© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 4 (2026) : 930-937 *ISSN 1829-8907*

Potensi *Landfill Mining* dan Kualitas *Refuse-Derived Fuel* (RDF) dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Manggar, Kota Balikpapan

Ida Bagus Dharmawan[1*] dan Eko Heryadi[2]

[1]Jurusan Teknik Mesin, Program studi Alat Berat, Politeknik Negeri Balikpapan, Indonesia; e-mail: ida.bagus@poltekba.ac.id
[2]Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Indonesia

ABSTRAK

Permasalahan kapasitas Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang kritis mendorong perlunya solusi berkelanjutan tanpa ekspansi lahan. Penelitian ini mengimplementasikan Landfill Mining (LFM) di TPA Manggar kota Balikpapan, untuk menganalisis karakteristik material sampah yang ditimbun dan mengevaluasi potensinya sebagai bahan baku Refuse-Derived Fuel (RDF). Sampel diambil dari dua zona penimbunan dengan kedalaman 1,5; 3,0; dan 4,5 meter, kemudian dipilah dan dianalisis komposisinya. Hasil karakterisasi menunjukkan dominasi fraksi campuran (mixed waste) dan plastik, dengan kandungan bahan berkalori tinggi (plastik 16–24%, kayu 13–14%). Analisis laboratorium terhadap sampel RDF menunjukkan nilai kalor 15,98–17,54 MJ/kg, kadar klorin <0,01%, kadar abu 3,2–6,1%, dan kadar air yang masih tinggi (29,5–45,7%). Nilai kalor, kadar klorin, dan kadar abu telah memenuhi standar RDF untuk co-processing di industri semen dan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), namun kadar air masih jauh melampaui batas maksimum yang dipersyaratkan (<20%) sehingga produk RDF ini belum sepenuhnya memenuhi standar secara keseluruhan dan memerlukan tahap pengeringan tambahan sebelum dimanfaatkan. Estimasi awal menunjukkan fraksi combustible yang berpotensi diolah menjadi RDF berkisar 35–50% dari berat kering material hasil galian. Penelitian ini menyimpulkan bahwa material hasil LFM di TPA Manggar berpotensi tinggi sebagai sumber energi terbarukan yang mendukung ekonomi sirkular, dengan potensi turut memperpanjang umur operasional TPA yang masih memerlukan kuantifikasi lebih lanjut.

Kata kunci: Landfill Mining, Refuse-Derived Fuel, TPA Manggar, sampah perkotaan, nilai kalor

ABSTRACT

The critical capacity issue of the Final Disposal Site (TPA) necessitates sustainable solutions without land expansion. This study implements Landfill Mining (LFM) at the Manggar Landfill in Balikpapan City to analyze the characteristics of landfilled waste material and evaluate its potential as raw material for Refuse-Derived Fuel (RDF). Samples were taken from two disposal zones at depths of 1.5, 3.0, and 4.5 meters, then sorted and their composition analyzed. The characterization results show a dominance of mixed waste and plastic fractions, with high calorific value materials (plastic 16–24%, wood 13–14%). Laboratory analysis of the RDF samples shows a calorific value of 15.98–17.54 MJ/kg, chlorine content <0.01%, ash content 3.2–6.1%, and still-high moisture content (29.5–45.7%). The calorific value, chlorine content, and ash content meet the RDF standard for co-processing in the cement industry and Waste-to-Energy Power Plants (PLTSa), but the moisture content far exceeds the required limit (<20%), so the RDF does not yet fully meet the standard as a whole and requires an additional drying stage before use. A preliminary estimate indicates that the recoverable combustible fraction is approximately 35–50% of the dry weight of the excavated material. This study concludes that LFM-derived material from the Manggar Landfill has high potential as a renewable energy source supporting the circular economy, with a potential contribution to extending the landfill's operational lifespan that still requires further quantification.

Keywords: Landfill Mining, Refuse-Derived Fuel, Manggar Landfill, municipal solid waste, calorific value

Citation: Dharmawan, I. B. dan Heryadi, E. (2026). Potensi *Landfill Mining* dan Kualitas *Refuse-Derived Fuel* (RDF) dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Manggar, Kota Balikpapan. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(4), 930-937, doi:10.14710/jil.24.4.930-937

1. PENDAHULUAN

Permasalahan sampah di Indonesia masih bersifat kompleks dengan volume mencapai sekitar 64 juta ton per tahun, sementara sistem pengelolaannya masih bertumpu pada pola kumpul–angkut–buang. Target pengurangan sampah sebesar 30% dan penanganan 70% pada tahun 2025 belum tercapai (SIPSN, 2025). Hingga tahun 2020, realisasi

pengurangan sampah baru mencapai sekitar 13%, sedangkan capaian penanganan sampah sebesar 42% (Kementerian LHK, 2022). Kondisi tersebut berdampak pada meningkatnya tekanan terhadap kapasitas Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) di berbagai wilayah, termasuk Kota Balikpapan. TPA di wilayah tersebut menghadapi risiko kelebihan kapasitas serta berpotensi menimbulkan dampak lingkungan seperti pencemaran air tanah dan emisi gas metana (Herlambang and Martono, 2008).

