

Dampak Lingkungan dari Teknologi Pengolahan Sampah Menjadi Energi di Indonesia: Perspektif *Life Cycle Assessment*

Amelinda Dhiya Farhah*, Mochammad Chaerul, Haryo Satriyo Tomo

Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung

*Koresponden email: amelindadhiya@gmail.com

Diterima: 25 Februari 2025

Disetujui: 7 Maret 2025

Abstract

The principle of reduce, reuse, recycle (3R) serves as the main reference in waste management, but further efforts are needed to handle non-recyclable materials. Based on the waste management hierarchy, the next step is energy recovery through waste-to-energy (WtE). WtE technology can generate renewable energy as a substitute for fossil fuels while reducing waste disposal in landfills. Various WtE technology options are available, depending on the heterogeneous characteristics of waste. According to the Ministry of Public Works and Housing, waste treatment technologies in Indonesia include physical, biological-chemical, and thermal processes. Although WtE offers benefits, its potential impacts must also be considered. This study reviews trends in Indonesia regarding the use of the life cycle assessment (LCA) method as a tool for evaluating different WtE technologies from an environmental perspective. The review covers the analyzed functional units, selection of impact categories, supporting software, and the application of sensitivity analysis and data uncertainty. The findings from LCA applications can assist policymakers in designing sustainable WtE management strategies.

Keywords: *refuse derived fuel, waste management, co-firing, impact assessment, sensitivity analysis*

Abstrak

Prinsip *reduce, reuse, recycle* (3R) ditetapkan sebagai acuan utama dalam penanganan permasalahan sampah. Namun, masih diperlukan upaya yang lebih *advance* dalam menangani timbulan material yang tidak dapat didaur ulang. Mengacu kepada hirarki pengelolaan sampah, tahap berikutnya dalam pengolahan sampah yakni pemulihan energi atau *waste to energy* (WtE). Pengolahan sampah menjadi energi dapat menghasilkan energi terbarukan untuk substitusi bahan bakar fosil dan mereduksi timbulan sampah yang dibuang ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Ada berbagai jenis pilihan teknologi WtE untuk menghasilkan produk pengolahan yang optimal bergantung pada karakteristik sampah yang heterogen. Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, basis teknologi pengolahan sampah yang ada di Indonesia terbagi menjadi proses fisik, biologi-kimia, dan termal. Dari segi manfaat yang ditawarkan dalam pengolahan WtE, perlu dipertimbangkan juga potensi dampak yang ditimbulkannya. Kajian ini ditujukan untuk meninjau tren di Indonesia mengenai bagaimana metoda *life cycle assessment* (LCA) dapat menjadi instrumen yang tepat dalam perspektif lingkungan untuk mengevaluasi berbagai pilihan teknologi pengolahan WtE. Metoda LCA yang dikaji melingkupi unit fungsional yang dianalisis, pemilihan kategori dampak, *software* penunjang, serta penerapan analisis sensitivitas dan ketidakpastian data. Hasil dari aplikasi LCA memungkinkan para pembuat kebijakan untuk merancang pengelolaan WtE yang berkelanjutan dan/atau mencari peluang perbaikan sistem kedepannya.

Kata Kunci: *refuse derived fuel, pengelolaan sampah, co-firing industri, penilaian dampak, analisis sensitivitas*

1. Pendahuluan

Peningkatan jumlah timbulan sampah sejalan dengan pertumbuhan populasi dan perubahan pola konsumsi masyarakat, terutama di tengah pesatnya urbanisasi saat ini [1]. Permasalahan pengelolaan sampah tetap menjadi tantangan utama di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, sebagai dampak dari aktivitas sosial dan ekonomi [2]. Beberapa kendala yang dihadapi dalam pengelolaan sampah di Indonesia meliputi keterbatasan jangkauan layanan, infrastruktur yang belum merata, serta keterbatasan teknologi. Sebagai upaya penanganan, Undang-Undang Pengelolaan Sampah No. 18 Tahun 2008 mengamanatkan penerapan prinsip *reduce, reuse, recycle* (3R) sebagai pedoman utama dalam pengelolaan sampah. Lingkup sampah yang dikelola mencakup sampah rumah tangga dan sampah sejenis rumah tangga sebagaimana diatur dalam Peraturan Pemerintah (PP) No. 81 Tahun 2012, serta sampah spesifik sesuai dengan PP No. 27 Tahun 2020. Selanjutnya, PP No. 97 Tahun 2017 menetapkan arah Kebijakan dan

Strategi Nasional (Jakstranas) dalam pengelolaan sampah di Indonesia, dengan target pengurangan sampah sebesar 30% dan penanganan sampah hingga 70% pada tahun 2025.

Namun, masih diperlukan upaya penanganan sampah yang lebih *advance* dalam menangani timbulan material yang tidak dapat digunakan kembali dan tidak dapat didaur ulang [3]. Mengacu kepada hirarki pengelolaan sampah, tahap berikutnya dalam pengolahan sampah yakni pengolahan untuk pemulihan energi [4]. Pemulihan energi dapat menghasilkan energi terbarukan, pemulihan material organik, dan reduksi timbulan sampah untuk dibuang langsung ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) [5]. Proses untuk menghasilkan energi dalam bentuk listrik ataupun panas dari pengolahan limbah, atau mengolah limbah menjadi sumber bahan bakar dikatakan sebagai *waste-to-energy* (WtE) [6]. Teknologi WtE dikatakan mampu mereduksi volume sampah secara efektif dan efisien apabila dipertimbangkan dengan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan [7]. Sehingga, perencanaan penanganan sampah dengan teknologi ini memiliki potensi yang optimal ditinjau dari aspek pengolahan maupun manfaat produk yang dihasilkan.

Indonesia telah mengimplementasikan penanganan sampah menjadi energi dengan proses konversi termal melalui pembakaran. Potensi pencemaran udara dari kegiatan pengolahan sampah secara termal dibatasi dengan diterbitkannya Peraturan Menteri Lingkungan Hidup no. 70 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Emisi Kegiatan Pengolahan Sampah Termal. Parameter pencemar yang ditinjau adalah Total Partikulat, SO₂, NO_x, HCl, Hg, CO, HF, serta dioksin dan fluran. Dari segi manfaat yang ditawarkan dalam pilihan teknologi pengolahan sampah, perlu dipertimbangkan juga potensi dampak negatif yang ditimbulkannya. Akselerasi pengolahan WtE di Indonesia diprakarsai melalui Peraturan Presiden No 35 Tahun 2018 mengenai Pembangunan Instalasi Pengolah Sampah Menjadi Energi Listrik berbasis Teknologi Ramah Lingkungan. Ada berbagai jenis teknologi WtE yang dapat dipilih untuk menghasilkan produk pengolahan yang optimal bergantung pada kesesuaian karakteristik sampah (sebagai bahan baku) yang heterogen [8].

