa depan (Ye et al., 2021). Kondisi tersebut diperburuk dengan peningkatan konsumsi energi fosil yang mengancam penipisan sumber daya alam, dan berdampak terhadap pemanasan global dan perubahan iklim (Wang & Azam, 2024). Oleh karena itu, perubahan paradigma yang mempersepsikan MSW sebagai limbah harus diubah dengan mempersepsikan MSW sebagai sumber daya berkelanjutan sebagai salah satu pilihan menarik untuk pembangunan perkotaan berkelanjutan di masa depan. Secara sederhana, program valorisasi MSW untuk pemulihan energi (*energy recovery*), dan produk bermanfaat (*valuable material*) mempunyai potensi strategis untuk meminimalkan permasalahan global, khususnya berkontribusi dalam mengurangi pencemaran lingkungan, penggunaan energi fosil, dan penipisan sumber alam (Amen et al., 2021). Secara terperinci valorisasi MSW merupakan komponen untuk implementasi tujuan pembangunan berkelanjutan atau *sustainable development goals* (SDGs) yang terdiri dari 17 tujuan dan 169 indikator. Berdasarkan uraian singkat sebelumnya, tujuan utama dari studi ini adalah untuk menganalisis manfaat dari MSW sebagai energi atau yang dikenal dengan *waste-to-energy* (WtE) dengan mempertimbangkan cakupan teknologi; dan diharapkan bahwa tinjauan ini akan berkontribusi pada pemanfaatan kembali dan valorisasi MSW sebagai upaya implementasi keberlanjutan dari segi ekonomi, sosial, dan kelestarian lingkungan.

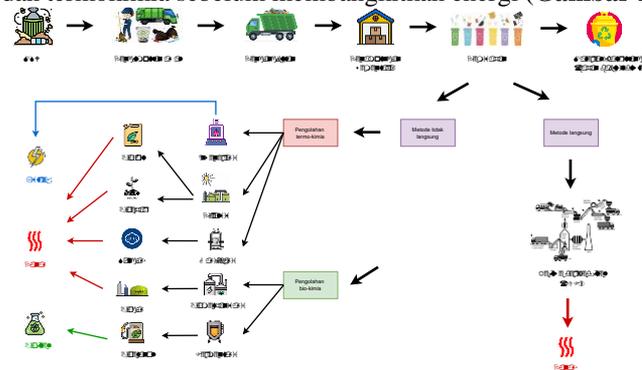
## 2. TEKNOLOGI WASTE-TO-ENERGY

Pendekatan WtE sebagai salah satu penanganan MSW dinilai paling efektif untuk mengurangi jumlah MSW yang terdapat di TPA. Menurut Hoang et al., (2022), beberapa metode, seperti insinerasi, pirolisis, gasifikasi, *anaerobic digestion*, biometanasi, dan pemulihan gas TPA (*landfill gas recovery*) memiliki tiga tujuan utama, antara lain:

- a. Mengurangi total volume MSW yang akan diberakhir di TPA terlepas dari apakah MSW berasal dari sektor perumahan dan komersial;
- b. Meminimalkan pencemaran lingkungan sekunder akibat dari peningkatan jumlah metana ( $CH_4$ ) yang tidak terkendali dari material yang berpotensi tinggi terurai secara hayati dalam MSW (sebagai contoh sampah organik);
- c. Mengoptimalkan potensi MSW yang tidak dapat didaur ulang (*recycle*) melalui peningkatan nilai kandungan energi dalam bentuk listrik dan/atau panas.

Secara umum, teknologi WtE sebagai konsep pemulihan energi dapat diwujudkan melalui dua metode, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Metode langsung menerapkan pembakaran secara langsung dari MSW untuk menghasilkan energi; sementara metode tidak langsung

menerapkan beberapa langkah pengolahan secara biokimia dan termokimia sebelum membangkitkan energi (**Gambar 1**).



**Gambar 1.** Teknologi WtE untuk pengolahan MSW

Implementasi teknologi WtE memerlukan dukungan pengembangan infrastruktur seperti akses lahan dan jalan, ketersediaan air, fasilitas pemrosesan dan pembuangan MSW, dan jaringan listrik untuk mendistribusikan pasokan listrik. Pengembangan teknologi WtE terus dikaji guna meningkatkan efisiensi proses dan dampak lingkungan yang ditimbulkan. Bahkan partisipasi masyarakat melalui daur ulang dan pengurangan MSW harus berdampingan dengan tempat dimana teknologi WtE diimplementasikan untuk menghasilkan jejak karbon yang lebih rendah dan mengurangi risiko pembuangan lindi ke tanah dan air tanah. Beberapa teknologi WtE yang telah diterapkan di dunia yang paling populer adalah *combined heat and power* (CHP) atau teknologi gabungan panas dan listrik dalam penyediaan listrik dari MSW. Pemanfaatan MSW melalui teknologi CHP mampu berkontribusi sekitar 1,79 sampai 5,72% kebutuhan listrik setiap tahunnya (Traven, 2023).