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Manggar di Kota Balikpapan, yang memiliki luas 41 hektar dengan tujuh zona penimbunan, telah mencapai kondisi kritis. Lima dari tujuh zona telah mengalami kejenuhan, hanya menyisakan satu zona yang masih beroperasi secara aktif. Meskipun dikelola dengan sistem sanitary landfill yang dilengkapi fasilitas pengolahan lindi dan pemantauan gas, proyeksi waktu operasional TPA ini hanya bertahan hingga tahun 2026. Melihat tingginya timbulan sampah harian, yaitu antara 370 hingga 497 ton, dengan tingkat penanganan sebesar 74,85%, mendesak untuk dikembangkan solusi pengelolaan sampah berkelanjutan yang tidak bergantung pada ekspansi lahan (Pemerintah Kota Balikpapan, 2022).

Landfill mining (LFM) diajukan sebagai solusi tekno-ekonomi yang inovatif. Teknologi ini melibatkan serangkaian proses, mulai dari penggalian (excavation), pemilahan (sorting), hingga pengolahan (processing) material dari timbunan sampah yang telah tertimbun lama. Melalui proses ini, material sampah diubah menjadi produk-produk bernilai tambah, di antaranya Refuse-Derived Fuel (RDF) untuk substitusi energi, kompos untuk aplikasi pertanian, serta bahan baku industri daur ulang (Rifa'i and Ardiatma, 2022). Keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya mereklamasi ruang di dalam landfill, sehingga secara signifikan memperpanjang umur pakai TPA dan mengeliminasi kebutuhan akan lahan baru. Selain itu, LFM berkontribusi pada mitigasi risiko lingkungan (seperti pencemaran lindi dan emisi gas) serta mendorong transisi menuju ekonomi sirkular dengan mengubah limbah menjadi sumber daya, sejalan dengan tinjauan terbaru mengenai kontribusi landfill mining terhadap pemulihan sumber daya dan mitigasi iklim (Goh et al., 2025) (Kristanto and Koven, 2019).

Landfill mining sebagai solusi inovatif memiliki keselarasan strategis dengan kebijakan daerah, tercermin dalam RPJMD Balikpapan 2021–2026 dan Masterplan Persampahan Kota yang berfokus pada keberlanjutan. Dukungan kebijakan ini menjadi faktor kunci dalam menilai kelayakan dan keberlanjutan implementasi teknologi tersebut. Secara operasional, adopsi landfill mining dapat mengubah paradigma pengelolaan TPA Manggar dari sekadar tempat pembuangan akhir menjadi fasilitas pemulihan sumber daya. Transformasi ini merupakan langkah kritis untuk mendorong efisiensi sistem, mewujudkan konsep zero waste, dan menjamin keberlanjutan lingkungan Kota Balikpapan (Balikpapan, 2021).

Penelitian mengenai Landfill Mining (LFM) dan Refuse-Derived Fuel (RDF) dari timbunan sampah tropis di Indonesia masih terbatas, dan sebagian besar studi terdahulu, seperti di TPA Sukawinatan dan TPA Bantargebang, belum secara eksplisit mengaitkan variasi zona dan kedalaman timbunan dengan karakteristik material yang dihasilkan. TPA Manggar memiliki karakteristik yang relevan untuk dikaji, yaitu dua zona penimbunan dengan rentang usia timbunan yang berbeda (Zona 1 ditutup tahun 2008, Zona 2 ditutup tahun 2014) serta iklim tropis lembap Kalimantan Timur dengan curah hujan tinggi, yang keduanya diperkirakan memengaruhi laju dekomposisi, kadar air, dan komposisi material sampah lama secara berbeda dibandingkan lokasi tropis lain yang telah diteliti. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan LFM di TPA Manggar, kota Balikpapan, dengan menganalisis karakteristik material hasil galian dan pengaruh zona/kedalaman timbunan terhadapnya, mengolah fraksi bernilai kalor tinggi menjadi RDF, dan mengevaluasi kualitas RDF (melalui analisis proksimat, nilai kalor, dan klorin) terhadap standar yang berlaku.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di TPA Manggar, Balikpapan. Pengambilan sampel dilakukan di tiga titik yang tersebar di Zona 1 (2 titik sampling: 1°12'38.5"S 116°56'26.10"E dan 1°12'36.70"S 116°56'25.60"E) dan Zona 2 (1 titik sampling: 1°12'43.10"S 116°56'22.80"E). Sampel diambil dengan menggunakan ekskavator pada tiga kedalaman berbeda (1,5; 3,0; dan 4,5 meter) dengan berat basah masing-masing sebesar 100 kg. Sampah yang diambil dari masing-masing titik disaring dengan rotary screen, kemudian dipilah berdasarkan jenis material seperti tanah penutup, sampah organik, plastik, kaca, kain, logam, karet/kulit, kayu, batu, popok, campuran, kertas, serta bahan berbahaya dan beracun (B3). Untuk mendapatkan informasi yang lebih rinci, kadar air dari sampah tersebut diukur setiap pagi dan sore selama 7 hari berturut-turut. Ketiga titik sampling dipilih pada Zona 1 dan Zona 2 karena kedua zona ini merupakan zona yang telah selesai ditimbun dengan rentang usia timbunan berbeda (kurang lebih 6 dan 11 tahun sejak penutupan) dan memiliki akses ekskavasi yang memadai, sehingga dapat merepresentasikan variasi tingkat dekomposisi sampah lama di TPA Manggar; kelima zona lain masih aktif atau belum dapat diakses untuk penggalian pada saat penelitian dilakukan. Sampel combustible dari ketiga kedalaman pada masing-masing titik dikompositkan secara proporsional berdasarkan berat kering tiap lapisan sebelum diuji di laboratorium, sehingga hasil uji pada Tabel 4 merepresentasikan karakteristik agregat per titik sampling, bukan tiap kedalaman secara terpisah.

© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 1. Proses Pengambilan dan Persiapan Sampel

Sampah yang telah dipilah kemudian dikarakterisasi dan diuji, khususnya bahan sampah yang dikategorikan sebagai RDF combustible dan non-combustible. Sampah kategori combustible diuji proksimat serta kadar klorin di Laboratorium Sucofindo Kota Samarinda mengacu pada metode standar analisis bahan bakar padat (kadar air, kadar abu, dan zat terbang mengacu pada ASTM D3172/SNI 01-6235-2000; nilai kalor mengacu pada ASTM D5865; dan kadar klorin mengacu pada ASTM D4208), sebagaimana tercantum pada sertifikat hasil uji laboratorium Sucofindo.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Sampel Hasil Landfill Mining

TPA Manggar Balikpapan memiliki 7 zona penimbunan sampah dengan metode sanitary landfill. Zona 1 mulai beroperasi sejak 13 Februari 2002 dan ditutup pada 12 Maret 2008 dengan usia penumpukan kurang lebih 6 tahun, luasan 26.000 m^2, dan kedalaman tumpukan 25 meter. Sedangkan Zona 2 mulai beroperasi sejak 13 Maret 2008 dan ditutup pada 13 Maret 2014 dengan luasan 30.000 m^2 dan kedalaman tumpukan 30 meter (Pemerintah Kota Balikpapan, 2022). Rangkaian kegiatan penelitian ini meliputi proses ekskavasi material sampah, penjemuran, penyaringan, dan pemilahan sampah. Proses ekskavasi dilakukan pada 3 kedalaman, yaitu 1,5 meter, 3 meter, dan 4,5 meter dengan berat basah masing-masing sebesar 100 kg.

Berdasarkan hasil analisis komposisi sampel pada Tabel 1, fraksi terbesar didominasi oleh sampah campuran (*mixed waste*) sebesar 24,24% dari total sampel. Sampah campuran tersebut terdiri dari berbagai material heterogen yang sulit untuk dipisahkan lebih lanjut. Di sisi lain, fraksi terkecil ditemukan pada limbah kertas dengan persentase 0,12%, yang meskipun rendah, tetap memerlukan penanganan khusus. Hasil ini mengindikasikan dominasi material campuran di lokasi tersebut. Keberadaan limbah B3 yang terdeteksi meskipun dalam jumlah minimal juga memerlukan perhatian khusus terkait potensi dampak lingkungannya.

Tabel 1. Komposisi Sampah pada Zona 1 Titik Sampel 1

Jenis Sampah	Jumlah (Kg) Sampel Kedalaman			Rata-rata	Prosentase (%)
	0 – 1,5 m	1,5 – 3 m	3 – 4,5 m		
Tanah Penutup	33,6	4,2	0	12,60	17,49
Organik (pupuk)	15,8	10,8	15,8	14,13	19,62
Plastik	8	14	12,4	11,47	15,91
Kaca	1	1,2	1,6	1,27	1,76
Kain	0,4	1,2	0,6	0,73	1,02
Logam	0,1	1,8	0,2	0,70	0,97
Karet/Kulit	1,1	3,4	0,6	1,70	2,36
Kayu	7	12,2	10,8	10,00	13,88
Batu/keramik	1,5	2	2,2	1,90	2,64
Kertas	0,05	0	0,2	0,08	0,12
Lain-lain (Campuran)	19,55	18	14,85	17,47	24,24
Total Berat Kering	88,1	68,8	59,25	72,05	

Sumber data diolah dari hasil uji di TPA Manggar

Tabel 2. Komposisi Sampah pada Zona 1 Titik Sampel 2

Jenis Sampah	Jumlah (Kg) Sampel Kedalaman			Rata-rata	Prosentase (%)
	0 – 1,5 m	1,5 – 3 m	3 – 4,5 m		
Tanah Penutup	35,3	10	0	15,10	22,49
Organik (pupuk)	10	11,6	11,6	11,07	16,48
Plastik	7,4	13,8	12,6	11,27	16,78
Kaca	1,25	2,2	2,2	1,88	2,81
Kain	0,6	1,8	2	1,47	2,19
Logam	0,3	0,15	0,05	0,17	0,25
Karet/Kulit	0,6	2,4	0,8	1,27	1,89
Kayu	8	7,7	9,8	8,50	12,66
Batu/keramik	0,9	1,8	1,8	1,50	2,23
Kertas	0	0,1	0,05	0,05	0,07
Lain-lain (Campuran)	20,2	9,75	14,65	14,86	22,15
Total Berat Kering	84.55	61,3	55,55	67,13	

Sumber data diolah dari hasil uji di TPA Manggar

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Berdasarkan hasil analisis komposisi sampel pada Zona 1 Titik 2 di kedalaman 1,5 m, 3 m, dan 4,5 m, fraksi sampah campuran (mixed waste) mendominasi dengan persentase 22,15% dari total sampel. Sampah campuran ini bersifat heterogen dan terdiri dari beragam material yang sulit untuk dipilah secara spesifik. Di sisi lain, fraksi dengan komposisi paling rendah ditemukan pada kategori limbah B3, kertas, dan logam, yang masing-masing memiliki persentase yang sangat kecil.