Berbagai studi telah dilakukan untuk meninjau bagaimana potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari berbagai opsi pengolahan sampah. Mengacu kepada [9], salah satu instrumen untuk mengevaluasi pilihan pengelolaan limbah dan merencanakan pendekatan berkelanjutan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). Penilaian daur hidup suatu produk telah digunakan secara luas untuk mengevaluasi maupun memperkirakan kinerja lingkungan dari berbagai pilihan teknologi pengelolaan sampah. [10] melakukan pengukuran dan menginventarisasi kinerja dari teknologi WtE termal di Eropa. [11] menyelidiki dampak lingkungan dari enam pilihan teknologi WtE di India dan membandingkan kemampuan potensi pemulihan energinya. Adapula [1] yang menilai dampak lingkungan dari skenario integrasi pengolahan sampah seperti daur ulang sampah, pengomposan, insinerasi, dan pemulihan gas TPA (*landfill with gas recovery*; LFG) untuk proyeksi penanganan sampah tahun 2025 pada 34 ibu kota di Indonesia.

Beberapa tahun ke belakang, studi penerapan instrumen LCA dalam pengelolaan sampah khususnya WtE di Indonesia mengalami perkembangan yang signifikan. Kajian ini bertujuan untuk meninjau tren dan perspektif terbaru dalam penerapan LCA sebagai instrumen evaluasi lingkungan terhadap berbagai pilihan teknologi WtE. Melalui analisis studi yang diperoleh dari pencarian literatur dalam *database Google Scholar*, penelitian ini berupaya mengidentifikasi dan mengisi kesenjangan metodologi dalam studi LCA di Indonesia, seperti penetapan ruang lingkup analisis (*cradle-to-gate* hingga *cradle-to-grave*), transparansi dalam inventarisasi data, pemanfaatan perangkat lunak pendukung, serta penerapan analisis sensitivitas dan ketidakpastian data. Hasil kajian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan penerapan LCA di Indonesia, khususnya dalam menilai keberlanjutan teknologi WtE.

2. Metode Penelitian

Kajian ini bertujuan untuk meninjau tren dan perkembangan terbaru dalam penerapan metode LCA untuk mengevaluasi berbagai teknologi WtE di Indonesia dari perspektif lingkungan. Studi ini dilakukan melalui penelusuran literatur menggunakan kata kunci "*Waste-to-Energy*" AND "Indonesia" AND "*Life Cycle Assessment*" serta "*Refuse Derived Fuel* (RDF) *Plant*" AND "Indonesia" AND "*Life Cycle Assessment*" pada *database Google Scholar* yang dipublikasikan dalam bahasa Inggris. Seleksi literatur dilakukan dengan beberapa kriteria, yaitu rentang publikasi dalam 10 tahun terakhir (2014–2024), akses terbuka (*open access*), fokus studi di Indonesia, dan hanya mencakup kajian LCA yang berkaitan dengan pengolahan *municipal solid waste* (MSW). Proses pemilihan literatur dilakukan melalui pembacaan menyeluruh untuk memastikan relevansi terhadap evaluasi dampak lingkungan dari berbagai teknologi konversi sampah. Kemudian, dilakukan analisis perbandingan untuk mengidentifikasi kesenjangan metodologi dalam studi LCA WtE di Indonesia, seperti cakupan batasan sistem (*cradle-to-gate* hingga *cradle-to-grave*), transparansi inventarisasi data, perangkat lunak yang digunakan, serta penerapan analisis sensitivitas dan ketidakpastian data. Studi ini diharapkan dapat berkontribusi dalam mengarahkan penelitian

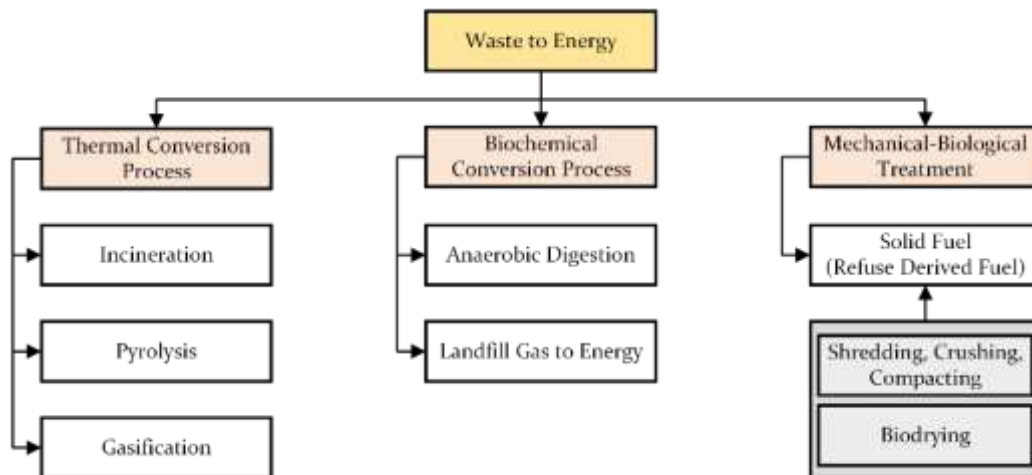
masa depan terkait LCA untuk menilai keberlanjutan teknologi WtE di Indonesia serta menjembatani pengelolaan limbah dengan praktik energi berkelanjutan.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengelolaan Waste to Energy

Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2018), basis teknologi pengolahan sampah yang ada di Indonesia ini terbagi menjadi proses fisik, biologi kimia, dan termal. Basis pengolahan WtE untuk penerapan teknologi termal antara lain adalah insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis. Sedangkan, penerapan teknologi biologis atau biokimia antara lain adalah *anaerobic digestion*, dan *landfill gas recovery* (LFG). Sementara, penerapan teknologi fisik adalah pengolahan *mechanical-biological treatment* (MBT) untuk pembentukan *refuse derived fuel* (RDF).

Sifat penting yang menjadi pertimbangan sampah kota dapat digunakan dalam proses *energy recovery* adalah nilai kalor (*calorific value*), yakni kandungan energi dalam limbah yang dinyatakan dengan *net calorific value* (NCV), nilainya beragam dan bergantung jenis komposisi sampah, kondisi wilayah, iklim dan teknologi pengolahan yang digunakan [13]. Produk yang dihasilkan dari pengolahan sampah ini juga beragam bergantung kepada jenis prosesnya, sehingga perannya untuk konservasi energi dipengaruhi oleh kebutuhan bahan bakar dari teknologi pembakaran suatu industri. Seperti halnya *heat* dan *flue gas* dapat dimanfaatkan sebagai energi bagi pembangkit listrik [14], sementara biomassa padat cenderung lebih cocok untuk substitusi batubara bagi industri semen [13].



Gambar 1: Ragam teknologi dalam proses konversi sampah menjadi energi

Pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSA) pertama di Indonesia memiliki kapasitas 1000 ton sampah per hari untuk menghasilkan listrik hingga 12 *Megawatt* (MW) [15]. PLTSA ini resmi beroperasi pada bulan Mei 2021 dan secara drastis meningkatkan pengelolaan sampah di Surabaya, dengan teknologi LFG dipilih sebagai solusi untuk menangani timbulan gas metana di TPA Benowo. Instalasi WtE berhasil menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) sebanyak 57,1% ditinjau menggunakan metoda LCA yang dibandingkan dengan pengelolaan sampah *open dumping* (tanpa LFG). Menurut [16], gas yang dihasilkan dapat menghindari potensi dampak dari konsumsi listrik pembangkit dengan menurunkan indikator nilai *Global Warming Potential* (GWP) dengan rata-rata 15%, dan merupakan opsi teknologi yang lebih rendah dampaknya dibandingkan pengolahan termal.

