

PENILAIAN DAUR HIDUP TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR BERBASIS LINGKUNGAN DAN EDUKASI (TPA BLE) KABUPATEN BANYUMAS DENGAN ANALISIS *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA)

Ratna Agustyna¹, Noviaji Joko Priono², Dodit Ardiatma³

^{1,2,3}Universitas Pelita Bangsa, Bekasi, Indonesia

Email: ratnaagustyna21@gmail.com

Abstrak

TPA Berbasis Lingkungan dan Edukasi (TPA BLE) Banyumas menerapkan pengolahan sampah terintegrasi melalui *refuse-derived fuel* (RDF), paving blok, pirolisis, *Black Soldier Fly* (BSF), dan biomassa sebagai bagian dari pendekatan *zero landfill*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dampak lingkungan dan mengidentifikasi *hotspot* dari lima jalur pengolahan sampah di TPA BLE Banyumas menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA). Analisis menggunakan batas sistem *gate-to-gate* dan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H), berdasarkan kondisi operasional eksisting dan unit fungsi 1 ton sampah tanpa pemilahan. Dampak lingkungan pada kelima jalur terutama didominasi oleh *human carcinogenic toxicity*, *freshwater ecotoxicity*, dan *marine ecotoxicity*. Pada kondisi eksisting, RDF menunjukkan *human carcinogenic toxicity* tertinggi sebesar 1.314,61. Setelah basis input distandarkan menjadi 1 ton, pirolisis menjadi jalur dengan nilai tertinggi pada tiga kategori dominan, masing-masing sebesar 138,29; 30,274; dan 19,03. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa profil dampak dipengaruhi oleh skala pengolahan dan karakteristik proses masing-masing jalur. Setiap jalur pengolahan di TPA BLE memiliki profil dan *hotspot* lingkungan yang berbeda. Prioritas perbaikan perlu diarahkan pada proses dominan melalui peningkatan efisiensi energi, optimalisasi proses, dan penguatan pemilahan sampah dari sumber.

Kata Kunci: *Life Cycle Assessment*, Pengolahan Sampah, *Gate-to-Gate*, ReCiPe 2016, TPA BLE Banyumas.

Abstract

The Environment- and Education-Based Final Processing Facility (TPA BLE) in Banyumas applies an integrated waste treatment system comprising refuse-derived fuel (RDF), paving blocks, pyrolysis, Black Soldier Fly (BSF), and biomass as part of a zero-landfill approach. Objective: This study aimed to evaluate environmental impacts and identify environmental hotspots across five waste treatment pathways at TPA BLE Banyumas using Life Cycle Assessment (LCA). The assessment employed a gate-to-gate system boundary and the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method. The analysis considered existing operational conditions and a standardized functional unit of 1 ton of unsegregated waste. The environmental profiles of the five treatment pathways were predominantly characterized by human carcinogenic toxicity, freshwater ecotoxicity, and marine ecotoxicity. Under existing operational conditions, RDF showed the highest human carcinogenic toxicity value at 1,314.61. When the input basis was standardized to 1 ton, pyrolysis showed the highest values for the three dominant impact categories, at 138.29, 30.27, and 19.03, respectively. This shift indicates that environmental impact profiles are influenced by both treatment scale and process characteristics. Each waste treatment pathway at TPA BLE exhibits a distinct environmental impact profile and hotspot. Improvement priorities should therefore focus on dominant process stages through enhanced energy efficiency, process optimization, and strengthened waste segregation at source.

Keywords: *Life Cycle Assessment, Integrated Waste Treatment, Gate-to-Gate, ReCiPe 2016, TPA BLE Banyumas.*

A. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah masih menjadi tantangan lingkungan yang penting di Indonesia. Pada tahun 2023, timbulan sampah nasional mencapai sekitar 40 juta ton per tahun dan 39,62% di antaranya dilaporkan belum terkelola. Sampah yang tidak tertangani dengan baik berpotensi menimbulkan berbagai dampak lingkungan, mulai dari pencemaran tanah, air, dan udara hingga emisi gas rumah kaca. Di sisi lain, sampah juga memiliki potensi sebagai sumber daya apabila dikelola melalui pemilahan, daur ulang, pemulihan material, maupun pemanfaatan energi. Pergeseran paradigma dari pembuangan akhir menuju pemanfaatan kembali sumber daya menjadi bagian penting dalam pengembangan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan dan mendukung ekonomi sirkular (SIPSN, 2023; Mustaghfiroh et al., 2020; Maghfuri & Nugroho, 2024).

Permasalahan tersebut juga dihadapi Kabupaten Banyumas. Timbulan sampah meningkat dari 536,89 ton/hari pada 2022 menjadi 548,57 ton/hari pada 2024, dengan estimasi timbulan sekitar 550 ton/hari. Komposisi sampah didominasi oleh sampah organik sebesar 52,88%, diikuti plastik 26,08% dan kertas 11,24%, sementara sisanya terdiri atas kaca, logam, kain, karet atau kulit, kayu, dan residu lainnya. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan sampah membutuhkan pendekatan yang tidak hanya berorientasi pada pembuangan akhir, tetapi mampu mengarahkan berbagai fraksi sampah menuju jalur pengolahan yang sesuai.