Berdasarkan hasil analisis komposisi sampel dari Zona 2 Titik 1 pada ketiga kedalaman, fraksi "lain-lain" (yang secara visual didominasi oleh plastik) menempati proporsi terbesar dengan persentase 23,72%. Temuan ini mengindikasikan dominasi material plastik pada berbagai lapisan kedalaman. Sementara itu, limbah logam tercatat sebagai komponen dengan persentase terkecil, yaitu sebesar 0,73%. Meskipun jumlahnya minimal, karakteristik limbah logam yang berpotensi berbahaya mengharuskan penanganan khusus dalam proses pengelolaan selanjutnya.

Secara sistematis, pola pada Tabel 1–3 menunjukkan dua kecenderungan. Pertama, berdasarkan zona, Zona 2 (usia timbunan lebih muda, ditutup 2014) menunjukkan fraksi plastik yang secara konsisten lebih tinggi (16,4–23,5%) dibandingkan Zona 1 (usia timbunan lebih tua, ditutup 2008; 15,9–16,8%), sementara fraksi tanah penutup relatif lebih rendah, sejalan dengan waktu dekomposisi yang lebih singkat pada Zona 2. Kedua, berdasarkan kedalaman, komposisi tanah penutup pada ketiga titik sampling secara konsisten menurun tajam dari lapisan 0–1,5 m menuju 3–4,5 m, sementara fraksi sampah organik dan campuran relatif meningkat pada kedalaman menengah hingga bawah, mengindikasikan lapisan penutup harian terkonsentrasi di dekat permukaan sedangkan sampah tertimbun terdistribusi lebih merata pada kedalaman yang lebih dalam. Pola ini konsisten dengan pemahaman umum bahwa laju dan tahap degradasi sampah di landfill dipengaruhi oleh usia timbunan dan posisi vertikal dalam profil galian, meskipun dengan jumlah titik sampling pada penelitian ini, pola tersebut bersifat indikatif dan memerlukan verifikasi dengan titik sampling yang lebih banyak.

3.2. Karakteristik Kualitas RDF

Guna pemanfaatan sebagai sumber energi, material sampah hasil pemilahan dikategorikan berdasarkan nilai kalornya. Kategori *combustible* terdiri dari material bernilai kalor tinggi, baik plastik maupun material organik kering seperti kayu, kain, karet, dan kulit. Kategori *non-combustible* meliputi material inert seperti kaca, logam, batu, dan keramik yang tidak berkontribusi pada proses pembakaran (Rifa'i and Ardiatma, 2022). Dari hasil karakterisasi pada sampel di Zona 1 dan 2, didapatkan dominasi sampah campuran dalam komposisinya. Bahan berkalori tinggi seperti plastik dan kayu cukup besar, dengan komposisi antara 16–24% untuk plastik dan 13–14% untuk kayu, sehingga memadai untuk memproduksi RDF. Tabel 4 menyajikan hasil pengujian laboratorium terhadap sampel RDF.

Tabel 3. Komposisi Sampah pada Zona 2 Titik Sampel 1

Jenis Sampah	Jumlah (Kg) Sampel Kedalaman			Rata-rata	Prosentase (%)
	0 – 1,5 m	1,5 – 3 m	3 – 4,5 m		
Tanah Penutup	28,7	5,8	0	11,50	16,48
Organik (pupuk)	8,1	6	7,5	7,20	10,32
Plastik	14,8	17	17,3	16,37	23,46
Kaca	2	0,8	1,6	1,47	2,10
Kain	2,8	4,2	2,2	3,07	4,40
Logam	0,6	0,8	0,8	0,73	1,05
Karet/Kulit	1,4	1	0,1	0,83	1,19
Kayu	8	9,8	11,2	9,67	13,86
Batu/keramik	3	2,2	1,8	2,33	3,34
Kertas	0,05	0	0,1	0,05	0,07
Lain-lain (Campuran)	17,5	13,75	18,4	16,55	23,72
Total Berat Kering	86,95	61,35	61	69,77	

Sumber data diolah dari hasil uji di TPA Manggar

Tabel 4. Hasil Pengujian Laboratorium terhadap Sampel RDF TPA Manggar

Parameter	Unit	Zona 1 (Titik 1)	Zona1 (Titik 2)	Zona 2
Total Moisture	%arb	29,5	42,5	45,7
Moisture in Analysis sample	%adb	12,6	13,4	15,7
Ash Content	%adb	3,2	5,9	6,1
Volatile Matter	%adb	68,925	70,295	63,9
Fixed Carbon	%adb	14,4	12,6	16,2
Total Sulfur	%adb	0,23	0,37	0,27
Gross Calorific Value	kcal/kg adb	4190	3816	3930
Gross Calorific Value	MJ/kg adb	17,54	15,98	16,45
Chlorine	%adb	<0,01	<0,01	<0,01

Sumber data hasil pengujian laboratorium Sucofindo Samarinda

© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

3.3. Pembahasan

Secara umum, karakteristik bahan bakar sampah dianalisis dengan mengacu pada pedoman teknis Bank Dunia untuk pengelolaan sampah kota (Aninuddin and Rosariawari, 2021). Berdasarkan pedoman tersebut, batas nilai kalor minimum untuk sampah sebagai bahan bakar di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) adalah 7 MJ/kg. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai kalor sampah dari Zona 1 berkisar antara 15,98–17,54 MJ/kg, sedangkan dari Zona 2 mencapai 16,45 MJ/kg. Nilai-nilai ini secara signifikan melewati batas minimum yang ditentukan, mengindikasikan potensi yang memadai untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif.

Nilai kalor berpengaruh signifikan terhadap proses pembakaran dalam tungku insinerator. Nilai kalor yang rendah menyebabkan bahan bakar sampah sulit terbakar, menurunkan temperatur tungku, dan mengakibatkan stabilitas pembakaran yang tidak optimal (Rifa'i and Ardiatma, 2022).