### 2.1 Metode Pengolahan Langsung

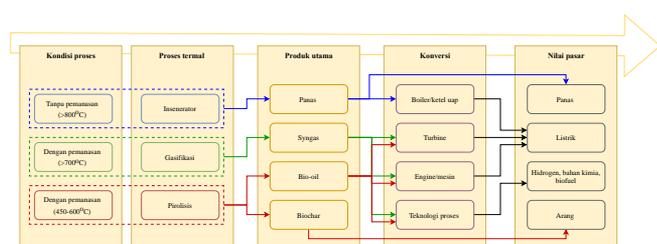
Metode langsung WtE bertujuan untuk menghasilkan energi panas melalui pembakaran *refuse derived fuel* (RDF). RDF diproduksi melalui modifikasi komposisi MSW dengan menghilangkan sebagian besar fraksi yang dapat terurai (seperti sampah makanan, logam, dan kaca, sehingga menghasilkan kadar air yang lebih rendah, kandungan bahan organik rendah, dan nilai kalor tinggi (Chavando et al., 2022). Ganesh et al., (2013) menjelaskan bahwa RDF merupakan penanganan sederhana dari MSW yang tidak dapat didaur ulang yang mencakup beberapa tahap mulai dari pemilahan awal, penyaringan ukuran, pencacahan, pemisahan magnetik, dan peletisasi dengan menambahkan kalsium hidroksida sebagai perekat. Proses tersebut mampu mengkonversi 750 ton/hari MSW menjadi 120 sampai 192 ton RDF per hari. RDF sebagai fasilitas pengolahan MSW terpadu dan komprehensif telah dikembangkan di Indonesia sejak tahun 2017; hingga tahun 2023 terdapat 12 fasilitas RDF yang telah beroperasi di beberapa provinsi, seperti DKI Jakarta, Jawa Tengah, Jawa Timur, Banten, Bali, Kalimantan Selatan, dan Kalimantan Barat dengan jumlah MSW yang terkelola mencapai 153 ribu ton (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2024d). Aplikasi RDF sebagai metode pengolahan WtE dinilai lebih menguntungkan dibandingkan dengan pembakaran MSW terbuka atau penimbunan di TPA (*landfilling*). Energi yang dihasilkan dari pembakaran satu kilogram RDF mencapai

24.96 MJ lebih tinggi dari batu bara (22.38 MJ/kg) dan arang (23.91 MJ/kg) (Dianda et al., 2018). Dengan demikian, aplikasi RDF telah berkontribusi signifikan terhadap efisiensi biaya pengolahan sekaligus menyediakan sumber energi terbarukan sebagai substitusi batu bara.

## 2.2 Metode Pengolahan Tidak Langsung

Metode pengolahan MSW tidak langsung dapat digolongkan menjadi dua, yaitu konversi secara biokimia dan termokimia. Pada proses biokimia MSW dipecah menjadi molekul yang lebih kecil dengan bantuan bakteri atau mikroorganisme dalam kondisi aerobik atau anaerobik dengan input energi minimal (Pandey et al., 2021). Namun, proses ini jauh lebih lambat dibandingkan dengan konversi termokimia dan hanya dapat diimplementasikan pada MSW yang mudah terurai secara hayati (seperti sampah organik). *Anaerobic digestion* (AD) dan fermentasi merupakan contoh proses biokimia, yang mana AD akan menghasilkan energi dalam bentuk biogas sedangkan fermentasi menghasilkan bioethanol sebagai biofuel (Hoang et al., 2022). Selain energi proses AD juga menghasilkan lumpur yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk. Pengembangan konversi biokimia dengan teknologi biodigester telah dikembangkan di hampir semua provinsi di pulau Jawa, serta sebagian provinsi di pulau Sumatera dan Sulawesi. Berdasarkan data dari KLHK teknologi biodigester mampu mengelola sampah sebesar 31,9 ribu ton pada tahun 2023 meningkat 439,22% dari tahun 2022.