Salah satu pendekatan tersebut diterapkan di TPA Berbasis Lingkungan dan Edukasi (TPA BLE) Banyumas melalui sistem pengolahan sampah terintegrasi. Sampah yang masuk diarahkan ke beberapa jalur pengolahan, yaitu *refuse-derived fuel* (RDF), paving blok, pirolisis, budidaya *Black Soldier Fly* (BSF), dan biomassa. Integrasi beberapa teknologi memungkinkan fraksi sampah dengan karakteristik berbeda dimanfaatkan kembali dan sekaligus mengurangi residu yang berakhir di *landfill*. Namun, pengurangan residu *landfill* tidak serta-merta menunjukkan bahwa keseluruhan sistem memiliki dampak lingkungan yang rendah. Setiap jalur pengolahan membutuhkan input material, energi, transportasi, dan tahapan proses yang berbeda, sehingga berpotensi menghasilkan beban serta *environmental trade-offs* yang berbeda pula.

Life Cycle Assessment (LCA) menyediakan pendekatan sistematis untuk mengevaluasi penggunaan sumber daya, aliran material dan energi, serta potensi dampak lingkungan yang muncul sepanjang batas sistem yang ditetapkan. Pendekatan LCA telah diterapkan pada berbagai teknologi pengolahan sampah, termasuk RDF, pengolahan termal, pemanfaatan sampah plastik, BSF, dan biomassa. Meskipun demikian, sebagian besar evaluasi tersebut berfokus pada teknologi atau jalur pengolahan tertentu. Evaluasi beberapa jalur pengolahan yang beroperasi secara bersamaan dalam satu sistem terintegrasi menjadi penting karena beban lingkungan aktual tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik teknologi, tetapi juga oleh jumlah material yang dialirkan ke masing-masing proses, konsumsi energi, serta kondisi operasionalnya.

Dalam konteks tersebut, penelitian ini mengevaluasi secara simultan lima jalur pengolahan sampah yang beroperasi di TPA BLE Banyumas menggunakan LCA dengan batas sistem *gate-to-gate*. Evaluasi dilakukan pada kondisi operasional eksisting dan basis input yang distandarkan menjadi 1 ton sampah, sehingga memberikan dua perspektif yang berbeda tetapi saling melengkapi: beban lingkungan berdasarkan kondisi operasi aktual dan profil dampak ketika perbedaan jumlah input antarjalur dikendalikan. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi kategori dampak dominan dan tahapan proses yang menjadi *environmental hotspot* pada RDF, paving blok, pirolisis, BSF, dan biomassa. Hasil penelitian diharapkan dapat

memberikan dasar ilmiah untuk menentukan prioritas perbaikan proses dan mendukung pengembangan sistem pengelolaan sampah terintegrasi yang lebih berkelanjutan.

B. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem pengolahan sampah di TPA Berbasis Lingkungan dan Edukasi (TPA BLE) Kabupaten Banyumas. Lima jalur pengolahan yang dianalisis meliputi *refuse-derived fuel* (RDF), paving blok, pirolisis, *Black Soldier Fly* (BSF), dan biomassa. Data primer diperoleh melalui wawancara, pengamatan langsung, dan dokumen internal TPA BLE, sedangkan data sekunder diperoleh dari publikasi ilmiah, laporan pemerintah, dan sumber relevan lainnya.

Analisis LCA dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu: (1) penentuan tujuan dan ruang lingkup (*goal and scope definition*), (2) analisis inventori daur hidup (*life cycle inventory/LCI*), (3) penilaian dampak daur hidup (*life cycle impact assessment/LCIA*), dan (4) interpretasi (*life cycle interpretation*). Tahapan tersebut diterapkan secara konsisten pada kelima jalur pengolahan sampah.

Tujuan LCA adalah mengidentifikasi dan menganalisis potensi dampak lingkungan dari lima jalur pengolahan sampah di TPA BLE. Batas sistem ditetapkan secara *gate-to-gate*, mencakup tahapan persiapan bahan baku, pengiriman dan penimbangan, pemilahan, hingga proses pengolahan pada masing-masing jalur. Penelitian menggunakan dua basis pemodelan. Basis pertama merepresentasikan kondisi operasional eksisting berdasarkan aliran masuk dan kuantitas aktual sampah yang diterima oleh masing-masing unit pengolahan. Basis kedua menggunakan 1 ton sampah sebagai unit fungsi, dengan asumsi sampah diolah secara langsung pada masing-masing unit sesuai kategorinya tanpa melalui tahap pemilahan.