Berdasarkan hasil karakterisasi sampah dari Zona 1 dan Zona 2 TPA Manggar, parameter nilai kalor telah memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan bakar dalam Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) dengan mengacu pada standar Refuse-Derived Fuel (RDF). Namun, karakteristik sampah sebagai bahan bakar sangat dipengaruhi oleh kondisi lokal, terutama curah hujan dan kejenuhan tanah yang berdampak pada parameter kadar air, zat terbang (volatile matter), dan kadar abu. Salah satu parameter kritis dalam standar adalah kadar air, yang berdasarkan Tabel 5 harus di bawah 20%. Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar air sampah dari kedua zona berada jauh di atas batas tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan penerapan tahap pengeringan tambahan pada sampah sebelum proses konversi energi. Metode yang dapat dipertimbangkan meliputi pengeringan konvensional dengan penjemuran matahari atau penggunaan alat bantu seperti blower untuk mempercepat penurunan kadar air.

Perlu ditegaskan bahwa RDF hasil penelitian ini belum secara langsung memenuhi seluruh spesifikasi pada Tabel 5 karena kadar airnya masih melampaui batas, sehingga statusnya adalah RDF yang memerlukan tahap pre-treatment pengeringan, bukan produk siap pakai. Penurunan kadar air dari kisaran 29,5–45,7% menjadi <20% membutuhkan ruang penampungan, waktu, dan/atau energi tambahan, sehingga kelayakan pengeringan tidak dapat dinilai hanya dari peningkatan nilai kalor di laboratorium. Pengeringan konvensional dengan penjemuran matahari relatif murah dan sesuai dengan iklim tropis kota Balikpapan, tetapi bergantung pada cuaca dan memerlukan lahan serta waktu proses yang lebih lama, sedangkan pengeringan mekanis (seperti blower atau biodrying) lebih cepat dan tidak bergantung cuaca namun menambah biaya energi dan operasional. Studi lanjutan yang menghitung neraca energi dan biaya pengeringan terhadap nilai tambah kalor yang diperoleh diperlukan untuk memastikan bahwa opsi pengeringan yang dipilih tetap menguntungkan secara energi dan ekonomi sebelum direkomendasikan pada skala operasional.

Berdasarkan hasil analisis, kandungan zat terbang (*volatile matter*) pada sampah dari Zona 1 dan Zona 2 TPA Manggar tergolong tinggi, sehingga material tersebut memiliki kecenderungan untuk mudah terbakar tanpa memerlukan bahan bakar pendukung (Wahyono *et al.*, 2019). Karakteristik ini dapat meningkatkan efektivitas dan stabilitas pembakaran dalam tungku insinerator. Sementara itu, abu sebagai komponen inert yang tidak teroksidasi selama proses pembakaran tidak memberikan kontribusi terhadap nilai kalor. Sebaliknya, kadar abu yang tinggi justru dapat menurunkan nilai kalor bahan bakar (Wahyono *et al.*, 2019). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa kadar abu sampah dari kedua zona berada pada rentang yang rendah, yaitu 3,2–5,9% untuk Zona 1 dan 6,1% untuk Zona 2. Nilai-nilai ini berada di bawah batas maksimum yang dipersyaratkan, yaitu <10%, sehingga tidak menjadi faktor pembatas dalam pemanfaatan sampah sebagai bahan bakar.

Berdasarkan pedoman yang tercantum dalam Tabel 5, kandungan klorin merupakan parameter kritis dalam proses pembakaran insinerator. Klorin berpotensi menjadi katalisator pembentukan senyawa berbahaya seperti PCB dan PCDD/PCDF selama pembakaran (*Sistem Informasi B3 & POPs*, no date). Selain itu, keberadaan klorin dapat menurunkan kualitas abu serta mengurangi nilai kalor bahan bakar (Fitriana, 2020), meningkatkan emisi partikel dan gas beracun yang berdampak negatif terhadap lingkungan (Prasetiono, 2016), serta mempercepat korosi pada peralatan insinerator (Kardono, 2011; Wahyono *et al.*, 2019). Hasil karakterisasi sampah dari Zona 1 dan Zona 2 TPA Manggar menunjukkan kadar klorin di bawah 0,01%, sehingga memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan bakar dalam PLTSa.

Tabel 5. Standar *Refuse Derived Fuel* (RDF) (Kementerian Perindustrian)*

Parameter Kualitas	Satuan	Nilai Batas
Nilai Kalor	kkal/kg	> 3000
Klorin	%	< 0,75
Kandungan Volatil	%	50 – 80
Kandungan Air	%	< 20
Kandungan Abu	%	< 10

** (Aninuddin and Rosariawari, 2021; Rifa'i and Ardiatma, 2022)*

Batas kadar air <20% pada Tabel 5 konsisten dengan standar biomassa padat untuk bahan bakar SNI 8675:2018 dan kajian nasional potensi pemanfaatan RDF oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2021), yang digunakan sebagai acuan tambahan di luar rujukan sekunder di atas.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Kelayakan RDF hasil landfill mining tidak dapat dinilai hanya dari parameter nilai kalor, kadar klorin, dan kadar abu semata. Material hasil galian landfill lama berpotensi mengandung logam berat (seperti Pb, Cd, Cu, dan Zn) yang berasal dari residu baterai, limbah elektronik, cat, atau komponen berlapis logam yang turut tertimbun bersama sampah domestik; kandungan tersebut dapat memengaruhi kualitas emisi pembakaran dan abu sisa hasil co-processing di kiln semen maupun PLTSa (Hölzle et al., 2022). Penelitian ini belum melakukan pengujian kandungan logam berat pada fraksi combustible maupun non-combustible sehingga risiko ini belum dapat dikuantifikasi, dan menjadi salah satu keterbatasan penelitian. Pengujian logam berat serta parameter emisi terkait direkomendasikan sebagai tahap lanjutan sebelum RDF dari TPA Manggar diarahkan untuk co-processing pada skala operasional.