Bertolak belakang dengan proses biokimia, proses termokimia dianggap sebagai proses yang membutuhkan energi lebih besar, tetapi siklus produksi pendek dan operasionalnya mudah (Shi et al., 2016). Secara umum, konversi MSW menjadi energi melalui termokimia dikelompokkan menjadi insenerasi, pirolisis, dan gasifikasi. Kondisi proses konversi WtE pada termokimia secara sederhana diilustrasikan pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Proses konversi WtE secara termokimia

### 2.2.1 Insenerasi

Insenerasi merupakan bagian penting dalam pengelolaan MSW untuk menghasilkan panas dan listrik bagi sebagian kota di dunia. Proses ini mampu mengurangi limbah hingga 80 dan 70% berdasarkan MSW berdasarkan berat dan volume dengan efisiensi proses antara 25–30%. Produk akhir insenerasi adalah gas hasil pembakaran, terdiri dari nitrogen ( $\text{N}_2$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), oksigen ( $\text{O}_2$ ) dan abu (Ouda et al., 2016). Namun, proses ini masih dinilai menghasilkan polusi udara tinggi, sehingga dalam praktiknya harus diolah lebih lanjut. Di Indonesia, WtE melalui proses insenerasi telah dikembangkan di beberapa provinsi, seperti Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Kalimantan Timur, dan Papua; yang mampu

mengelola MSW sekitar 4,9 ribu ton pada tahun 2023 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2024b).

### 2.2.2 Pirolisis

Proses pirolisis dilakukan tanpa oksigen untuk mengubah MSW menjadi bio-oil, arang, dan as yang mudah terbakar (*syngas*), yang diperkirakan mampu memulihkan 80% energi (Ouda et al., 2016). Jumlah produk yang dihasilkan pada proses ini bervariasi dan dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis dan kualitas MSW, model reaktor, dan proses reaksi (temperatur dan waktu pemanasan) (Hoang et al., 2022). Hampir serupa dengan proses termokimia lainnya, pirolisis menghasilkan emisi  $\text{NO}_x$  dan  $\text{SO}_x$  yang lebih rendah karena prosenya tanpa oksigen. Di Indonesia, teknologi pirolisis telah diterapkan di beberapa TPA dan unit pengolahan MSW lainnya, seperti TPA Pasuruhan di Magelang, TPA Selopuro di Kab. Ngawi, Pirolisis Manding di Sragen, dan unit daur ulang organik di Kuningan; yang mampu mengolah MSW dengan pirolisis sekitar 10,4 ribu ton pada tahun 2023 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2024c).

### 2.2.3 Gasifikasi

Proses gasifikasi merupakan proses pengolahan MSW tidak langsung yang melalui reaksi eksotermik dalam reaktor ketika karbon bereaksi dengan oksigen ( $\text{O}_2$ ) untuk menghasilkan panas dan syngas yang dapat digunakan untuk pembangkitan listrik. Umumnya, syngas mengandung hidrogen ( $\text{H}_2$ ), karbon monoksida ( $\text{CO}$ ) dan metana ( $\text{CH}_4$ ) (Hoang et al., 2022). Kandungan energi yang diperoleh dari syngas berkisar antara 4 sampai 50  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ , sepertiga dari gas alam; sehingga produksi syngas dari MSW memiliki potensi tinggi untuk mensubstitusi gas alam dengan mudah karena dapat memanfaatkan infrastruktur gas alam yang sudah ada untuk penyimpanan, transportasi, dan distribusinya tanpa perlu perbaikan. Proses gasifikasi sebagai upaya pengelolaan MSW dapat mengurangi volume sampah antara 50–90% dan dapat menghemat energi antara 1,9–3,8 MW per ton jika dibandingkan metode *landfill* (Ouda et al., 2016). Pengembangan teknologi gasifikasi di Indonesia pada tahun 2023 telah mampu mengelola 350 ribu ton MSW, dan sekitar 90% MSW berhasil dikelola di pembangkit listrik tenaga sampah atau PSEL Benowo, Kota Surabaya untuk menghasilkan listrik sebesar 35,5 GWh per tahun; meskipun beberapa fasilitas pengolah dengan gasifikasi telah dikembangkan di beberapa provinsi, seperti Aceh, Sumatera Barat, Bengkulu, Jawa Barat, Bali, Kalimantan Selatan, Sulawesi Tenggara, dan Sulawesi Barat (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2024a).