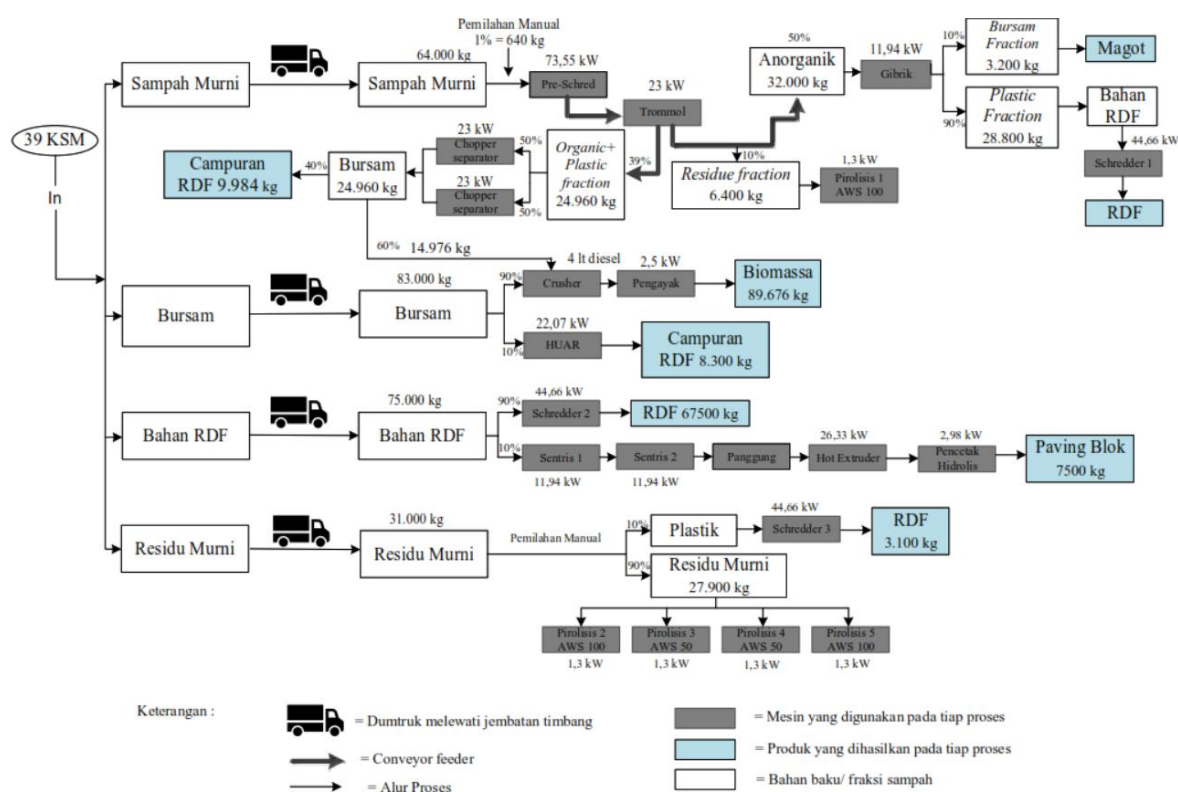
Penilaian dampak mencakup 18 kategori ReCiPe 2016 Midpoint (H), yaitu *global warming*, *stratospheric ozone depletion*, *ionizing radiation*, *ozone formation–human health*, *fine particulate matter formation*, *ozone formation–terrestrial ecosystems*, *terrestrial acidification*, *freshwater eutrophication*, *marine eutrophication*, *terrestrial ecotoxicity*, *freshwater ecotoxicity*, *marine ecotoxicity*, *human carcinogenic toxicity*, *human non-carcinogenic toxicity*, *land use*, *mineral resource scarcity*, *fossil resource scarcity*, dan *water consumption*.

Penggunaan kedua basis tersebut dimaksudkan untuk mengevaluasi sistem dari dua perspektif: beban lingkungan berdasarkan kondisi operasional aktual dan profil dampak ketika jumlah input pada masing-masing jalur distandarkan. Pemodelan LCA dilakukan menggunakan SimaPro 10.1.0.2. Penilaian dampak menggunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari setiap jalur pengolahan. Metode midpoint digunakan untuk mengevaluasi dampak pada tingkat kategori sebelum mencapai kerusakan pada tingkat endpoint.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Gambaran Sistem Pengolahan Sampah TPA BLE

TPA BLE Banyumas menerapkan sistem pengolahan sampah terintegrasi dengan mengarahkan fraksi sampah ke lima jalur pengolahan, yaitu *refuse-derived fuel* (RDF), paving blok, pirolisis, *Black Soldier Fly* (BSF), dan biomassa. Secara umum, tahapan pengolahan meliputi penerimaan dan penimbangan sampah, pemilahan, serta pengolahan lanjutan sesuai karakteristik masing-masing fraksi. Dalam penelitian ini, keseluruhan proses tersebut dievaluasi menggunakan pendekatan *gate-to-gate*.



Gambar 1 Flowchart Penanganan Sampah TPA BLE

2. Profil Dampak Lingkungan pada Kondisi Eksisting

Hasil LCIA pada kondisi operasional eksisting menunjukkan bahwa profil dampak lingkungan berbeda antarjalur pengolahan. Dari 18 kategori dampak yang dianalisis, nilai terbesar terkonsentrasi pada human carcinogenic toxicity, freshwater ecotoxicity, dan marine ecotoxicity. Pada kategori human carcinogenic toxicity, RDF memberikan kontribusi tertinggi sebesar 1.314,61, diikuti pirolisis 213,77, paving blok 147,90, biomassa 133,46, dan BSF 17,39. Nilai akumulasi kategori tersebut mencapai 1.827,14. Pada freshwater ecotoxicity, RDF juga menunjukkan kontribusi terbesar sebesar 103,39, disusul pirolisis 44,39 dan biomassa 22,55, dengan nilai akumulasi 185,43. Pola yang sama terlihat pada marine ecotoxicity, dengan RDF sebesar 88,68, pirolisis 29,13, dan biomassa 16,30 dari nilai akumulasi 147,05.