Studi peninjauan potensi dampak lingkungan terhadap teknologi WtE di Indonesia diawali oleh [17], yang membandingkan berbagai opsi valorisasi energi dengan metoda LCA. Penelitiannya mengkaji perbandingan penimbunan sampah di TPA tanpa pemulihan energi sebagai representasi dari pengelolaan sampah saat itu, dengan modeling skenario terhadap teknologi LFG, kombinasi insinerasi dan penguraian anaerob, kombinasi gasifikasi dan penguraian anaerob, insinerasi langsung, dan gasifikasi langsung untuk area Yogyakarta, Sleman, Bantul di provinsi Yogyakarta. Studi ini mengkaji modelling teknologi melalui penilaian dan perbandingan dampak dari berbagai pilihan teknologi secara jelas, dari metoda pengambilan data komposisi sampah hingga bagaimana beban lingkungan diestimasi, klasifikasi dampak dari setiap teknologi, serta sensitivitas data terhadap perubahan komposisi sampah.

Teknologi insinerasi paling banyak ditemukan sebagai perbandingan modelling LCA dari berbagai pilihan teknologi WtE, yakni di Kota Denpasar [18]; Kota Cirebon [19]; Lombok [16]; Kota Makassar [20];

dan Kabupaten Batang [21]. Dalam penanganan konservasi termal, gasifikasi merupakan metode yang paling ramah lingkungan dibanding dua opsi teknologi lainnya [17], [18]. Adapun [10] yang mengidentifikasi dampak lingkungan teknologi termal di Eropa, menyatakan bahwa insinerasi berdampak paling tinggi dibandingkan pirolisis dan gasifikasi.

Sedangkan, teknologi *Refuse Derived Fuel* (RDF) baru ditemukan dalam tiga kajian di Cirebon [19]; di Yogyakarta [22]; dan di Surabaya [15]. Beberapa studi terkait potensi dampak lingkungan yang dikaji dengan metoda LCA terhadap evaluasi dari implementasi produksi RDF di Indonesia juga telah dipublikasikan pada laman lembaga institusi pendidikan antara lain adalah implementasi Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) RDF Jeruklegi di Kabupaten Cilacap [23] dan RDF di TPA Ngipik Gresik [24]. Namun, publikasi ini tidak aksesibel untuk umum.

Refuse derived fuel

Refuse Derived Fuel (RDF) adalah bahan bakar alternatif dari sampah perkotaan yang diproses secara mekanis dengan memisahkan material non-kombustibel yang kemudian akan menghasilkan material bentuk *fluff* atau *pellet* [25]. Produksi RDF dapat menangani timbulan material yang tidak dapat digunakan kembali dan tidak dapat didaur ulang [3]. Selain mengurangi beban TPA dan peningkatkan penanganan sampah, RDF yang diproduksi dari sampah rumah tangga juga berperan sebagai pilihan konservasi energi [26], mereduksi dampak lingkungan dari opsi pengolahan WtE lainnya [11], dan alternatif substitusi bahan bakar fosil sebagai *energy recovery* [27]. [28] juga menyatakan bahwa produksi RDF dari MSW merupakan salah satu cara untuk mencapai ekonomi sirkular karena mendorong perputaran material dan energi sebagai salah satu opsi substitusi sumber energi terbarukan.

Berdasarkan [19], cara pengolahan RDF dilakukan secara mekanis seperti *screening*, *magnetic separation*, dan *air classification* yang dimaksudkan untuk pemilahan awal sampah guna memisahkan sampah *recyclable*, botol, residu plastik, maupun material lainnya berdasarkan massa jenis sampah. Sementara, pengolahan dengan *shredding*, *crusher*, dan peletisasi dimaksudkan untuk melakukan pencacahan sekaligus pengeringan hingga sampah berukuran < 5 mm dan kadar air <10%. Namun, menurut [25], kebutuhan untuk produksi RDF memerlukan campuran komposisi antara material sampah anorganik dan organik, yang biasanya dikenal dengan konsep *mechanical-biological treatment* (MBT).

Biodrying merupakan bagian penting dari proses pengolahan mekanis-biologis untuk meminimalkan kadar air dan sekaligus memaksimalkan nilai kalor untuk produksi bahan bakar turunan sampah menjadi RDF [29]. Siklus proses umumnya memerlukan waktu 7–15 hari, dengan sebagian besar H₂O (g) dan CO₂ hilang sekitar 25–30% *wet/weight*, yang menyebabkan penurunan kadar air hingga <20% *wet/weight* [30]. Kadar air ini berkurang karena proses evaporasi dan akan adanya pembentukan lindi selama proses *biodrying*, sehingga diperlukan optimalisasi laju aerasi untuk meminimalkan timbulnya lindi yang akan berbahaya bagi lingkungan [29].

Berdasarkan *American Standard Testing and Material* (ASTM E856-83), terdapat 7 (tujuh) jenis RDF yang diklasifikasikan sesuai dengan bentuk dan proses pemilahan awal RDF. Sementara saat ini, Indonesia telah memiliki SNI 8966:2021 tentang Bahan Bakar Jemputan Padat (BBJP) untuk Pembangkit Listrik yang diinisiasi oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) dan Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai standar bahan bakar sejenis RDF untuk *co-firing* dengan batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Istilah BBJP digunakan untuk merujuk pada RDF yang telah memenuhi standar tertentu, yakni perbedaan karakteristiknya yang signifikan terhadap spesifikasi kandungan organik yang ditinjau.

Tabel 1. Pemenuhan standar RDF di Indonesia

Parameter	Unit	SNI 8966:2021			Preliminary Study		
		Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Jakarta ^a	Aceh ^b	Bali ^c
Kandungan organik	% w/w	> 95	87.5≤x< 95	80≤x<87.5	-	-	-
Kadar abu	% w/w	<15	<20	<25	24.19	9.2	2.2
Kadar air	% w/w	<15	<20	<25	6.08	6.4	3.8
Kadar Volatile	% w/w max	65	70	75	34.08	75.58	N/A
Karbon Tetap	% w/w	>15	>10	>5	7.24	8.82	N/A
<i>Net Calorific Value</i>	kcal/kg	≥4,780	≥3,585	≥2,390	2,675.44	5,961.59	3,904
Sulfur	% w/w	≤1.5	≤1.5	≤1.5	0.36	1.89	2.6
Klorin	% w/w	≤0.2	≤0.6	≤1	0.74	-	-

Sumber: ^a Wiharja dkk. (2024); ^b Dianda dkk. (2018); ^c Suryawan dkk. (2021)

Potensi teknologi RDF di Indonesia ini pertama kali di evaluasi oleh Pengolahan RDF di Cirebon yang diinisiasi oleh salah satu pabrik semen yang mendirikan unit pengelolaan limbah di salah satu desa binaan untuk menghasilkan RDF. Kajian yang dilakukan oleh [19], menunjukkan bahwa nilai kalor *fluff* RDF yang dihasilkan sekitar 3,883 kkal/kg (67% dari batubara), sedangkan total substitusi konsumsi kalor sekitar 7% dari penggunaan batubara. Dalam Wardhana (2023), pemanfaatan RDF yang dihasilkan di TPST RDF Jeruklegi sebagai diversifikasi energi di PT Solusi Bangun Indonesia Tbk (PT. SBI), terbukti dapat menurunkan emisi CO₂ sebesar 3,2% per produksi klinker dan 3% per ton semen yang dihasilkan. Dengan adanya *preliminary study* terhadap karakteristik RDF skala labortorium dari berbagai sumber MSW di Indonesia, menunjukkan bahwa representatif nilai NCV sangat berpotensi sebagai bahan baku RDF yang terdapat pada **Tabel 1**.