## 3. POTENSI MSW SEBAGAI WASTE-TO-ENERGY

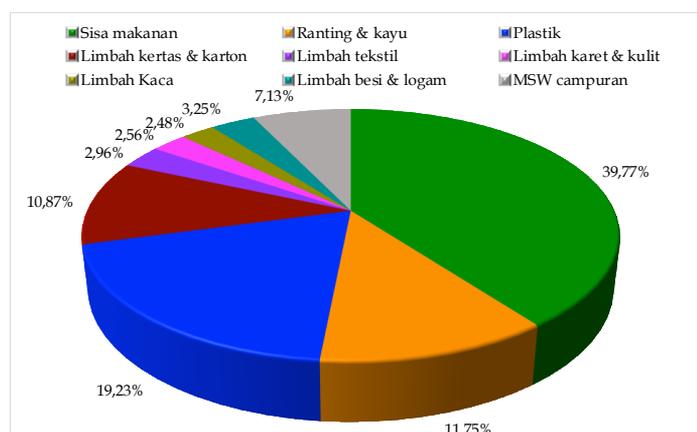
Di Indonesia, rata-rata produksi MSW mencapai 0,75 kg per orang per harian dengan jumlah populasi sebesar 278.696,2 juta jiwa pada tahun 2023, sehingga akan menghasilkan sekitar 209.022 kg MSW per hari, dan sekitar 76,3 juta ton MSW per tahun yang secara administratif didistribusikan di 38 provinsi (Daskalopoulos et al., 1998). Namun, perkiraan tersebut lebih tinggi dari pada data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) yang menyebutkan bahwa produksi MSW Indonesia tahun 2023

sebesar 38,504 juta ton, yang mana sebesar 23,98 juta ton yang terkelola atau 62,29% dan sisanya 14,52 juta ton yang tidak terkelola. Lebih dari 35% jumlah MSW yang tidak terkelola merupakan penyebab peningkatan pencemaran lingkungan yang berdampak pada kondisi sosial ekonomi masyarakat. Oleh karena itu, sistem pengelolaan MSW melalui program WtE dapat implementasikan di berbagai daerah di Indonesia.

Selain itu, pertimbangan komposisi MSW juga harus diperhatikan dalam implementasi WtE karena menentukan nilai energi yang terkandung dalam MSW. **Tabel 1** menunjukkan kandungan energi atau nilai kalor dari berbagai komposisi MSW. Secara umum, komposisi MSW di Indonesia didominasi oleh sampah organik yang berasal dari sisa makanan dan sampah taman yang berupa sisa dedaunan dan ranting; sementara proporsi MSW lainnya ditunjukkan oleh **Gambar 3**. Menurut Ouda *et al.*, (2016) keberhasilan konversi MSW menjadi energi baik melalui konversi termokimia dan biokimia ditentukan oleh komposisi dan karakteristik MSW, pembiayaan baik biaya modal (*capital cost*) maupun biaya operasional, efisiensi dan kompleksitas teknologi termasuk persyaratan keterampilan tenaga kerja dan kondisi geografis pengolahan WtE. Lebih detail beberapa teknologi juga mensyaratkan jenis limbah tertentu yang dapat diaplikasikan pada pengolahan WtE; sebagai contoh proses AD hanya diperuntukkan untuk sampah organik, sementara konversi secara termokimia (insenerasi, pirolisis, dan gasifikasi) tidak diperuntukkan untuk sampah organik, limbah logam, dan limbah kaca.

**Tabel 1.** Nilai kalor (Misganaw & Teffera, 2022)

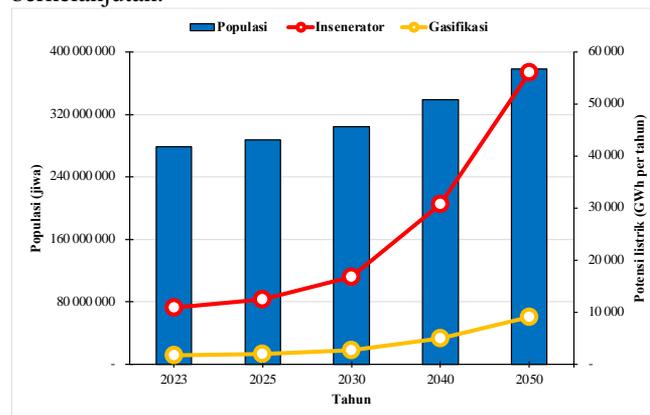
Komposisi MSW	Nilai kalor (MJ/kg)
Campuran sisa makanan	5,58
Campuran sisa dedaunan dan ranting (sampah taman)	6,28
Campuran limbah kertas dan karton	15,82
Campuran limbah plastik	32,56
Limbah karet bekas	26,05
Limbah tekstil	18,84