Tabel 1 Akumulasi Life Cycle Assessment Pengolahan Sampah di TPA BLE Kondisi Eksisting

<i>Impact category</i>	RDF Plant	Paving Blok Plant	Pirolisis Plant	BSF Plant	Biomassa Plant	Nilai Akumulasi Dampak
<i>Global warming</i>	5,85	0,73	2,19	0,18	1,25	10,20
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	1,13	0,02	1,11	0,08	0,43	2,76
<i>Ionizing radiation</i>	3,15	0,18	1,69	0,12	0,68	5,83
<i>Ozone formation, Human health</i>	6,85	0,82	2,37	0,20	1,47	11,72
<i>Fine particulate matter formation</i>	7,68	2,80	2,93	0,29	2,80	16,51
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	8,40	1,00	2,86	0,24	1,77	14,27
<i>Terrestrial acidification</i>	4,29	0,40	2,70	0,20	1,23	8,83
<i>Freshwater eutrophication</i>	70,99	12,50	22,90	1,95	14,09	122,42
<i>Marine eutrophication</i>	11,25	0,10	11,92	0,86	4,48	28,61
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	49,98	4,88	7,65	0,64	5,50	68,64
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	103,39	11,56	44,39	3,53	22,55	185,43
<i>Marine ecotoxicity</i>	88,68	10,55	29,13	2,38	16,30	147,05

ARTIKEL

<i>Human carcinogenic toxicity</i>	1314,61	147,90	213,77	17,39	133,46	1827,14
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	1,94	0,28	0,79	0,06	0,45	3,52
<i>Land use</i>	1,38	0,03	1,24	0,09	0,48	3,21
<i>Mineral resource scarcity</i>	1,58E-03	1,42E-04	3,63E-04	2,77E-05	1,81E-04	2,29E-03
<i>Fossil resource scarcity</i>	15,60	1,83	5,34	0,39	2,77	25,92
<i>Water consumption</i>	20,11	1,67	21,30	1,53	7,95	52,56

Secara operasional, dominasi RDF pada kondisi eksisting perlu dibaca bersama dengan jumlah material dan aktivitas proses yang berlangsung pada jalur tersebut. Dengan kata lain, tingginya kontribusi RDF tidak hanya mencerminkan karakteristik proses, tetapi juga beban aktual sistem yang dialirkan melalui RDF plant.

3. Profil Dampak pada Unit Fungsi 1 Ton

Ketika basis analisis distandarkan menjadi 1 ton sampah, pola kontribusi berubah secara jelas. *Human carcinogenic toxicity* tetap menjadi kategori dominan dengan nilai akumulasi 222,29, tetapi kontribusi terbesar beralih ke pirolisis sebesar 138,30, diikuti paving blok 42,90 dan RDF 39,80.

Perubahan serupa terlihat pada *freshwater ecotoxicity*. Dari nilai total 37,50, pirolisis menyumbang sekitar 30,30, sedangkan paving blok 3,85 dan RDF 3,28. Pada *marine ecotoxicity*, pirolisis kembali menunjukkan nilai tertinggi sebesar 19,00, dibandingkan paving blok 3,43 dan RDF 2,97.

Tabel 2 Akumulasi Life Cycle Assessment Pengolahan Sampah di TPA BLE Unit Fungsi 1 ton

<i>Impact category</i>	RDF Plant	Paving Blok Plant	Pirolisis Plant	BSF Plant	Biomassa Plant	Nilai Akumulasi Dampak
<i>Global warming</i>	0,0897	0,1270	1,4125	0,0044	0,0045	1,6381
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	0,0027	0,0038	0,8582	0,0001	0,0001	0,8649
<i>Ionizing radiation</i>	0,0321	0,0331	1,2677	0,0006	0,0006	1,3342
<i>Ozone formation, Human health</i>	0,1006	0,1395	1,4677	0,0064	0,0066	1,7208
<i>Fine particulate matter formation</i>	0,1276	0,3975	0,9207	0,0125	0,0134	1,4717
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	0,1228	0,1684	1,7745	0,0077	0,0079	2,0814
<i>Terrestrial acidification</i>	0,0429	0,0670	1,8830	0,0024	0,0025	1,9978
<i>Freshwater eutrophication</i>	2,6058	3,4444	13,5569	0,0461	0,0431	19,6963
<i>Marine eutrophication</i>	0,0749	0,0823	9,2897	0,0010	0,0004	9,4482
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1,2383	1,2667	5,0699	0,0356	0,0356	7,6461
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	3,2825	3,8507	30,2744	0,0507	0,0526	37,5110
<i>Marine ecotoxicity</i>	2,9733	3,4315	19,0313	0,0495	0,0510	25,5366
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	39,8500	42,9061	138,2988	0,6126	0,6205	222,2880
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	0,0624	0,0799	0,4943	0,0013	0,0014	0,6394
<i>Land use</i>	0,0064	0,0066	0,9681	0,0002	0,0002	0,9815
<i>Mineral resource scarcity</i>	3,87E-05	3,94E-05	2,59E-04	5,81E-07	5,81E-07	3,38E-04
<i>Fossil resource scarcity</i>	0,2128	0,2869	3,0317	0,0101	0,0105	3,5519
<i>Water consumption</i>	0,0141	1,5809	16,6410	0,0008	0,0004	18,2371

Pada kondisi eksisting, RDF mendominasi beberapa kategori dampak utama, sedangkan pada basis 1 ton, pirolisis menjadi kontributor terbesar. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa beban lingkungan aktual dan intensitas dampak proses merupakan dua perspektif yang berbeda. Kondisi eksisting merepresentasikan kombinasi antara karakteristik proses dan throughput aktual, sedangkan basis 1 ton lebih menonjolkan intensitas dampak relatif terhadap jumlah input yang distandarkan.