[31] telah mengevaluasi kelayakan penggantian batu bara dengan bahan RDF untuk 13 pabrik semen yang tersebar di 11 wilayah Pulau Jawa, Indonesia. Dengan mengkonversi hingga 30% MSW menjadi RDF di Pulau Jawa, menunjukkan adanya pengalihan hingga 8.7 juta ton MSW dari TPA setiap tahunnya yang mengurangi emisi GRK hingga 2.77 juta *Gigagram* CO₂-eq, dengan potensi penghematan biaya tahunan sebesar \$421 juta terhadap konsumsi batu bara hingga 2,513,000 ton/tahun. Sehingga, teknologi WtE melalui produksi RDF memiliki potensi yang signifikan untuk dipertimbangkan dalam penanganan permasalahan sampah.

Life cycle assessment dari teknologi WtE

Rantai pasokan global yang kompleks, teknologi produksi, dan pola konsumsi perekonomian modern menyebabkan banyak dampak lingkungan. Untuk mengidentifikasi strategi perbaikan yang paling efektif dan menghindari perpindahan beban dari satu dampak lingkungan ke dampak lingkungan lainnya, semua dampak yang terjadi di seluruh rantai nilai pasokan (ditambah fase penggunaan dan pembuangan) harus diperhitungkan. Menurut [34], hal inilah yang menjadi tujuan LCA, yakni metode untuk menilai secara kuantitatif dampak lingkungan suatu produk dari hulu ke hilir melalui pemodelan hubungan sebab-akibat dalam perspektif sistem.

Dalam [35], dijelaskan bahwa instrumen LCA diawali pada 1970 untuk analisis energi dan kemudian berkembang menjadi analisis beban lingkungan yang komprehensif. Penilaian dampak dari siklus hidup beserta pemodelan biaya siklus hidup diperkenalkan pada tahun 1980an dan 1990an. Hingga saat ini LCA semakin berkembang ke ranah pemodelan sosial dan berkembang menjadi analisis siklus hidup berkelanjutan [12]. Instrumen LCA ini menjadi alat yang mendukung keputusan berwawasan lingkungan dalam pengembangan dan pengoptimalan pengadaan produk serta merancang kebijakan pola konsumsi dan produksi berkelanjutan, melalui peninjauan perspektif pada area dengan dampak negatif yang signifikan dan potensi perbaikan yang dapat dilakukan [36].

Kerangka umum LCA terdiri dari empat fase utama sebagaimana dalam *International Organization for Standardization* (ISO) 14040: 2006 yang merupakan acuan internasional, yaitu pendefinisian tujuan dan ruang lingkup, analisis inventarisasi siklus hidup (*Life Cycle Inventory*: LCI), penilaian dampak siklus hidup (*Life Cycle Impact Assessment*: LCIA) dan interpretasi hasil. Tahapan lainnya adalah pelaporan dan tinjauan kritis LCA, batasan LCA, hubungan antara tahapan LCA, serta ketentuan penggunaan pilihan nilai dan elemen lainnya. Badan Standardisasi Nasional Indonesia juga telah menetapkan 2 Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk dijadikan panduan bagi pelaku usaha dalam menerapkan LCA, yakni SNI 14040:2016 (Manajemen Lingkungan: Penilaian daur hidup: Prinsip dan kerangka kerja), dan SNI 14044:2017 (Manajemen Lingkungan: Penilaian daur hidup: Persyaratan dan panduan).

Penilaian dari siklus daur hidup suatu proses atau produk dan hasil LCA mampu mengakomodasi pertukaran yang terjadi ketika mencari potensi keberlanjutan yang optimal untuk sistem seperti WtE yang bergantung pada berbagai prioritas pemangku kepentingan khususnya pada atribut lingkungan dari beragam pilihan teknologi [12]. Setiap teknologi WtE memiliki kelebihan dan kekurangan dimana satu teknologi tertentu biasanya tidak dapat menangani semua limbah. Oleh karena itu, sistem terintegrasi yang menggabungkan berbagai teknologi WtE dan pengelolaan sampah diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemulihan energi dan material secara keseluruhan, terutama untuk sampah dengan tingkat kompleksitas yang tinggi.

Seiring dengan berkembangnya pilihan teknologi pengolahan sampah, [37] mengidentifikasi berbagai dampak lingkungan yang timbul dari siklus pengolahan sampah yang diidentifikasi dengan metoda LCA. Kajian LCA terhadap berbagai pilihan teknologi di Indonesia juga telah diidentifikasi dari 9 publikasi sebagaimana terlampir pada **Tabel 2**. Cakupan yang akan dikaji adalah terkait tujuan dan ruang lingkup LCA, teknologi WtE yang dipilih, perangkat lunak untuk melakukan pemodelan LCA, metoda karakterisasi dan normalisasi, klasifikasi kategori dampak, serta penerapan analisa ketidakpastian dan analisa

sensitivitas. Dalam [38], beberapa permasalahan kritis yang perlu mendapat perhatian lebih jauh untuk peningkatan kualitas studi LCA di Indonesia, adalah terkait ruang lingkup yang terlalu sempit, data inventori dan prosedur alokasi yang tidak dijelaskan, penarikan kesimpulan yang melebihi hasil kajian, penerapan analisa ketidakpastian dan analisa sensitivitas, dan transparansi laporan.

Berdasarkan peninjauan ruang lingkup penelitian, hanya 4 literatur terpilih yang secara eksplisit menerangkan batasan sistem yang diperhitungkan dalam kajian LCA. Batasan sistem *gate-to-gate* paling banyak diterapkan. Berdasarkan literatur terkait, cukup banyak perspektif untuk menentukan ruang lingkup *gate-to-gate* dalam penanganan sampah. Menurut [22] dan [18], batasan sistem *gate-to-gate* dimulai dari sampah yang masuk ke setiap proses hingga menjadi produk tanpa melihat alur proses sampah dari sumber hingga pengangkutan. Sementara, menurut [21], batasan sistem *gate-to-gate* dimulai sampah di sumber yang diangkut ke Tempat Pengumpulan Sementara (TPS). Merujuk kepada tinjauan WtE dengan metoda LCA di Brazil [26]; di India [11]; dan di Itali [27], kajian yang dimulai dari sumber sampah diangkut menuju ke TPS ditinjau sebagai ruang lingkup *cradle to gate*. Sementara ruang lingkup kajian *to grave* akan mengukur dampak dari pemakaian produk baru yang dihasilkan dari teknologi WtE, seperti substitusi batubara dengan RDF atau substitusi konsumsi listrik.