**Gambar 3.** Komposisi MSW di Indonesia

Berdasarkan pertimbangan kuantitas dan kualitas MSW di Indonesia, sistem pengelolaan MSW melalui konversi termokimia melalui insenerasi dan gasifikasi diperkirakan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 10.992,16 dan 1758,47 GWh pada tahun 2023 (**Gambar 4**). Potensi tersebut dinilai

berdasarkan jumlah MSW yang tidak terkelola sebesar 35% dari total MSW yang diproduksi dan laju pertumbuhan populasi sebesar 1,1%; Selain itu, diasumsikan bahwa efisiensi penanganan MSW sebesar 45% dan efisiensi kinerja teknologi insenerasi dan gasifikasi sebesar 18 dan 23% (Salah *et al.*, 2023). Besarnya potensi MSW tidak terkelola sebagai energi listrik mampu mensubstitusi penggunaan energi fosil yang berasal dari batu bara dan gas alam; sehingga mampu berkontribusi dalam penurunan isu-isu lingkungan global, seperti efek gas rumah kaca atau *greenhouse gases emission* (GHG), dan menciptakan lapangan pekerjaan baru bagi masyarakat. Dengan demikian, pengelolaan MSW sebagai WtE merupakan salah satu upaya implementasi pembangunan berkelanjutan.



**Gambar 4.** Potensi MSW tidak terkelola sebagai WtE di Indonesia

#### 4. WASTE-TO-ENERGY DAN IMPLEMENTASI PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN

Menurut Halkos & Gkampoura, (2021) SDGs merupakan pendekatan pembangunan untuk memenuhi kebutuhan masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang, dengan tujuan mewujudkan keseimbangan ekonomi, sosial, dan lingkungan sebagai upaya mengatasi tantangan utama (seperti kemiskinan, kesenjangan, perubahan iklim, dan kerusakan lingkungan). SDGs terdiri dari 17 tujuan dan 169 indikator yang ditunjukkan oleh **Gambar 5**, dan dianggap lebih mengintegrasikan ketiga pilar pembangunan berkelanjutan (ekonomi, sosial, dan lingkungan) dalam mewujudkan perubahan sistematis untuk menciptakan masa depan lebih berkelanjutan (Costanza *et al.*, 2016). Selama beberapa dekade, MSW dipandang sebagai suatu material yang menimbulkan risiko bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Namun dengan adanya gagasan WtE sebagai salah satu upaya pengelolaan MSW berkelanjutan, maka muncullah sebuah pertanyaan yang perlu untuk menjawab bagaimana program WtE sebagai upaya pengelolaan MSW mengimplementasikan SDGs?



Gambar 5. Tujuan SDGs

Pengelolaan MSW lebih terfokus pada penggunaan sumber daya, produksi, dan konsumsi erat kaitannya dengan indikator kuantitas MSW yang mampu didaur ulang. Seperti pada uraiannya sebelumnya, mempersepsikan MSW sebagai sumber daya WtE adalah bentuk implementasi SDGs No 12 “konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab”. Ditinjau dari pilar ekonomi konsep pengelolaan WtE mampu meningkatkan nilai ekonomi MSW sesuai dengan karakteristiknya. Lebih lanjut, WtE melalui konversi termokimia (insenerasi dan gasifikasi) telah menghasilkan produk akhir berupa listrik. Secara tidak langsung listrik yang bangkitkan telah berkontribusi dalam implementasi SDGs No 7 “energi bersih dan terjangkau”, khususnya peningkatan kuantitas bauran energi terbarukan dan peningkatan rasio elektrifikasi. Selanjutnya ditinjau dari pilar lingkungan, program WtE telah mampu mengurangi presentase penurunan jumlah MSW yang dibuang ke laut, sesuai dengan tujuan SDGs No 14 “ekosistem laut”, karena semakin tingginya jumlah MSW yang mampu terkelola. Hal tersebut juga telah mengimplementasikan tujuan SDGs No 11 “kota dan pemukiman berkelanjutan”, khususnya peningkatan presentase MSW yang terkelola. Selain itu, upaya penurunan emisi GHGs yang ditimbulkan dari kegiatan pengelolaan secara konvensional seperti *landfill* dan pembakaran terbuka dapat diturunkan dengan program WtE. Dengan demikian, upaya tersebut secara tidak langsung terkait dengan implementasi SDGs No 13 “penanganan perubahan iklim”. Sementara dari pilar sosial, semua upaya pengelolaan WtE berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan kualitas sosial dan kesejahteraan masyarakat.