4. Identifikasi Environment Hostpot

Interpretasi pada tingkat proses menunjukkan bahwa sumber utama dampak tidak sama pada setiap jalur pengolahan.

- Pada RDF, pencacahan menjadi titik kritis karena penggunaan energi listrik pada mesin pencacah dan kontribusi material selama proses. Dampak yang menonjol meliputi *human carcinogenic toxicity*, *freshwater ecotoxicity*, dan *marine ecotoxicity*.
- Pada paving blok, pemilahan dan proses berenergi seperti pelelehan serta pencetakan memberikan kontribusi terhadap *human carcinogenic toxicity*, *freshwater eutrophication*, *freshwater ecotoxicity*, dan *marine ecotoxicity*.
- Pada pirolisis, proses pembakaran/insinerasi menjadi hotspot utama karena melibatkan konsumsi listrik dan diesel serta material bahan baku. Proses ini berkontribusi terhadap *human carcinogenic toxicity*, *freshwater eutrophication*, *freshwater ecotoxicity*, dan *marine ecotoxicity*.
- Pada BSF, persiapan bahan baku dan persiapan pakan merupakan proses yang paling relevan terhadap dampak lingkungan, terutama melalui penggunaan energi, transportasi, dan input material.
- Pada biomassa, hotspot berada pada persiapan bahan baku dan pemilahan, dengan kontribusi utama berasal dari penggunaan diesel, listrik, serta material selama proses.

Tabel 3 Identifikasi Environment Hostpot

Jalur Pengolahan	Proses Hotspot	Input/ Driver Utama	Kategori dampak Dominan
RDF	Pencacahan	Listrik, Material	HCT, FWE, ME
Paving Blok	Pemilahan/ Pelelehan	Listrik, Material	HCT, FE, FWE, ME
Pirolisi	Pembakaran/ Insinerasi	Listrik, Diesel, Material	HCT, FE, FWE, ME
BSF	Persiapan bahan baku dan pakan	Transportasi, Energi, Material	HCT, FWE, ME
Biomassa	Persiapan bahan baku dan pemilihan	Diesel, Listrik, Material	HCT, FWE, ME

HCT: Human Carcinogenic Toxicity; **FWE:** Freshwater Ecotoxicity; **ME:** Marine Ecotoxicity; **FE:** Freshwater Eutrophication.

5. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

- Refuse-Derived Fuel

Hasil LCA TPA BLE selanjutnya dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu untuk melihat apakah pola dampak dan sumber hotspot yang ditemukan memiliki konsistensi dengan sistem pengolahan sampah lain. Perbandingan ini digunakan sebagai konteks ilmiah dan bukan sebagai penilaian langsung bahwa satu sistem lebih baik atau lebih buruk, karena perbedaan functional unit, batas sistem, komposisi bahan baku, skala operasi, sumber energi, dan metode LCIA dapat menghasilkan nilai dampak yang berbeda.

Tabel 4 Perbandingan Dampak RDF

Jalur Pengolahan	Unit	(Annastasia et al., 2018)	TPA BLE
<i>Global Warming</i>	Kg CO ₂ eq	0,91	686
<i>Acidification</i>	Kg SO ₄ eq	0,0027	2,22
<i>Eutrophication</i>	Kg P eq	0,498	4,79
<i>Human Toxicity</i>	Kg 1,4-DB eq	0,84	88,2
<i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	Kg 1,4DB eq	0,043	56,2

Pada jalur RDF, penelitian ini menunjukkan bahwa pencacahan dan penggunaan energi merupakan bagian penting dari kontribusi dampak. Dalam penelitian perbandingan di PIAT UGM, Anastasia et al (2018). juga mengevaluasi produksi *densified refuse-derived fuel* menggunakan pendekatan *gate-to-gate*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik proses produksi RDF, pemilahan bahan baku, dan penggunaan energi menjadi faktor yang perlu diperhatikan dalam interpretasi dampak lingkungan. Dalam data penelitian TPA BLE, nilai *global warming potential* yang digunakan untuk perbandingan adalah **686 kg CO₂-eq/ton**, sedangkan nilai hasil konversi dari penelitian PIAT UGM adalah **0,91 kg CO₂-eq/ton**. Selisih yang sangat besar tersebut tidak sebaiknya langsung ditafsirkan sebagai bukti bahwa sistem TPA BLE memiliki performa lingkungan yang lebih buruk. Perbedaan inventori, konsumsi energi, karakteristik RDF, basis konversi, serta kemungkinan perbedaan perlakuan terhadap substitusi bahan bakar dapat berpengaruh besar terhadap nilai akhir.

b. Paving Blok

Hasil LCA pada jalur paving blok dibandingkan dengan penelitian Sinaga et al. (2023), yang mengevaluasi konversi *multilayer metallized plastic* (MLP) menjadi paving block menggunakan pendekatan *gate-to-gate*. Pada penelitian tersebut, unit analisis awal didasarkan pada satu paving block dengan berat 700 g, kemudian dikonversi menjadi basis 1 ton untuk memungkinkan perbandingan dengan hasil TPA BLE.