Hasil karakterisasi sampel limbah dari Zona 1 dan Zona 2 TPA Manggar menunjukkan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan temuan dari kajian landfill mining di TPA Sukawinatan dan TPA Bantargebang yang dilaporkan dalam penelitian sebelumnya. Namun demikian, perbandingan tersebut perlu ditelaah secara kritis mengingat data pembanding berasal dari sumber yang berbeda, dengan kondisi sampel, basis pengukuran (air-dried basis/ dry basis), dan prosedur preparasi yang tidak seragam. Dengan demikian, perbedaan nilai kalor yang teramati belum dapat secara langsung diatribusikan semata-mata pada perbedaan kualitas substrat antar lokasi TPA. Meskipun terdapat keterbatasan tersebut, data yang disajikan pada Tabel 6 tetap memberikan indikasi awal bahwa material dari TPA Manggar memiliki potensi yang menjanjikan sebagai bahan baku Refuse Derived Fuel (RDF). Akan tetapi, untuk memperoleh perbandingan yang lebih valid dan komparatif, diperlukan pengujian lanjutan dengan basis dan protokol pengukuran yang setara. Perbandingan data secara lebih rinci disajikan pada Tabel 6.

Industri semen mengadopsi Refuse-Derived Fuel (RDF) sebagai bahan bakar alternatif melalui konversi sampah perkotaan. Proses produksi RDF meliputi pemilahan, penghancuran, dan pengeringan sampah untuk meningkatkan nilai kalornya (Chaerul and Wardhani, 2020). Dalam aplikasinya, RDF dimanfaatkan melalui metode *co-processing* pada kiln semen dengan suhu operasi sekitar 1.450°C, yang dapat menggantikan penggunaan batubara secara parsial maupun penuh. Di Indonesia, PT Semen Jawa mengimplementasikan teknologi ini dengan mengolah sampah dari TPA Cimenteng, Sukabumi, sebagai upaya diversifikasi energi dan reduksi emisi karbon. Sementara itu, PT Semen Indonesia telah menggunakan sekitar 76.000 ton RDF di beberapa unit pabriknya, mendukung pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus mendukung prinsip industri berkelanjutan (Elgharbawy *et al.*, 2021).

Industri semen memanfaatkan Refuse-Derived Fuel (RDF) dalam proses termal bersuhu tinggi. Meskipun demikian, pemanfaatan RDF dari sampah domestik di Indonesia masih relatif rendah, dengan rasio penggunaan rata-rata sekitar 3%, jauh di bawah negara-negara Eropa yang mencapai 17%. Kendala utama dalam adopsi RDF adalah belum optimalnya sistem pengumpulan dan pemilahan sampah di tingkat lokal. Secara teknis, RDF yang digunakan dalam pembakaran kiln semen memiliki nilai kalor berkisar antara 2.500–4.000 kkal/kg (Aninuddin and Rosariawari, 2021; Kementerian ESDM, 2021). Salah satu pelopor dalam implementasi teknologi ini di Indonesia adalah Solusi Bangun Indonesia, yang telah menggantikan 5% kebutuhan bahan bakar konvensional dengan RDF. Dengan potensi bahan baku sampah yang tersedia, industri semen di Kalimantan Timur diharapkan dapat segera mengadopsi teknologi serupa guna mendiversifikasi sumber energi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan mendukung praktik industri yang lebih berkelanjutan.

Tabel 6. Standar RDF dan Karakteristik Sampah pada TPA Sukawinatan dan TPA Bantargebang

Parameter	Standar RDF untuk Cement Kiln	Karaktersitik Sampah Galian			
		TPA Sukawinatan*	TPA Bantargebang*	Zona 1 TPA Manggar	Zona 2 TPA Manggar
Nilai Kalor (kkal/kg)	4.778 – 5.973	2.315 – 3.730	1.747	4190	3930
Ukuran partikel (mm)	< 10 – 30	> 30 mm	> 30 mm	-	-
Kadar Klorin (%)	< 1,0 – 0,8	-	0,885	< 0,01	< 0,01
Kadar abu (%)	< 10	61,80 – 70,51	43,32	3,2	6,1

** (Wahyono et al., 2019)*

© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

3.4. Estimasi Neraca Massa dan Potensi Energi RDF

Dalam studi ini, fraksi *combustible* terdefinisi (plastik, kayu, karet/kulit, kain, dan kertas) rata-rata mencapai 33,3–43,0% dari berat kering material pada ketiga titik sampling. Fraksi "lain-lain (campuran)", yang secara visual didominasi plastik namun juga mengandung residu tercampur, menyumbang tambahan 22,2–24,2% dari berat kering. Dengan asumsi konservatif bahwa sekitar separuh dari fraksi campuran tersebut dapat dipulihkan sebagai bahan baku RDF setelah pemilahan lanjutan, perkiraan fraksi *combustible* yang dapat dipulihkan (*recoverable combustible fraction*) berkisar antara 35% hingga 50% dari berat kering material hasil galian, atau setara dengan sekitar 350–500 kg bahan baku RDF per ton material kering yang ditambang. Estimasi ini sejalan dengan kisaran fraksi *combustible legacy waste* pada tinjauan literatur landfill mining internasional, yang dilaporkan berkisar sekitar 4–50% tergantung usia timbunan dan karakteristik lokal (Jain, Kumar and Kumar, 2023).