#### 4.1 Tantangan dan Hambatan dalam Implementasi Waste-to-Energy

Beberapa penelitian telah mengkaji tantangan dan hambatan implementasi pengembangan WtE ditinjau dari aspek sosial, ekonomi, dan teknis; yang masing-masing hambatan tersebut dapat berbeda-beda satu sama lain bergantung pada kondisi area atau negara (Pourali, 2009)(Zhang et al., 2015)(Chand Malav et al., 2020)(Adeleke et al., 2021)(Williams et al., 2023)(Khawaja et al., 2024). Secara sederhana beberapa tantangan dan hambatan dalam pengembangan WtE dirangkum pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Tantangan dan hambatan dalam implementasi WtE

Aspek keberlanjutan	Tantangan dan hambatan
Sosial	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendahnya kemauan dan kesadaran masyarakat untuk berpartisipasi pemilahan MSW;</li> <li>Program WtE dinilai tidak memberikan dampak sosial positif bagi masyarakat;</li> <li>Kurangnya pengetahuan dan informasi dari manfaat program WtE sebagai upaya efisiensi penggunaan sumber daya tidak dapat diperbaharui;</li> <li>Persepsi yang buruk bahwa program WtE akan memberikan dampak buruk bagi kesehatan dan lingkungan.</li> </ul>
Ekonomi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tingginya biaya investasi (<i>capital cost</i>) dalam pengembangan WtE;</li> <li>Daya tarik investasi WtE yang rendah, karena dinilai kurang layak dan tidak menguntungkan jika dibandingkan dengan pembangkitan energi secara konvensional;</li> <li>Biaya operasional yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan pembangkit listrik dari bahan bakar fosil dan metode <i>landfill</i> untuk pembuangan MSW.</li> </ul>
Lingkungan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pembuangan limbah dari kegiatan WtE yang tidak tepat akan menimbulkan polusi udara, dan pencemaran air dan tanah air sehingga membutuhkan pengelolaan dan pemulihan lingkungan;</li> <li>Dampak pada penurunan kualitas dan kuantitas keanekaragaman hayati dan ekosistem dari kegiatan WtE yang membutuhkan perhatian;</li> <li>Tingginya kompleksitas dalam menghitung siklus daur hidup dari kegiatan WtE.</li> </ul>
Teknis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrastruktur yang tidak memadai;</li> <li>Teknologi yang kompleks dan berdampak pada pengembangan WtE;</li> <li>Kurangnya fasilitas dan teknologi yang canggih;</li> <li>Keterbatasan kualitas SDM.</li> </ul>

#### 4.2 Rekomendasi

Keberhasilan implementasi program WtE bergantung pada beberapa faktor ekonomi, sosial, politik, dan teknik. Begitu juga dengan hambatan dan tantangan yang telah diidentifikasi pada sub-bab sebelumnya menjadi sebuah pertimbangan untuk memformulasikan sebuah kebijakan, perencanaan, dan peraturan yang komprehensif untuk mengembangkan WtE (Hoo P.Y. et al., 2017). Upaya kolaboratif para pemangku kepentingan multi-sektor, seperti pemerintah, industri, peneliti dan akademisi, masyarakat, dan organisasi non-pemerintah (pemerhati lingkungan) harus bersinergi dan merumuskan satu visi terkait implementasi WtE untuk mendukung tercapainya SDGs. (Chand Malav et al., 2020) menjelaskan bahwa pemerintah harus aktif mempromosikan implementasi WtE dengan memberikan (i) sosialisasi dan pelatihan kepada masyarakat tentang sistem pengelolaan MSW berkelanjutan; (ii) insentif dan pengurangan pajak bagi industri yang berinvestasi dalam pengembangan WtE; dan (iii)

mengintegrasikan pengelolaan MSW dalam kurikulum pendidikan sekolah dasar hingga perguruan tinggi. Melalui metode-metode tersebut mampu membantu mendukung percepatan pengembangan WtE.