Tabel 5 Perbandingan Dampak Paving Blok

Jalur Pengolahan	Unit	(Sinaga et al., 2023)	TPA BLE
<i>Global Warming</i>	Kg CO ₂ eq	3.827	673
<i>Acidification</i>	Kg SO ₄ eq	13.04	2,5
<i>Eutrophication</i>	Kg P eq	3.47	4,44
<i>Freshwater Aquatic Ecotox</i>	Kg 1,4-DB eq	1.198,07	963
<i>Human Toxicity</i>	Kg 1,4-DB eq	1.811.92	2,68 x 10 ³
<i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	Kg 1,4DB eq	3,53	29,4

Hasil perbandingan menunjukkan pola yang berbeda antar kategori dampak. Nilai *global warming* pada TPA BLE sebesar 673 kg CO₂-eq, lebih rendah dibandingkan 3.827 kg CO₂-eq pada Sinaga et al. (2023). Pola serupa ditemukan pada *acidification*, yaitu 2,5 dibandingkan 13,04 kg SO₄-eq, serta *freshwater aquatic ecotoxicity*, yaitu 963 dibandingkan 1.198,07 kg 1,4-DB-eq. Sebaliknya, TPA BLE menunjukkan nilai yang lebih tinggi pada *eutrophication* (4,44 vs 3,47 kg P-eq), *human toxicity* (2,68 × 10³ vs 1,81 × 10³ kg 1,4-DB-eq), dan *terrestrial ecotoxicity* (29,4 vs 3,53 kg 1,4-DB-eq).

Perbedaan arah antar kategori tersebut menunjukkan adanya *environmental trade-off* dalam pemanfaatan sampah plastik menjadi paving blok. Nilai yang lebih rendah pada *global warming* tidak serta-merta menunjukkan bahwa sistem TPA BLE memiliki kinerja lingkungan yang lebih baik secara keseluruhan, karena beberapa kategori toksisitas dan eutrofikasi justru menunjukkan nilai yang lebih tinggi. Perbedaan karakteristik bahan baku—sampah plastik pada TPA BLE dibandingkan MLP pada Sinaga et al. (2023)—serta konfigurasi proses dan kebutuhan energi juga perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan perbedaan tersebut. Penelitian asli sendiri mengidentifikasi kemungkinan perbedaan proses, emisi residu, dan bahan baku sebagai faktor yang dapat menjelaskan variasi hasil.

c. Pirolisis

Hasil LCA pada jalur pirolisis TPA BLE dibandingkan dengan studi pengolahan termal di TPA Supit Urang oleh Indra et al. (2021). Studi perbandingan tersebut menggunakan skenario gasifikasi dengan basis total sampah sebesar 189.989 ton, kemudian hasilnya dikonversi menjadi basis 1 ton untuk keperluan perbandingan dengan TPA BLE.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai dampak pada pirolisis TPA BLE lebih tinggi pada sebagian besar kategori yang dibandingkan. *Global Warming Potential* pada TPA BLE mencapai $7,72 \times 10^3$ kg CO₂-eq, sedangkan pada gasifikasi TPA Supit Urang sebesar 2.373 kg CO₂-eq. Pola yang sama terlihat pada *photochemical oxidation* (7,45 vs 0,584 kg C₂H₄-eq), *acidification* (76,8 vs 11,63 kg SO₂-eq), serta *eutrophication* (102 vs 15,9 kg PO₄-eq). Sebaliknya, pada kategori *ozone depletion*, nilai TPA BLE lebih rendah, yaitu 0,000126 kg CFC-11-eq, dibandingkan 0,00916 kg CFC-11-eq pada TPA Supit Urang.

Tabel 6 Perbandingan Dampak Pirolisi

Jalur Pengolahan	Unit	TPA Supit Urang (Gasifikasi)	TPA BLE
Global Warming	Kg CO ₂ eq	2.373	$7,72 \times 10^3$
Ozone Depletion (SOD)	Kg CFC-11 eq	0.00916	0,000126
Photochemical Oxidation	Kg C ₂ H ₄ eq	0,584	7,45
Acidification	Kg SO ₂ eq	11,63	76,8
Eutrophication	Kg PO ₄ eq	15,9	102

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa proses termal pada TPA BLE memiliki beban yang relatif tinggi pada beberapa kategori lingkungan, khususnya pemanasan global, pembentukan oksidan fotokimia, asidifikasi, dan eutrofikasi. Temuan ini juga konsisten dengan hasil internal penelitian, di mana pirolisis menjadi kontributor terbesar pada beberapa kategori dampak ketika basis input distandarkan menjadi 1 ton. Namun, hasil ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena teknologi yang dibandingkan berbeda: TPA BLE menggunakan pirolisis, sedangkan studi TPA Supit Urang menggunakan gasifikasi. Dengan demikian, perbandingan ini lebih tepat digunakan untuk memberikan konteks terhadap kinerja proses termal daripada sebagai perbandingan langsung antar-teknologi yang sepenuhnya ekuivalen.

d. Black Soldier Fly

Hasil LCA pengolahan sampah organik menggunakan *Black Soldier Fly* (BSF) di TPA BLE dibandingkan dengan penelitian Riani Salyati et al. (2025). Studi perbandingan mengevaluasi pengolahan limbah makanan skala kampus melalui budidaya BSF dengan unit fungsi awal 1 kg sampah. Untuk keperluan perbandingan, nilai dampak pada studi tersebut dikonversi menjadi basis 1 ton sampah.