1. Metoda pengukuran dampak

Unit fungsional mendefinisikan aspek kualitatif dan mengkuantifikasi aspek kuantitatif yang diperlukan sebagai ukuran dasar dari sistem produk yang ditinjau [39]. Hal ini berkaitan dengan kebutuhan *input* (material, energi, dan sumber daya) dan besaran *output* (produk, pengolahan limbah, dan emisi) yang dihasilkan per unit yang dipilih dalam batasan sistem yang ditinjau. Dalam pengolahan WtE yang telah dimodelkan dalam 9 literatur terpilih, terdapat variasi penggunaan unit fungsional bergantung kepada objek yang akan ditinjaunya. Unit fungsional untuk 1 ton sampah yang diolah paling banyak digunakan [17], [19], [20], [21], dan [22]. Sementara, unit fungsional untuk total timbulan harian sampah perkotaan juga digunakan [1], dan [15].

Sementara, teknik pengolahan data menggunakan perangkat lunak untuk melakukan pemodelan LCA lebih banyak yang menggunakan OpenLCA karena bersifat *open source* [18], [19], dan [22]. Adapun opsi *software* lainnya adalah menggunakan SimaPro [21] dan GaBi [1]. Namun, kalkulasi dampak juga dapat dilakukan secara manual menggunakan *Microsoft Excel*. Biasanya setiap perangkat lunak sudah menyediakan *database* sebagai *background* data yang dapat digunakan untuk pemodelan LCA. Setelah kebutuhan aliran material input dan output diinventarisasi, selanjutnya adalah pemilihan metoda penilaian dampak LCIA. Dalam [39], terdapat lebih dari 10 metoda LCIA diantaranya adalah CML 2001, *Eco-Indicator* 99, TRACI, IMPACT World+, ILCD, ReCiPe, dan lainnya. Apabila didasari pada peninjauan literatur, metoda CML IA Baseline paling banyak digunakan dalam kajian pengolahan WtE. CML-IA adalah *database* yang berisi faktor karakterisasi dan normalisasi LCIA yang populer digunakan [6] dan dapat diakses secara gratis (*open sources*) [35].

Tabel 2. Studi LCA terpilih dari implementasi WtE di Indonesia

Referensi Teknologi WtE**	Unit Fungsional (FU) dan Batasan Sistem (SB)	Metoda LCIA	Kategori Dampak***
Yogyakarta, Sleman, Bantul [17] S1: OD, S2: IN & AD, S3: GS & AD, S4: DI, S5: DG	SB: tidak disebutkan secara spesifik, namun cakupannya mulai dari proses pengelolaan sampah hingga menghasilkan produk. FU: 1 ton sampah yang diolah	Software: Tidak disebutkan Karakterisasi: Tidak disebutkan Analisis Sensitivitas: Perubahan dari berbagai variasi input sampah organik	GWP AP EP POCP
Yogyakarta [22] <i>fluff</i> RDF (fRDF) dan <i>densified</i> RDF (dRDF)	SB: <i>gate to gate</i> , terbatas pada proses pengolahan sampah padat menjadi RDF yang dipadatkan FU: 1 kWh energi yang dihasilkan dari RDF	Software: Open LCA dengan standar <i>ecoinvent database</i> . Characterization: CML IA Baseline	GWP AP EP HTP TETP
Cirebon [19] S1: OD, S2: IN S3: dRDF	SB: <i>gate to gate</i> , mulai dari pengangkutan sampah di sumber hingga proses akhir, dan pengolahan sampah hingga pengangkutan produknya ke off taker. FU: 1 kg sampah yang diolah	Software: OpenLCA dan standar <i>ecoinvent database</i> Karakterisasi: CML Baseline Normalisasi dan Pembobotan: CML - World 2000 Analisis Sensitivitas: Perubahan terhadap nilai jarak tempuh pengangkutan	GWP AP EP HTP ODP
34 Ibukota di Indonesia [1] S1: RC-CO 12.5%, IN-LFG 37.5% S2: RC 15%, CO 10%, IN 50%, LFG 25% S3: RC 10%, CO 15%, IN 25%, LFG 50% S4: RC 20%, CO 5%, IN 75% S5: RC 20%, CO 5%, LFG 75%	SB: tidak disebutkan FU: timbulan sampah harian	Software: GaBi 9.5.2 Karakterisasi: CML 2001 ver. 2016	ADP elements; ADP fossil; AP; EP; FAETP; GWP100; GWP100 excl. biogenic carbon; HTP; MAETP; ODP; POCP; and TETP
Kota Denpasar [18] S1: Thermal (PR, GS, IN) S2: OD	SB: <i>gate to gate</i> , Dimulai dari limbah yang masuk ke setiap proses tanpa melihat alur proses limbah dari sumber hingga pengangkutan FU: timbulan sampah di TPA	Software: OpenLCA 1.9 Karakterisasi dan Normalisasi: EPD 2013 and BEES+	GWP AP EP POCP

Referensi Teknologi WtE**	Unit Fungsional (FU) dan Batasan Sistem (SB)	Metoda LCIA	Kategori Dampak***
Lombok [16] S1: GS, IN, LFG S2: HSD Plant S3: Pembangkit Listrik (Batubara)	SB: tidak disebutkan secara spesifik, cakupannya mulai dari persiapan material, pengangkutan dan pengumpulan, konstruksi, dan tahap operasi pabrik FU: 1 kWh listrik	Software: Tidak disebutkan Karakterisasi: CML IA Baseline Analisis Sensitivitas: Perubahan deviasi terhadap konversi efisiensi energi sebesar $\pm 20\%$ untuk GWP, AP, dan POCP Analisis Ketidakpastian: Perubahan efisiensi energi dengan Simulasi Monte Carlo	GWP AP HTP EP POCP
Kota Surabaya [15] S0: OD S1: CO, RC, LFG S2: GS S3: CO, RC, RDF	SB: tidak disebutkan secara spesifik, namun cakupannya mulai dari proses pengelolaan sampah hingga menghasilkan produk. FU: Timbulan sampah tahun 2020	Software: Tidak disebutkan Karakterisasi: Tidak disebutkan Analisis Sensitivitas: Perubahan terhadap komposisi sampah yang diolah (perbandingan antar tahun)	GHG Emission
Kota Makassar [20] S0: OD 95%, CO 5% S1: CO 10%, IN 60%, LFG 30% S2: CO 10%, IN 30%, LFG 60% S3: CO 15%, IN 85% S4: CO 15%, LFG 85% S5: CO 10%, IN 45%, LFG 45%	SB: tidak disebutkan secara spesifik, dimulai dengan pengumpulan dan pengangkutan sampah dari sumbernya ke fasilitas pengolahan. FU: 1 ton sampah	Software: Tidak disebutkan Karakterisasi: Tidak disebutkan	GWP