Peningkatan pemahaman melalui edukasi pengelolaan MSW diperlukan untuk mengurangi jumlah MSW yang dibuang atau ditimbun di TPA. (Chand Malav et al., 2020) menjelaskan bahwa partisipasi aktif masyarakat mampu memperkuat keberhasilan implementasi program WtE. Ketersediaan dan kecukupan fasilitas publik yang mampu mengkarakterisasi MSW mulai dari titik pengumpulan hingga pembuangan akan meningkatkan efisiensi keterkelolanya. Lebih detail, penilaian terhadap jenis dan karakteristik MSW juga harus menjadi prioritas dalam menentukan teknologi yang tepat untuk pengembangan WtE. Teknologi produksi bersih WtE harus dijamin dan disediakan sebagai upaya meminimalisir dampak lingkungan dan kesehatan, dan telah menjadi kekhawatiran masyarakat. Tata letak dan konsep sentralisasi dan desentralisasi fasilitas WtE harus disesuaikan dengan kuantitas dan kualitas MSW harus direncanakan secara matang dan tepat. Oleh karena itu, persepsi terhadap MSW sebagai sumber daya energi secara signifikan diperlukan untuk meningkatkan efisiensi daur ulang. Sehingga potensi untuk membuka peluang pasar dan lapangan pekerjaan sangat besar sebagai upaya keterlibatan pemangku kepentingan. Selain itu, kebijakan dan intensif fiskal, serta pengembangan standar dan pedoman kualitas daur ulang MSW dan karakteristik bahan baku WtE mampu mengurangi beban pencemaran lingkungan; yang mana teknologi WtE harus mengikuti standar dan yang diterima secara internasional.

## 5. SIMPULAN

Perubahan paradigma MSW sebagai limbah menjadi sumber daya yang memiliki nilai guna dapat diupayakan dengan mengembangkan teknologi WtE untuk memproduksi energi, dalam bentuk panas dan/atau listrik. Dalam konteks ini, aplikasi WtE telah menyediakan solusi terpadu untuk meningkatkan jumlah pasokan energi terbarukan dan mengurangi isu pencemaran lingkungan. Secara luas, teknologi WtE dapat dikategorikan menjadi metode langsung dan metode tidak langsung. Kedua metode tersebut dianggap sebagai solusi akhir dalam menyelesaikan pengelolaan MSW secara konvensional melalui pembakaran terbuka yang memiliki risiko pelepasan GHGs ke atmosfer. Ditinjau dari segi teknologi, WtE tidak langsung dipengaruhi oleh teknologi konversi secara biokimia dan termokimia. Konversi biokimia melibatkan peran mikroorganisme dalam prosesnya, sementara konversi termokimia menerapkan termal dengan kisaran temperatur tertentu untuk menghasilkan energi. Namun, dalam implementasi kedua proses konversi tersebut terhalang oleh kurang berkembangnya teknologi pemisahan antara limbah organik dan anorganik, meskipun program WtE telah berkontribusi terhadap SDGs dari semua pilar (ekonomi, sosial, dan lingkungan). Oleh karena itu, praktik pemilahan MSW sejak di sumber (dalam hal ini rumah tangga) harus dipromosikan dan diintegrasikan ke dalam program-program pembangunan berkelanjutan untuk meningkatkan kesadaran dan keterlibatan masyarakat dalam pengembangan kebijakan pengelolaan MSW saat ini dan masa mendatang sesuai dengan pendekatan SDGs.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adeleke, O., Akinlabi, S. A., Jen, T.-C., & Dunmade, I. (2021). Sustainable utilization of energy from waste: A review of potentials and challenges of Waste-to-energy in South Africa. *International Journal of Green Energy*, 18(14), 1550–1564. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1914629>
- Amen, R., Hameed, J., Albashar, G., Kamran, H. W., Hassan Shah, M. U., Zaman, M. K. U., Mukhtar, A., Saqib, S., Ch, S. I., Ibrahim, M., Ullah, S., Al-Sehemi, A. G., Ahmad, S. R., Klemeš, J. J., Bokhari, A., & Asif, S. (2021). Modelling the higher heating value of municipal solid waste for assessment of waste-to-energy potential: A sustainable case study. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125575. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125575>
- 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>
- Chavando, J. A. M., Silva, V. B., Tarelho, L. A. C., Cardoso, J. S., & Eusébio, D. (2022). Snapshot review of refuse-derived fuels. *Utilities Policy*, 74, 101316. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101316>
- Costanza, R., Daly, L., Fioramonti, L., Giovannini, E., Kubiszewski, I., Mortensen, L. F., Pickett, K. E., Ragnarsdottir, K. V., De Vogli, R., & Wilkinson, R. (2016). Modelling and measuring sustainable wellbeing in connection with the UN Sustainable Development Goals. *Ecological Economics*, 130, 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.07.009>
- Daskalopoulos, E., Badr, O., & Probert, S. D. (1998). Municipal solid waste: A prediction methodology for the generation rate and composition in the European Union countries and the United States of America. *Resources, Conservation and Recycling*, 24(2), 155–166. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00032-9)
- Dianda, P., Mahidin, & Munawar, E. (2018). Production and characterization refuse derived fuel (RDF) from high organic and moisture contents of municipal solid waste (MSW). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334, 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012035>
- Ganesh, T., Vignesh, P., & Kumar, G. A. (2013). Refuse Derived Fuel To Electricity. *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 2, 2930–2932.
- Halkos, G., & Gkampoura, E.-C. (2021). Where do we stand on the 17 Sustainable Development Goals? An overview on progress. *Economic Analysis and Policy*, 70, 94–122. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2021.02.001>
- Hoang, A. T., Varbanov, P. S., Nižetić, S., Sirohi, R., Pandey, A., Luque, R., Ng, K. H., & Pham, V. V. (2022). Perspective review on Municipal Solid Waste-to-