Tabel 7 Perbandingan Dampak Black Soldier Fly

Jalur Pengolahan	Unit	(Riani Salyati et al., 2025)	TPA BLE
Global Warming	Kg CO ₂ eq	4.450	34,8
Acidification	Kg SO ₄ eq	3.790	0,0997
Freshwater Aquatic Ecotax	Kg P eq	88,3	0,0299
Marine Eutrophication	Kg N eq	78,7	0,00446
Ozone Depletion	Kg CFC-1 eq	2,22	$8,55 \times 10^{-6}$

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai dampak BSF di TPA BLE lebih rendah pada seluruh kategori yang dibandingkan. Pada *Global Warming Potential*, misalnya, TPA BLE menghasilkan nilai 34,8 kg CO₂-eq/ton, sedangkan nilai hasil konversi studi Riani Salyati et al. (2025) mencapai 4.450 kg CO₂-eq/ton. Perbedaan yang besar juga terlihat pada *acidification*, *freshwater eutrophication*, *marine eutrophication*, dan *ozone depletion*.

Meskipun demikian, perbedaan numerik tersebut tidak cukup untuk menyimpulkan secara langsung bahwa sistem BSF TPA BLE lebih ramah lingkungan. Kedua sistem memiliki konteks operasional yang berbeda, termasuk karakteristik bahan baku, skala pengolahan,

kebutuhan energi, tahapan proses, dan kemungkinan perbedaan batas sistem. Oleh karena itu, hasil perbandingan lebih tepat menunjukkan bahwa konfigurasi BSF yang diterapkan di TPA BLE menghasilkan profil dampak yang relatif rendah dalam batas sistem yang dianalisis, sementara perbedaan absolut dengan penelitian terdahulu perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan perbedaan metodologis.

e. Biomassa

Hasil LCA jalur biomassa di TPA BLE dibandingkan dengan penelitian Rashedi et al. (2022), yang mengevaluasi produksi *biomass pellets*. Studi pembandingan menggunakan unit fungsi awal 1 kg biomass pellet, kemudian nilainya dikonversi menjadi basis 1 ton agar dapat dibandingkan dengan hasil TPA BLE.

Tabel 8 Perbandingan Biomassa

Jalur Pengolahan	Unit	(Rashedi et al., 2022)	TPA BLE
Global Warming	Kg CO ₂ eq	802	34,8
Acidification	Kg SO ₂ eq	6	0,132
Eutrophication	Kg PO ₄ eq	1	0,104
Human Toxicity	Kg 1,4-DB eq	1.107	16,1
Freshwater Aquatic Ecotoxicity	Kg 1,4-DB eq	191	16,1
Marine Aquatic Ecotoxicity	Kg 1,4-DB eq	417.803	2,76 x10 ⁴

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai dampak biomassa TPA BLE lebih rendah pada seluruh kategori yang dibandingkan. Pada *Global Warming Potential*, nilai TPA BLE sebesar 34,8 kg CO₂-eq, sedangkan studi Rashedi et al. (2022) menunjukkan 802 kg CO₂-eq. Pola serupa terlihat pada *acidification* (0,132 vs 6 kg SO₂-eq), *eutrophication* (0,104 vs 1 kg PO₄-eq), *human toxicity* (16,1 vs 1.107 kg 1,4-DB-eq), serta *freshwater aquatic ecotoxicity* (16,1 vs 191 kg 1,4-DB-eq). Pada *marine aquatic ecotoxicity*, nilai TPA BLE sebesar 2,76 × 10⁴ kg 1,4-DB-eq, lebih rendah dibandingkan 417.803 kg 1,4-DB-eq pada studi Rashedi et al.

Perbedaan tersebut perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan konfigurasi kedua sistem. Biomassa pada TPA BLE digunakan sebagai biofuel non-pellet, sedangkan Rashedi et al. mengevaluasi produksi *biomass pellets*. Proses pelletisasi dapat melibatkan tahapan tambahan dan kebutuhan energi yang tidak terdapat pada sistem TPA BLE. Penelitian asli juga mencatat bahwa penggunaan langsung biomassa tanpa pelletisasi dapat menghasilkan beban lingkungan yang lebih rendah, tetapi berpotensi memiliki densitas energi atau nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan pellet. Pertama, *human carcinogenic toxicity*, *freshwater ecotoxicity*, dan *marine ecotoxicity* merupakan kategori yang paling menonjol dalam profil lingkungan sistem TPA BLE. Pada kondisi eksisting, kontribusi terbesar berasal dari RDF, sedangkan pada basis 1 ton dominasi berpindah ke pirolisis. Kedua, perubahan dominasi tersebut menunjukkan bahwa beban lingkungan aktual tidak sama dengan intensitas dampak per satuan input. Jalur dengan kontribusi terbesar pada kondisi operasional aktual belum tentu menjadi jalur dengan impact intensity terbesar setelah throughput distandarkan. Ketiga, environmental hotspot berbeda antarjalur. Pencacahan menjadi titik penting pada RDF, pemilahan dan proses termal pada paving blok, pembakaran pada pirolisis, persiapan bahan baku dan pakan pada BSF, serta persiapan bahan baku dan pemilahan pada biomassa. Dengan demikian, strategi perbaikan tidak seharusnya menggunakan satu intervensi yang sama untuk seluruh sistem.