* S1,2,3 dimaksudkan sebagai pengembangan skenario WtE yang saling dibandingkan

**Teknologi Pengolahan = OD (*Open Dumping*); LFG (*Landfill Gas Recovery*); IN (*Incineration*); DI (*Direct Incineration*); GS (*Gasification*); DG (*Direct Gasification*); PR (*Pyrolysis*); AD (*Anaerobic Digestion*); RDF (*Refuse Derived Fuel*); CO (*Composting*); RC (*Recycling*)

***Kategori Dampak = *Abiotic Depletion Potential for Non-Fossil Resources* (ADP elements); *Abiotic Depletion* (ADP fossil); *Acidification Potential* (AP); *Eutrophication Potential* (EP); *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential* (FAETP); *Global Warming Potential* (GWP100); *Global Warming Potential excluding biogenic carbon* (GWP100 excl. biogenic carbon); *Human Toxicity Potential* (HTP); *Marine Aquatic Ecotoxicity* (MAETP); *Ozone Layer Depletion Potential* (ODP); *Photochemical Ozone Creation Potential* (POCP); dan *Terrestrial Ecotoxicity Potential* (TETP)

2. Klasifikasi kategori dampak

Pemanasan global adalah konsekuensi dari peningkatan suhu akibat emisi gas rumah kaca, termasuk CO₂, CH₄, N₂O, dan senyawa perangkap panas lainnya [19]. Kontributor utama untuk dampak GWP biasanya berasal dari pembakaran, dekomposisi sampah, teknologi pengolahan mekanis dan biologis, dan proses transfer sampah. Faktor ekivalensi diperlukan untuk menyetarakan berbagai substansi kontributor menjadi satu unit yang sama dalam satu kategori dampak, yakni CO₂-eq.

Asidifikasi berkaitan dengan pelepasan anion yang keluar sistem akibat dari logam berat dan aluminium. Potensi asidifikasi ini dihitung sebagai efek yang dihasilkan oleh SO₂-eq. Air lindi maupun gas dari hasil degradasi sampah merupakan kontaminan potensial yang mempengaruhi kondisi lingkungan sekitar. [20] yang meninjau kombinasi kompos dan *anaerobic digestion*, menunjukkan nilai pemanasan global yang rendah namun kategori asidifikasi dan eutrofikasi yang lebih tinggi, dimana kontribusi emisi berasal dari proses pengomposan. Adapun dalam kompartemen udara, substansi emisi seperti NH₃, NO_x, SO₂, HCl, dan hidrogen fluorida, yang dilepaskan ke udara yang dapat bergabung dengan uap air di atmosfer dan akibatnya jatuh ke permukaan bumi sebagai 'hujan asam' [40]. Ketika air hujan tersebut diserap oleh tanaman, tanah, dan air permukaan, maka akan menyebabkan degradasi kualitas tanah, udara, dan air. Selain itu, pengasaman merupakan masalah kesehatan yang parah bagi manusia karena secara langsung mempengaruhi sistem pernapasan.

Dampak eutrofikasi diaktifkan oleh pelepasan senyawa berbasis nitrogen seperti amonia dan fosfat. Perhitungan dampak lingkungan eutrofikasi dinyatakan dalam NO₃-eq atau PO₄-eq [40]. Badan air diperkaya dengan mineral dan nutrisi tambahan, yang menyebabkan pertumbuhan ganggang yang berlebihan. Zat utama dalam sampah kota yang berkontribusi terhadap potensi eutrofikasi adalah fosfor dan amonium. Substansi emisi yang masuk ke dalam klasifikasi eutrofikasi antara lain adalah NH₃, NO_x, dan N₂O [19].

Potensi toksisitas pada manusia terjadi karena adanya efek zat beracun pada lingkungan yang berisiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan sekitarnya. Faktor utama yang menyebabkan dampak HTP adalah penggunaan bahan kimia maupun timbunan logam berat yang kemudian akan dihitung dampaknya dalam 1,4-diklorobenzena (DB) per kilogram emisi [40]. Substansi emisi yang masuk ke dalam klasifikasi HTP antara lain adalah PM₁₀, dan SO₂ [19].

Analisis sensitivitas dan ketidakpastian data

Masalah signifikan yang mempengaruhi penerapan LCA adalah ketidakpastian hasil, karena pilihan subjektif terutama terkait dengan data sekunder yang digunakan dalam inventarisasi siklus hidup atau metode penilaian dampak [41]. Untuk mengatasi hal ini, analisis sensitivitas dan ketidakpastian digunakan dalam interpretasi hasil LCA guna membantu memperkuat penarikan kesimpulan dan menunjukkan area penelitian lanjutan yang diperlukan dengan tepat [34].

Analisis ketidakpastian memungkinkan pengukuran sejauh mana ketidakpastian parameter individu mempengaruhi hasil akhir LCA, analisis ini memerlukan informasi statistik tentang parameter, seperti distribusi normal atau log-normal dan nilai statistik terkait seperti rata-rata dan standar deviasi [39]. Praktik terbaik adalah menggunakan analisis Monte Carlo dengan distribusi statistik yang terdokumentasi untuk setiap parameter, sehingga semua aspek ketidakpastian diperhitungkan dengan tepat.

Sementara itu, analisis sensitivitas adalah identifikasi sistematis terhadap parameter yang memiliki pengaruh tertinggi terhadap hasil LCIA [39]. Pengaruh parameter terhadap hasil dihitung dengan mengubahnya satu per satu dan mengamati perubahan hasil, untuk parameter kuantitatif dalam sistem, diperlukan pengumpulan nilai minimum dan maksimum, atau persentil rendah dan tinggi. Ataupun dengan menguji sensitivitas parameter melalui pengembangan sejumlah skenario sensitivitas.

Menurut [11], tahapan analisis sensitivitas dilakukan dengan melakukan perubahan nilai persentase pada parameter yang berkontribusi terhadap hotspot untuk menganalisis sensitivitas dampak terhadap parameter. Apabila berdasarkan ISO 14044:2006, sensitivitas dapat diukur dalam bentuk persentase perubahan atau deviasi absolut dari hasil yang diperoleh. Terjadinya perubahan nilai yang dianggap signifikan, seperti yang melebihi 10%, dapat diidentifikasi lebih lanjut. Adapun menurut hasil tinjauan sistematis dari kajian LCA tentang WtE oleh [6], sensitivitas data dapat dibagi menjadi dua kategori utama yakni, sensitivitas asumsi teknis yang terkait dengan teknologi pengolahan, dan sensitivitas asumsi metodologis yang terkait dengan pendekatan LCA.

Sensitivitas asumsi teknis yang terkait dengan teknologi pengolahan telah dilakukan oleh [16] yang mengevaluasi ketidakpastian pada teknologi WtE di Lombok dengan memodelkan efisiensi energi sebagai variabel yang terdistribusi secara normal dengan nilai rata-rata dan standar deviasi yang ditentukan untuk mencerminkan variabilitas dalam kondisi operasional di dunia nyata menggunakan Simulasi Monte Carlo

(MCS). Bahwa ada berbagai ketidakpastian dalam parameter input seperti kondisi operasional, dan faktor spesifik teknologi. Ketidakpastian ini juga dapat secara signifikan mempengaruhi kinerja lingkungan secara keseluruhan dari teknologi WtE.