- energy route: Characteristics, management strategy, and role in circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 359, 131897. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131897>
- Hoo P.Y., Hashim H., Ho W.S., & Tan S.T. (2017). Successful biogas implementation a mini-review on biogas utilization, energy policies and economic incentives. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 1495–1500. <https://doi.org/10.3303/CET1761247>
- Huo, J., & Peng, C. (2023). Depletion of natural resources and environmental quality: Prospects of energy use, energy imports, and economic growth hindrances. *Resources Policy*, 86, 104049. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104049>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024a). *Sumber Energi (Gasifikasi)* [Dataset]. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/home/fasilitas/gasifikasi>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024b). *Sumber Energi (Insenerator)* [Dataset]. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/home/fasilitas/insenerator>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024c). *Sumber Energi (Pirolisis)* [Dataset]. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/home/fasilitas/pirolisis>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024d). *Sumber Energi RDF (Refuse Derived Fuel)* [Dataset]. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/home/fasilitas/rdf>
- Khawaja, M. K., Alkayyali, K., Almanasreh, M., & Alkhalidi, A. (2024). Waste-to-energy barriers and solutions for developing countries with limited water and energy resources. *Science of The Total Environment*, 926, 172096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172096>
- Lutz, W., & Kc, S. (2010). Dimensions of global population projections: What do we know about future population trends and structures? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2779–2791. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0133>
- Misganaw, A., & Teffer, B. (2022). An assessment of the waste-to-energy potential of municipal solid wastes in Ethiopia. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101180. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101180>
- Ouda, O. K. M., Raza, S. A., Nizami, A. S., Rehan, M., Al-Waked, R., & Korres, N. E. (2016). Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>
- Pandey, A. K., Gaur, V. K., Udayan, A., Varjani, S., Kim, S.-H., & Wong, J. W. C. (2021). Biocatalytic remediation of industrial pollutants for environmental sustainability: Research needs and opportunities. *Chemosphere*, 272, 129936. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129936>
- Pourali, M. (2009). Application of plasma gasification technology in waste to energy challenges and opportunities. *2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SAE.2009.5534883>
- Rhofita, E. I. (2024). *Valorisasi Municipal Solid Waste (MSW)* (1st ed.). UINSA Press.
- Salah, W. A., Abuhelwa, M., Abusafa, A., & Bashir, M. Jk. (2023). The feasibility of renewable energy recovery from municipal solid wastes in Palestine based on different scenarios. *Biofuels*, 14(5), 499–507. <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2151428>
- Shi, H., Mahinpey, N., Aqsha, A., & Silbermann, R. (2016). Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, 48, 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.036>
- United Nations Environment Programme & International Solid Waste Association. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>
- Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>
- Williams, P. A., Narra, S., Antwi, E., Quaye, W., Hagan, E., Asare, R., Owusu-Arthur, J., & Ekanthalu, V. S. (2023). Review of Barriers to Effective Implementation of Waste and Energy Management Policies in Ghana: Implications for the Promotion of Waste-to-Energy Technologies. *Waste*, 1(2), 313–332. <https://doi.org/10.3390/waste1020021>
- 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>
- Ye, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Varjani, S., Ding, A., Bui, X.-T., & Nguyen, D. P. (2021). Bio-membrane based integrated systems for nitrogen recovery in wastewater treatment: Current applications and future perspectives. *Chemosphere*, 265, 129076. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129076>
- Zhang, D., Huang, G., Xu, Y., & Gong, Q. (2015). Waste-to-Energy in China: Key Challenges and Opportunities. *Energies*, 8(12), 14182–14196. <https://doi.org/10.3390/en8121422>