Penelitian menggunakan batas gate-to-gate sehingga belum menggambarkan seluruh siklus hidup produk hasil pengolahan. Basis 1 ton menyetarakan kuantitas input dalam pemodelan, tetapi tidak menjadikan kelima jalur memiliki fungsi keluaran dan karakter feedstock yang identik. Karena itu, hasil digunakan untuk membaca profil dan hotspot, bukan untuk menyimpulkan superioritas universal satu teknologi. Perbandingan dengan penelitian terdahulu juga dibatasi oleh perbedaan sistem, teknologi, inventori, dan basis perhitungan.

Penelitian lanjutan dapat memperluas batas sistem dan melakukan analisis sensitivitas terhadap bauran listrik, transportasi, serta perubahan kapasitas.

D. KESIMPULAN

Penilaian *Life Cycle Assessment* terhadap lima jalur pengolahan sampah di TPA BLE Banyumas menunjukkan bahwa setiap jalur memiliki profil dampak lingkungan dan *hotspot* proses yang berbeda. Secara umum, kategori dampak yang paling menonjol adalah *human carcinogenic toxicity*, *freshwater ecotoxicity*, dan *marine ecotoxicity*. Pada kondisi operasional eksisting, RDF memberikan kontribusi terbesar pada kategori-kategori dominan, sedangkan pada basis input 1 ton, kontribusi terbesar beralih ke pirolisis. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya beban lingkungan aktual tidak selalu sejalan dengan intensitas dampak per satuan input. Hasil interpretasi juga menunjukkan bahwa *hotspot* utama berada pada proses pencacahan untuk RDF, pemilahan dan proses berenergi pada paving blok, proses termal pada pirolisis, persiapan bahan baku dan pakan pada BSF, serta persiapan bahan baku dan pemilahan pada biomassa. Oleh karena itu, strategi perbaikan sebaiknya diarahkan pada proses yang paling berkontribusi di masing-masing jalur, terutama melalui peningkatan efisiensi energi, optimalisasi transportasi dan proses produksi, pengendalian emisi atau debu, serta penguatan pemilahan sampah dari sumber. Pendekatan ini memungkinkan sistem pengolahan sampah terintegrasi di TPA BLE dikembangkan tidak hanya untuk mengurangi ketergantungan terhadap *landfill*, tetapi juga untuk menekan beban lingkungan dari proses pengolahannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pengelola TPA BLE dan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Banyumas atas dukungan data dan informasi selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Anasstasia, T. T., Azis, M. M., Haryanto, I., & Aryapratama, R. (2018). Life cycle assessment (LCA) refuse derived fuel (RDF) waste in Pusat Inovasi Agro Teknologi (PIAT) Universitas Gadjah Mada as alternative waste management for energy. *Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.52394/ijolcas.v2i1.71>
- Budiono, D. I. L., & Ratni, N. (2021). Life cycle assessment (LCA) pengolahan sampah proses termal pada Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Supit Urang Kota Malang. *EnviroUS*, 1(2), 59–66. <https://doi.org/10.33005/enviroUS.v1i2.38>
- Chhabra, V., Parashar, A., Shastri, Y., & Bhattacharya, S. (2021). Techno-economic and life cycle assessment of pyrolysis of unsegregated urban municipal solid waste in India. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(3), 1473–1482. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04746>
- Ferronato, N., Paoli, R., Romagnoli, F., Tettamanti, G., Bruno, D., & Torretta, V. (2024). Environmental impact scenarios of organic fraction municipal solid waste treatment with Black Soldier Fly larvae based on a life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12), 17651–17669. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27140-9>
- Goyal, H., Kumar, R., & Mondal, P. (2023). Life cycle analysis of paver block production using waste plastics: Comparative assessment with concrete paver blocks. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136857>
- Guo, H., Jiang, C., Zhang, Z., Lu, W., & Wang, H. (2021). Material flow analysis and life cycle assessment of food waste bioconversion by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*

- L.). *Science of the Total Environment*, 750, 141656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141656>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Liew, C. S., Mong, G. R., Lim, J. W., Raksasat, R., Rawindran, H., Leong, W. H., Manogaran, M. D., Chai, Y. H., Ho, Y. C., Rahmah, A. U., Lin, C., Khoo, K. S., & Kiatkittipong, W. (2023). Life cycle assessment: Sustainability of biodiesel production from black soldier fly larvae feeding on thermally pre-treated sewage sludge under a tropical country setting. *Waste Management*, 164, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.013>
- Rashedi, A., Gul, N., Hussain, M., Hadi, R., Khan, N., Nadeem, S. G., Khanam, T., Asyraf, M. R. M., & Kumar, V. (2022). Life cycle environmental sustainability and cumulative energy assessment of biomass pellets biofuel derived from agroforest residues. *PLOS ONE*, 17(10), e0275005. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275005>
- Salyati, A. R., Prasetya, A., & Ahmad, J. S. M (2025). Environmental life cycle assessment (E-LCA) of Black Soldier Fly larvae (*Hermetia illucens*) based food waste processing on campus. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1489(1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1489/1/012058>
- Sinaga, R. Y. H., Mulyono, Vicarneltor, D., & Radini, F. A. (2023). Environmental impact study on conversion of multilayer metallized packaging to paving blocks with a life cycle assessment (LCA) approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012036>
- SNI ISO 14040. (2016). *Manajemen lingkungan—Penilaian daur hidup—Prinsip dan kerangka kerja*. Badan Standardisasi Nasional.
- Syafrudin, Budihardjo, M. A., Wahyuningrum, I. F. S., Chegenizadeh, A., Puspita, A. S., & Qadar, S. A. (2024). 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*, 10(4), 100437. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100437>