Adapun dalam penelitian [15], analisis sensitivitas dilakukan dengan merubah nilai komposisi sampah yang diolah berdasarkan perbedaan tahun. Hasilnya menunjukkan bahwa data yang berbeda mempengaruhi perhitungan emisi GRK. Total emisi dari pengelolaan MSW bergeser dari 156,910.4 tonCO₂-eq menjadi 149,715.2 tonCO₂-eq. Sama halnya dengan yang dilakukan oleh [17], sensitivitas dampak diuji dengan merubah nilai komposisi sampah organik. Sedangkan [19] menguji sensitivitas dampak melalui perubahan jarak pengangkutan sampah, namun tidak terdapat penjabaran bagaimana penentuan nilai jarak tersebut berdampak terhadap hasil indikator lingkungannya.

Sementara, sensitivitas asumsi metodologis yang terkait dengan pendekatan LCA seperti membandingkan 2 metoda analisis kategori dampak, misalnya antara CML IA *Baseline* dengan ReCiPe *Midpoint* [6], belum teridentifikasi dalam 9 kajian LCA yang dipilih. Dari 4 kajian yang meninjau sensitivitas data berdasarkan asumsi teknis, 5 kajian lainnya belum melakukan penerapan analisa ketidakpastian dan analisa sensitivitas. Berdasarkan [34], analisa ini penting dilakukan karena pemetaan dan penilaian sistem yang ditinjau secara regional dapat mengurangi ketidakpastian dalam LCA dengan mempertimbangkan kondisi produksi yang spesifik serta sensitivitas ekosistem yang mendukung sistem secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

Penilaian dampak lingkungan dari teknologi *waste-to-energy* (WtE) di Indonesia menggunakan metode LCA menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki potensi besar dalam mengurangi timbulan sampah dan menggantikan bahan bakar fosil. Berbagai pilihan teknologi seperti insinerasi, gasifikasi, LFG, dan produksi RDF telah dianalisis dalam beberapa studi untuk mengevaluasi dampak lingkungannya. Hasil kajian menunjukkan bahwa RDF memiliki potensi sebagai solusi konservasi energi dan substitusi energi batu bara di industri semen, sementara teknologi termal seperti insinerasi dapat menghasilkan emisi yang lebih tinggi dibandingkan metode lain. Analisis sensitivitas dan ketidakpastian dalam beberapa studi LCA mengungkapkan bahwa variasi parameter seperti efisiensi energi, komposisi sampah, dan transportasi dapat mempengaruhi hasil penilaian dampak lingkungan. Untuk memastikan keberlanjutan teknologi WtE di Indonesia, diperlukan pendekatan sistem yang lebih terintegrasi dengan mempertimbangkan karakteristik sampah lokal, optimalisasi metode LCA, inventarisasi data primer, serta analisis sensitivitas yang lebih mendalam. Studi ini menunjukkan peran penting berbasis data yang komprehensif dan spesifik untuk mendukung implementasi teknologi WtE yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

5. Referensi

- [1] A. B. Mustafa, H. Dong, C. Zhang, dan M. Fujii, "Life cycle environmental benefit and waste-to-energy potential of municipal solid waste management scenarios in Indonesia," *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 24, no. 5, hlm. 1859–1877, Sep 2022, doi: 10.1007/s10163-022-01441-6.
- [2] A. Amheka, Y. Higano, T. Mizunoya, dan H. Yabar, "An overview of current household waste management in Indonesia: development of a new integrated strategy," *IJEWM*, vol. 15, no. 1, hlm. 86, 2015, doi: 10.1504/IJEWM.2015.066953.
- [3] Ariyanti Sarwono *dkk.*, "Refuse Derived Fuel for Energy Recovery by Thermal Processes. A Case Study in Depok City, Indonesia," *ARFMTS*, vol. 88, no. 1, hlm. 12–23, Okt 2021, doi: 10.37934/arfmts.88.1.1223.
- [4] S. N. Othman, Z. Zainon Noor, A. H. Abba, R. O. Yusuf, dan Mohd. A. Abu Hassan, "Review on life cycle assessment of integrated solid waste management in some Asian countries," *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, hlm. 251–262, Feb 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.09.043.
- [5] J. Amulen, H. Kasedde, J. Serugunda, dan J. D. Lwanyaga, "The potential of energy recovery from municipal solid waste in Kampala City, Uganda by incineration," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 14, hlm. 100204, Mei 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100204.
- [6] B. Dastjerdi, V. Strezov, M. A. Rajaeifar, R. Kumar, dan M. Behnia, "A systematic review on life cycle assessment of different waste to energy valorization technologies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 290, hlm. 125747, Mar 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125747.
- [7] P. Vicky Hapsari, R. Bakti Cahyono, dan N. Aini Masrurroh, "Pemilihan Teknologi Waste to Energy Dengan Metode Analytical Hierarchy Process Di Tempat Pembuangan Akhir Sarimukti Bandung Jawa Barat," *ALT*, vol. 2, no. 02, hlm. 10–17, Jul 2023, doi: 10.51401/altron.v2i02.2836.

- [8] Mazalan Maisarah dkk., "Review on the suitability of waste for appropriate waste-to-energy technology," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 63, hlm. 187–192, 2018, doi: 10.3303/CET1863032.
- [9] M. E. Sarvestani dan F. Di Maria, "Life Cycle Environmental Assessment of Municipal Solid Waste to Energy Technologies: A Review Study," *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, vol. 49, no. 3, hlm. 201–214, 2023.
- [10] J. Dong, Y. Tang, A. Nzihou, dan Y. Chi, "Key factors influencing the environmental performance of pyrolysis, gasification and incineration Waste-to-Energy technologies," *Energy Conversion and Management*, vol. 196, hlm. 497–512, Sep 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.016.
- [11] A. Kumar dan S. R. Samadder, "Assessment of energy recovery potential and analysis of environmental impacts of waste to energy options using life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 365, hlm. 132854, Sep 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132854.
- [12] O. Nubi, R. Murphy, dan S. Morse, "Life Cycle Sustainability Assessment of Waste to Energy Systems in the Developing World: A Review," *Environments*, vol. 11, no. 6, hlm. 123, Jun 2024, doi: 10.3390/environments11060123.
- [13] M. Shumal, A. R. Taghipour Jahromi, A. Ferdowsi, S. M. Mehdi Noorbakhsh Dehkordi, A. Moloudian, dan A. Dehnavi, "Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refused Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan- Iran): Environmental Impact and sustainable development," *Renewable Energy*, vol. 146, hlm. 404–413, Feb 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.173.
- [14] Y. Jiang, B. Leng, dan J. Xi, "Assessing the social cost of municipal solid waste management in Beijing: A systematic life cycle analysis," *Waste Management*, vol. 173, hlm. 62–74, Jan 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2023.11.004.
- [15] Y. F. Liem, A. U. Farahdiba, I. D. A. A. Warmadewanthi, dan J. Hermana, "Transition of greenhouse gas emission reduction from the management of municipal solid waste in Surabaya, Indonesia: Assessment on past and future prospective conditions," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, hlm. 100995, Des 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100995.
- [16] M. Hemmati, N. Bayati, dan T. Ebel, "Life cycle sustainability assessment of waste-to-electricity plants for 2030 power generation development scenarios in western Lombok, Indonesia under multi-criteria decision-making approach," *Journal of Building Engineering*, vol. 95, hlm. 110335, Okt 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.110335.
- [17] M. Gunamantha dan Sarto, "Life cycle assessment of municipal solid waste treatment to energy options: Case study of KARTAMANTUL region, Yogyakarta," *Renewable Energy*, vol. 41, hlm. 277–284, Mei 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.11.008.
- [18] A. D. S. Aji, S. Suhardono, I. W. K. Suryawan, dan W. Prayogo, "Assessing the Environmental and Health Impacts of Thermal Waste and Landfill-Based Waste Management," *J. Presipitasi*, vol. 21, no. 2, hlm. 570–585, Jul 2024, doi: 10.14710/presipitasi.v21i2.570-585.
- [19] T. T. Anasstasia, E. Lestianingrum, R. B. Cahyono, dan M. M. Azis, "Life Cycle Assessment of Refuse Derived Fuel (RDF) for Municipal Solid Waste (MSW) Management: Case Study Area Around Cement Industry, Cirebon, Indonesia," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 778, no. 1, hlm. 012146, Apr 2020, doi: 10.1088/1757-899X/778/1/012146.
- [20] R. Muis, I. Rachman, dan T. Matsumoto, "Environmental Impact of Waste to Energy Scenario in Developing Country, Case Study of Makassar, Indonesia," *J. Ecol. Eng.*, vol. 25, no. 10, hlm. 62–75, Okt 2024, doi: 10.12911/22998993/191668.
- [21] Syafrudin, M. A. Budihardjo, I. F. S. Wahyuningrum, A. Chegenizadeh, A. S. Puspita, dan S. A. Qadar, "Enhancing waste management in batang regency: Integrating circular economy principles with life cycle assessment and material flow analysis," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 10, no. 4, hlm. 100437, Des 2024, doi: 10.1016/j.joitmc.2024.100437.
- [22] T. T. Anasstasia, M. M. Azis, I. Haryanto, dan R. A. Pratama, "Life cycle assessment (LCA) refuse derived fuel (RDF) waste in pusat inovasi agro teknologi (PIAT) Universitas Gadjah Mada as alternative waste management for energy," *IJoLCAS*, Apr 2019, doi: 10.52394/ijocas.v2i1.71.
- [23] Wardhana, Banu Iqra, E. Haryono, dan A. J. Pitoyo, "Analisis Dampak Kegiatan Konversi Waste-to-Energy Menggunakan Environmental dan Social Life Cycle Assessment (E-LCA & S-LCA) Di TPST RDF Jeruklegi Kabupaten Cilacap," Tesis, Universitas Gadjah Mada. [Daring]. Tersedia pada: <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/222488>

- [24] F. Syafira, "Life Cycle Assessment (LCA) Pada Proses Produksi Refuse Derived Fuel (RDF) dan Briket Sampah Rumah Tangga di TPA Ngipik Gresik," Tesis, 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://repository.uisi.ac.id/id/eprint/6829>
- [25] M. Chaerul dan A. K. Wardhani, "Refuse Derived Fuel (RDF) dari Sampah Perkotaan dengan Proses Biodrying: Review," vol. 17, no. 1.
- [26] V. Silva, F. Contreras, dan A. P. Bortoleto, "Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasilia, Brazil," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, hlm. 123696, Jan 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123696.
- [27] S. Longo, M. Cellura, dan P. Girardi, "Life Cycle Assessment of electricity production from refuse derived fuel: A case study in Italy," *Science of The Total Environment*, vol. 738, hlm. 139719, Okt 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139719.
- [28] M. M. Mateus, D. Cecilio, M. C. Fernandes, dan M. J. Neiva Correia, "Refuse derived fuels as an immediate strategy for the energy transition, circular economy, and sustainability," *Business Strategy and the Environment*, vol. 32, no. 6, hlm. 3915–3926, 2023.
- [29] A. Bhatsada, S. Patumsawad, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, A. Phongphiphat, dan K. Wangyao, "Modification of the Aeration-Supplied Configuration in the Biodrying Process for Refuse-Derived Fuel (RDF) Production," *Energies*, vol. 16, no. 7, hlm. 3235, Apr 2023, doi: 10.3390/en16073235.
- [30] A. Minarti, S. Aphirta, S. M. P. Marendra, dan L. Rahmiyati, "The application of biodrying method for organic waste treatment in Universitas Trisakti, Jakarta," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1239, no. 1, hlm. 012032, Sep 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1239/1/012032.
- [31] Wiharja, M. H. Robbani, E. M. Maulidayanti, Suherman, Syafrudin, dan M. A. Kholiq, "Preliminary findings on the potential of converting municipal solid waste into refuse-derived fuel as an alternative renewable energy source from the Jakarta waste case study," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1388, no. 1, hlm. 012037, Sep 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1388/1/012037.
- [32] P. Dianda, Mahidin, dan E. Munawar, "Production and characterization refuse derived fuel (RDF) from high organic and moisture contents of municipal solid waste (MSW)," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 334, hlm. 012035, Mar 2018, doi: 10.1088/1757-899X/334/1/012035.
- [33] I. W. K. Suryawan, I. M. W. Wijaya, N. K. Sari, I. Y. Septiariva, dan N. L. Zahra, "Potential of Energy Municipal Solid Waste (MSW) to Become Refuse Derived Fuel (RDF) in Bali Province, Indonesia," *JBAT*, vol. 10, no. 1, hlm. 09–15, Sep 2021, doi: 10.15294/jbat.v10i1.29804.
- [34] S. Hellweg dan L. Milà I Canals, "Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment," *Science*, vol. 344, no. 6188, hlm. 1109–1113, Jun 2014, doi: 10.1126/science.1248361.
- [35] J. B. Guinée dkk., "Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, hlm. 90–96, Jan 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [36] A. Halog dan Y. Manik, "Advancing Integrated Systems Modelling Framework for Life Cycle Sustainability Assessment," *Sustainability*, vol. 3, no. 2, hlm. 469–499, Feb 2011, doi: 10.3390/su3020469.
- [37] A. U. Farahdiba, I. D. A. A. Warmadewanthi, Y. Fransiscus, E. Rosyidah, J. Hermana, dan A. Yuniarto, "The present and proposed sustainable food waste treatment technology in Indonesia: A review," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 32, hlm. 103256, Nov 2023, doi: 10.1016/j.eti.2023.103256.
- [38] M. Chaerul dan V. Allia, "Tinjauan Kritis Studi Life Cycle Assessment (LCA) di Indonesia," *JSE*, vol. 5, no. 1, Des 2019, doi: 10.32672/jse.v5i1.1653.
- [39] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, dan S. I. Olsen, Ed., *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- [40] A. Sharma, R. Ganguly, dan A. K. Gupta, "Life cycle assessment of municipal solid waste generated from hilly cities in India – A case study," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, hlm. e21575, Nov 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21575.
- [41] M. Cellura, S. Longo, dan M. Mistretta, "Sensitivity analysis to quantify uncertainty in Life Cycle Assessment: The case study of an Italian tile," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, hlm. 4697–4705, Des 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.082.