Perkiraan ini belum memperhitungkan susut proses akibat pemilahan, pencacahan, dan pengeringan pada skala operasional, yang pada praktiknya umumnya menurunkan hasil akhir sekitar 10–20% lebih lanjut, maupun rasio antara berat basah dan berat kering pada saat penggalian, mengingat kadar air awal sampel mencapai 29,5–45,7%. Angka *mass recovery* yang disajikan di sini karenanya bersifat estimasi awal berbasis data komposisi laboratorium, bukan hasil pengukuran neraca massa pada uji coba skala pilot, dan perlu divalidasi melalui percobaan produksi RDF pada skala yang lebih besar.

Dari sisi energi, dengan nilai kalor rata-rata RDF sebesar sekitar 4.000 kkal/kg (16,7 MJ/kg) adb hasil pengujian pada Tabel 4, setiap ton RDF yang dihasilkan berpotensi menyumbang energi termal sekitar 16,7 GJ (setara ≈ 4.600 kWh termal). Dengan estimasi produksi RDF 350–500 kg per ton material kering yang ditambang, potensi energi yang dapat dipulihkan diperkirakan sekitar 5,8–8,4 GJ per ton material hasil landfill mining. Estimasi ini memberikan gambaran awal skala potensi energi bagi pengambil kebijakan dan calon industri pengguna RDF, meskipun studi lanjutan dengan uji coba skala pilot tetap diperlukan untuk memvalidasi angka produksi RDF dan efisiensi konversi energi aktual.

Terkait dengan manfaat potensial berupa perpanjangan masa pakai TPA, penelitian ini belum melakukan perhitungan terhadap volume ruang landfill yang dapat direklamasi, maupun terhadap jumlah residu *non-combustible* (tanah penutup, kaca, logam, serta batuan atau keramik) yang masih harus dikembalikan ke area landfill. Berdasarkan data komposisi yang tercantum pada Tabel 1-3, fraksi *non-combustible* beserta tanah penutup berkontribusi sekitar 25–35% dari berat kering total material. Sebagian dari fraksi tersebut berpotensi untuk dimanfaatkan kembali sebagai bahan timbunan atau penutup, sementara sisanya tetap memerlukan penempatan ulang di lokasi landfill.

Namun demikian, tanpa tersedianya data mengenai densitas material di lapangan serta volume aktual material yang diekskavasi pada skala operasional, estimasi kuantitatif mengenai ruang landfill yang dapat dipulihkan belum dapat disajikan secara andal dalam penelitian ini. Oleh karena itu, pernyataan mengenai perpanjangan umur TPA yang disampaikan pada bagian pembahasan dan kesimpulan hendaknya dimaknai sebagai gagasan konseptual yang bersifat potensial, bukan sebagai hasil perhitungan volumetrik yang telah terverifikasi secara kuantitatif dalam studi ini. Untuk memperoleh simpulan yang lebih sahih, diperlukan kajian volumetrik lanjutan yang lebih komprehensif.

4. KESIMPULAN

Implementasi Landfill Mining (LFM) di TPA Manggar menunjukkan potensi mengubah timbunan sampah lama menjadi Refuse-Derived Fuel (RDF) karena komposisi material berkalori tinggi memadai dan sebagian besar parameter kualitas RDF telah memenuhi standar. Namun, kadar air produk masih terlalu tinggi sehingga RDF belum siap pakai dan memerlukan pre-treatment pengeringan yang kelayakan energi dan ekonominya perlu dikaji lebih lanjut. Aplikasi RDF terbuka untuk co-processing di industri semen maupun bahan bakar PLTSa, sejalan dengan kebijakan daerah dan prinsip ekonomi sirkular. Klaim pemulihan ruang landfill dan perpanjangan umur TPA masih bersifat konseptual karena volume ruang tereklamasi, residu non-combustible, serta kelayakan lingkungan dan operasional RDF belum dihitung dan diuji secara kuantitatif. Rekomendasi implementasi mencakup integrasi teknologi pengeringan, pemilahan yang lebih efisien, dan kolaborasi dengan industri pengguna RDF menuju pengelolaan sampah berkelanjutan dan zero-waste.

Keterbatasan penelitian meliputi: sampel hanya diambil pada tiga titik di dua dari tujuh zona TPA sehingga belum tentu mewakili seluruh variasi material; pengujian logam berat dan kontaminan lain belum dilakukan sehingga kelayakan lingkungan RDF belum menyeluruh; serta estimasi neraca massa, potensi energi, dan volume ruang landfill yang dapat direklamasi masih bersifat perhitungan awal berbasis data laboratorium dan belum divalidasi pada skala operasional. Oleh karena itu, sebelum konsep LFM-RDF direkomendasikan untuk skala komersial, diperlukan kajian lanjutan yang komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dinas Lingkungan Hidup Kota Balikpapan atas izin dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian di TPA Manggar. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pengelola TPA Manggar atas fasilitas dan bantuan teknis selama kegiatan di lapangan berlangsung. Penulis juga mengucapkan terima

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung dan berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Aninuddin, M. and Rosariawari, F. (2021) 'Potensi Pemanfaatan Sampah Tps Di Kabupaten Gresik Sebagai Bahan Bakar Refused Derived Fuel (Studi Kasus Tps Peganden)', *Jurnal ESEC Teknik Lingkungan*, 2(1), pp. 67–80. Available at: https://esec.upnvjt.com/index.php/prosiding/article/view/74.

Balikpapan, D. L. H. K. (2021) *Kajian Lingkungan Hidup Startegis Rencana Pembangunan Jangka Menegah Daerah (KLHS RPJMD) Kota Balikpapan tahun 2025-2029*.

Chaerul, M. and Wardhani, A. K. (2020) 'Refuse Derived Fuel (RDF) from Urban Waste using Biodrying Process: Review', *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 17(1), pp. 62–74. doi: 10.14710/presipitasi.v17i1.62-74.

Elgharbawy, A. S. *et al.* (2021) 'A review on biodiesel feedstocks and production technologies', *Journal of the Chilean Chemical Society*. Sociedad Chilena de Química, pp. 5098–5109. doi: 10.4067/S0717-97072021000105098.

Fitriana, A. (2020) *Studi Kinerja Insinerator Pengolah Limbah Cair B3 di Industri Kimia*. Available at: https://repository.its.ac.id/78720/.

Herlambang, A. and Martono, D. H. (2008) 'Teknologi Pengolahan Sampah dan Limbah', *Pusat Teknologi Lingkungan*, 4(2), pp. 146–160.

Hölzle, I., Somani, M., Ramana, G.V. and Datta, M. (2022) 'Heavy metals in soil-like material from landfills – Resource or contaminants?', *Journal of Cleaner Production*, 369, 133136. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133136.

Jain, M., Kumar, A. and Kumar, A. (2023) 'Landfill mining: A review on material recovery and its utilization challenges', *Process Safety and Environmental Protection*, 169, pp. 948–958. doi: 10.1016/j.psep.2022.11.049.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2021) *Studi Potensi Pemanfaatan Refuse Derived Fuel (RDF) sebagai Bahan Bakar Alternatif Industri Semen dan Pembangkit Listrik*. Jakarta: Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, dan B3, KLHK.

Maulidayanti, E. M., Yuliani, M., Robbani, M. H., Wiharja, W., Hambali, E. and Setyaningsih, D. (2024) 'Evaluasi Produksi Refuse-Derived Fuel (RDF) dari Sampah Perkotaan (Studi Kasus: RDF Plant di Kabupaten Cilacap)', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(2), pp. 179–189. doi: 10.55981/jtl.2024.1008.

Goh, K. C., Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Jumaniyozov, K., Aziz, F., Anouzla, A., Ali, I., Khan, M. I., Alsultan, G. A., Zhang, D., Abass, K. S., Wong, H. Y., Islam, M. T. and Dissanayake, K. K. (2025) 'Promoting landfill mining for sustainable resource recovery, circular economy, and climate mitigation: a review', *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1643195. doi: 10.3389/fenvs.2025.1643195.

Badan Standardisasi Nasional (2018) *SNI 8675:2018 Biomassa Padat untuk Bahan Bakar*. Jakarta: BSN.

Kardono, K. (2011) 'Landfill Gas for Energy: Its Status and Prospect in Indonesia', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 9(1), pp. 1–8. doi: 10.29122/jtl.v9i1.437.

Kementerian ESDM (2021) 'Potensi Energi Baru Terbarukan', *esdm.go.id*, (Januari), p. 2021.

Kementerian LHK (2022) 'Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Indonesia', *Danareksa Research Institute*, pp. 1–30. Available at: https://sipsn.kemenlh.go.id/sipsn/ (Accessed: 3 January 2026).

Kristanto, G. A. and Koven, W. (2019) 'Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia', *City and Environment Interactions*, 4(2019), p. 100027. doi: 10.1016/j.cacint.2020.100027.

Pemerintah Kota Balikpapan, D. L. H. (2022) 'Review of the Masterplan Study for Waste Management in the City of Balikpapan', pp. 1–253.

Prasetiono, A. D. (2016) 'Pengujian Alat Incinerator Untuk Pengolahan Limbah Padat Rumah Sakit Tanpa Menggunakan Bahan Bakar Minyak dan Gas', *Dk*, 53(9).

Rifa'i, I. and Ardiatma, D. (2022) 'Potensi Sampah Landfill Mining Di Tpst Bantargebang Sebagai Bahan Baku Alternatif Refused Derived Fuel (RDF)', *Prosiding SAINTEK: Sains dan Teknologi*, 1(1), p. 539. Available at: https://jurnal.pelitabangsa.ac.id/index.php/SAINTEK/article/view/1368.

SIPSN (2025) *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/*, *Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan*. Available at: https://sipsn.kemenlh.go.id/sipsn/ (Accessed: 3 January 2026).

Sistem Informasi B3 & POPs (no date). Available at: https://sib3pop.menlhk.go.id/index.php/articles/view?slug=pedoman-teknis-terbaik-yang-tersedia-dan-petunjuk-praktik-lingkungan-hidup-terbaik-kategori-insinerasi-limbah-padat-perkotaan&form=MG0AV3 (Accessed: 10 November 2024).

Wahyono, S. *et al.* (2019) 'Studi Karakterisasi Sampah Landfill dan Potensi Pemanfaatannya (Studi Kasus di TPA Sukawinatan dan Bantargebang)', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(2), p. 179. doi: 10.29122/jtl.v20i2.3335.

© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP