

Analisis Aliran Material Limbah Domestik di Pembangkit Listrik Tenaga Batubara

Aris Dwi Wicaksono^{1*}, Arseto Yekti Bagastyo^{2*}

¹Program Studi Magister Manajemen Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

²Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

*Koresponden email: arisdwi.99@gmail.com, bagastyo@enviro.its.ac.id

Diterima: 25 Mei 2025

Disetujui: 02 Juni 2025

Abstract

This study evaluates the zero waste strategy for managing domestic solid waste within the operational environment of a large-scale coal-fired power plant (CFPP) in East Java. The Material Flow Analysis (MFA) method, which uses STAN 2.7.101 software, was employed to map waste flows and evaluate the potential for recovery. Data were collected through field observations, representative sampling and laboratory analysis, including proximate and ultimate testing. The results show that organic waste, such as leaves, food scraps and fruit peels, accounted for over 85 per cent of total waste generation. With recovery factors (RF) exceeding 70 per cent, this supports composting and maggot-based biodegradation. In contrast, inorganic waste, such as plastics and used pipes, had lower RF values ranging from 15 to 45 per cent. MFA modelling estimated that 25–30% of the total waste would remain as residue to be sent to landfill. This study emphasises the importance of reducing and recovering waste upstream to minimise final disposal. The study's originality lies in its systemic focus on domestic waste within an energy industry infrastructure, using MFA and RF as a robust basis for adaptive, sustainable waste management strategies.

Keywords: *material flow analysis; zero waste; domestic waste; recovery factor; coal-fired power plant; maggot biodegradation*

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi strategi zero waste untuk pengelolaan limbah domestik di lingkungan operasional PLTU skala besar di Jawa Timur. Metode *Material Flow Analysis* (MFA) dengan perangkat lunak STAN 2.7.101 digunakan untuk memetakan aliran limbah dan menghitung potensi pemanfaatan. Data diperoleh dari observasi lapangan, pengambilan sampel representatif, serta analisis laboratorium proksimat dan ultimat. Hasil menunjukkan bahwa limbah organik seperti daun, sisa makanan, dan kulit buah mencapai lebih dari 85 persen timbulan dengan *Recovery Factor* (RF) di atas 70 persen, mendukung komposting dan biodegradasi menggunakan larva maggot. Limbah anorganik seperti plastik dan pipa bekas memiliki RF lebih rendah, yaitu antara 15 hingga 45 persen. Model MFA memperkirakan 25 hingga 30 persen limbah tetap menjadi residu yang dibuang ke TPA. Studi ini menekankan pentingnya pemulihan dari hulu dan pengurangan residu, serta mendukung efisiensi operasional dan kebijakan keberlanjutan. Keaslian studi terletak pada fokus sistemik terhadap limbah domestik di infrastruktur industri energi. Kombinasi karakterisasi limbah, MFA, dan RF menjadi dasar yang kuat untuk strategi pengelolaan limbah yang adaptif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *material flow analysis, zero waste, limbah domestik, recovery factor, pltu, biodegradasi maggot*

1. Pendahuluan

Industri pembangkitan tenaga listrik, terutama Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi nasional. Seiring dengan kegiatannya, PLTU tidak hanya menghasilkan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), tetapi juga limbah padat non-B3, yang sebagian besar berasal dari aktivitas domestik seperti perkantoran, kantin, operasional plant dan perumahan karyawan. Sampah domestik ini, meskipun tergolong non-B3, apabila tidak dikelola dengan baik dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan sekitar dan menambah beban sistem pengelolaan limbah [1], [2].

Upaya pengurangan sampah domestik di lingkungan industri telah dilakukan melalui penerapan prinsip 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*). Namun demikian, efektivitas program yang berjalan masih belum

optimal, ditunjukkan dengan tingginya volume sampah residu yang masih berakhir di tempat pembuangan akhir (TPA). Tantangan pengelolaan ini menjadi semakin relevan mengingat terbatasnya lahan TPA dan meningkatnya tuntutan penerapan prinsip pembangunan berkelanjutan di sektor energi [3].

Dalam menghadapi permasalahan tersebut, konsep *Zero Waste Management* menjadi pendekatan strategis yang berpotensi untuk diterapkan. *Zero Waste Management* bertujuan untuk mengurangi produksi limbah semaksimal mungkin melalui pengurangan di sumber, penggunaan kembali, dan daur ulang, sehingga hanya sedikit material yang menjadi residu [4]. Penerapan konsep ini di lingkungan PLTU, khususnya untuk kategori sampah domestik, diharapkan mampu menekan jumlah sampah yang dikirim ke TPA serta meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasi pembangkitan.

Metode *Material Flow Analysis* (MFA) dipilih dalam penelitian ini sebagai alat untuk memetakan aliran material limbah domestik dari sumber hingga pembuangan akhir. Dengan pendekatan ini, dapat diidentifikasi besarnya potensi pemulihan material, jalur dominan aliran limbah, serta titik-titik kritis yang memerlukan intervensi [5], [6]. Beberapa studi terdahulu juga menunjukkan bahwa penggunaan MFA memberikan kejelasan dalam merancang sistem pengelolaan limbah yang efektif di sektor rumah tangga maupun industri [7], [8].

Penelitian ini dilaksanakan di salah satu PLTU yang berlokasi di Kecamatan Paiton, Kabupaten Probolinggo, Provinsi Jawa Timur, dengan cakupan sampel meliputi sampah domestik dari aktivitas perkantoran, kantin, operasional plant, dan perumahan karyawan. Fokus ini dipilih untuk mengisi kekosongan studi terkait penerapan strategi *Zero Waste Management* terhadap limbah padat non-B3 domestik di lingkungan industri pembangkitan tenaga listrik, mengingat sebagian besar penelitian terdahulu masih terpusat pada pengelolaan limbah B3 dan emisi gas buang [9], [10].

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemetaan aliran material sampah domestik secara menyeluruh, estimasi tingkat pemulihan material, serta perhitungan efektivitas pengurangan residu menuju target *zero waste*. Hasil analisis ini diharapkan memberikan kontribusi nyata dalam perumusan strategi pengelolaan sampah domestik yang lebih efisien dan berkelanjutan di lingkungan industri pembangkitan tenaga listrik.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis sistem pengelolaan limbah padat non-B3 yang tergolong sebagai sampah domestik di lingkungan PLTU. Fokus utama diarahkan pada pemetaan aliran material, identifikasi potensi pemulihan, serta estimasi volume residu menggunakan metode *Material Flow Analysis* (MFA). Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran sistemik mengenai input-output material dalam sistem pengelolaan limbah, serta dapat mengidentifikasi jalur dominan dan titik kritis untuk intervensi sistem [4], [6]. Lokasi penelitian dilakukan di area operasional PLTU yang mencakup perkantoran, kantin, operasional plant, dan perumahan karyawan.

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi pendekatan primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung aktivitas pengelolaan sampah domestik di lapangan, serta pengambilan sampel cuplikan sampah untuk dilakukan analisis di laboratorium. Pengambilan sampel dilakukan untuk analisis komposisi dan karakteristik teknis. Analisis dilakukan terhadap cuplikan sampah representatif melalui dua tahapan, yakni analisis proksimat dan ultimat. Hasil dari analisis ini digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kualitas energi potensial dan sifat pembakaran dari masing-masing fraksi material serta digunakan untuk mengevaluasi kelayakan teknis pengolahan sampah baik secara biologis maupun termal [9], [10].

Untuk memperoleh data yang mewakili karakteristik limbah domestik yang dihasilkan oleh fasilitas PLTU, pengambilan sampel dilakukan secara purposif selama periode tertentu. Teknik purposive sampling dipilih karena mampu menangkap variasi timbulan dan karakteristik limbah dari berbagai sumber di area operasional PLTU, termasuk dari perkantoran, mess karyawan, rumah dinas, serta fasilitas umum lainnya.

Total sebanyak 12 titik sampel dipilih secara representatif, meliputi sampah rumah tangga, sampah sejenis sampah rumah tangga dan gabungan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga. Pengambilan dilakukan dalam periode 4 (empat) hari, dengan frekuensi 2 (dua) kali per hari per jenis sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga, yang dilakukan pada hari kerja pada hari pertama dan hari kedua. Kemudian dilakukan pengambilan dengan frekuensi 1 (satu) kali per hari pada jenis sampah gabungan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga. Pengambilan sampel ini untuk menangkap dinamika harian timbulan dan variasi jenis limbah. Masing-masing sampel kemudian dianalisis komposisinya berdasarkan parameter berat (dalam satuan kg) serta diklasifikasikan menjadi kategori organik, anorganik dapat didaur ulang, dan residu.

Data hasil sampling ini digunakan untuk perhitungan komposisi sampah, serta analisis aliran material (*Material Flow Analysis*) dan *Recovery Factor* (RF). Prosedur ini mengacu pada pedoman teknis dalam Permen PU No. 3 Tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dan standar praktik dalam kajian pengelolaan limbah domestik di kawasan industri [11].

Sementara itu, data sekunder diperoleh dari catatan internal timbulan sampah bulanan dan dokumen teknis pengelolaan limbah domestik yang tersedia di lingkungan perusahaan, serta referensi literatur yang relevan. Sampel yang dikumpulkan kemudian diklasifikasikan ke dalam kategori material utama seperti organik, anorganik dan residu.

Dalam analisis komposisi, persentase masing-masing kategori material dihitung menggunakan persamaan :

$$\text{Persentase Sampah (\%)} = \frac{(A)}{(B)} \times 100 \% \quad (1)$$

Keterangan:

A = Berat timbulan jenis sampah

B = Berat total timbulan sampah

Selain itu, untuk mengevaluasi efektivitas sistem pengelolaan dalam memulihkan material yang dapat digunakan kembali atau didaur ulang, dilakukan perhitungan *Recovery Factor* (RF) menggunakan persamaan:

$$\text{Recovery Factor (RF)} = \frac{(C)}{(D)} \times 100 \% \quad (2)$$

Keterangan:

C = Berat sampah yang dikelola

D = Total timbulan sampah

Nilai RF digunakan untuk mengukur efektivitas pemulihan material berdasarkan jenis dan fraksi, serta sebagai indikator awal penerapan prinsip *Zero Waste Management* dalam sistem yang sedang berjalan [7], [12]. Data yang dianalisis diambil berdasarkan periode pengamatan antara Juli 2023 hingga Juni 2024. Evaluasi dilakukan sepenuhnya pada aspek teknis pemetaan aliran material dan perhitungan tingkat pemulihan material. Fokus penelitian hanya terbatas pada sampah domestik, yang meliputi limbah padat non-B3 yang berasal dari aktivitas rumah tangga dan fasilitas penunjang di lingkungan industri pembangkitan tenaga listrik.

Untuk proses pemodelan MFA, digunakan perangkat lunak STAN (*Substance Flow Analysis*) versi 2.7.101 yang dikembangkan oleh TU Wien. STAN digunakan karena kemampuannya dalam melakukan perhitungan data *reconciliation*, *error estimation*, dan visualisasi alur input-output dalam sistem. Pendekatan ini memungkinkan pemetaan yang transparan dan sistematis terhadap aliran sampah domestik mulai dari sumber, proses pemilahan, hingga penanganan akhir. Perangkat ini memungkinkan visualisasi aliran massa dalam bentuk diagram Sankey dan mendukung konsistensi neraca massa berdasarkan hukum kekekalan material [5], [13]. Model MFA disusun berdasarkan data timbulan aktual, fraksi komposisi, serta estimasi pengurangan, pemanfaatan kembali, dan volume residu.

Data input untuk MFA berasal dari hasil perhitungan timbulan dan komposisi sampah, serta informasi potensi pemanfaatan masing-masing fraksi yang diperoleh dari studi literatur dan kondisi aktual di lapangan. Data massa dimasukkan ke dalam model mass balance berbasis *single-layer, steady-state system*, dengan asumsi bahwa seluruh input, output, dan aliran intermediate dalam sistem berlangsung dalam kondisi konstan selama satuan waktu tertentu.

Untuk mendukung pemetaan karakteristik teknis limbah, dilakukan pengujian laboratorium pada cuplikan sampah campuran yang mewakili sampel SRT dan SSSRT. Analisis yang dilakukan meliputi:

- Analisis proksimat, yakni untuk mengetahui *total moisture*, *inherent moisture*, kadar abu, *volatile solid*, *fixed carbon* serta pengujian nilai kalor (*calorific value*),
- Analisis ultimat, yakni untuk menentukan kadar unsur karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), sulfur (S), dan oksigen (O).

Hasil pengujian laboratorium ini menjadi dasar untuk menilai kualitas sampah sebagai bahan baku alternatif dan sekaligus memperkuat justifikasi pilihan metode pengolahan sesuai prinsip *Zero Waste Management*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Timbulan dan Komposisi Sampah

Pengamatan terhadap timbulan dan komposisi sampah domestik dilakukan selama dua semester pengukuran, mencakup area perumahan karyawan, fasilitas umum, serta lingkungan perkantoran pada kawasan industri pembangkitan tenaga listrik. Sampah domestik dalam kajian ini terdiri atas dua kategori, yaitu Sampah Rumah Tangga (SRT) dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga (SSSRT), yang seluruhnya termasuk limbah padat non-B3.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa fraksi organik mendominasi timbulan sampah pada kedua kategori. Selama periode Juli–Desember 2023, timbulan SRT mencapai 43.335,25 kg, dengan fraksi organik sebesar 98,62%. Pada periode yang sama, SSSRT mencatatkan volume sebesar 19.551,11 kg, dengan dominasi fraksi organik sebesar 97,24%. Pola dominasi yang serupa ditemukan pada semester berikutnya, Januari–Juni 2024, dengan proporsi fraksi organik mencapai 98,67% untuk SRT dan 85,51% untuk SSSRT

Tabel 1. Timbulan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga

Periode	Jumlah Timbulan SRT				Jumlah Timbulan SSSRT			
	Organik		Anorganik		Organik		Anorganik	
	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
Juli - Desember 2023	43.335,25	98,62%	606,69	1,38%	19.551,11	97,24%	553,93	2,76%
Januari - Juni 2024	43.697,47	98,67%	590,68	1,33%	16.563,81	96,29%	637,83	3,71%

Dominasi fraksi organik ini menunjukkan tingginya potensi pemanfaatan material melalui metode biologis seperti pengomposan dan biodegradasi. Secara kumulatif, timbulan SRT dalam dua semester tercatat sebesar 87.032,72 kg, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan timbulan SSSRT yang sebesar 36.114,92 kg. Hal ini mencerminkan intensitas aktivitas domestik yang lebih tinggi di area hunian. Sementara itu, variasi fraksi anorganik tampak lebih menonjol pada SSSRT, terutama berasal dari aktivitas kantin dan fasilitas umum, seperti sisa makanan karyawan, kulit buah, pipa paralon bekas, serta botol dan gelas plastik.

Komposisi jenis material ditunjukkan dalam **Tabel 2**. Pada SRT, fraksi sampah daun mendominasi dengan porsi lebih dari 98%, sedangkan fraksi minor seperti kertas, plastik, dan botol hanya berkisar di bawah 1%. SSSRT menunjukkan sebaran yang lebih beragam, dengan fraksi signifikan berupa sampah daun, sisa makanan, serta kulit buah dari kantin.

Tabel 2. Komposisi Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga

Periode	Komposisi SRT					Komposisi SSSRT				
	Sampah Daun	Pipa Paralon Bekas	Kertas Bekas	Botol & Gelas Plastik	Sisa Makanan Karyawan	Kulit Buah dari Kantin	Sampah Daun	Pipa Paralon Bekas	Kertas Bekas	Botol & Gelas Plastik
Juli-Desember 2023	98,62%	0,25%	0,28%	0,85%	1,43%	1,70%	94,12%	0,51%	0,56%	1,69%
Januari-Juni 2024	98,67%	0,25%	0,27%	0,82%	1,65%	9,12%	85,51%	0,68%	0,76%	2,27%

Perbedaan ini memberikan indikasi kuat bahwa sumber aktivitas berperan besar terhadap struktur komposisi sampah. Distribusi fraksi pada penelitian ini memiliki tingkat resolusi yang lebih rinci dibandingkan studi sejenis. Pada studi sebelumnya menekankan dominasi fraksi organik dalam sampah domestik kawasan tropis, namun belum memisahkan secara jelas antara kategori SRT dan SSSRT [8]. Penelitian ini memberikan pembeda penting melalui segmentasi spasial dan temporal yang lebih terstruktur, sehingga menghasilkan pemetaan komposisi yang lebih representatif terhadap karakter lingkungan dan aktivitas spesifik di sektor pembangkitan listrik. Temuan ini memperkuat relevansi pendekatan *Zero Waste Management* dalam konteks industri energi, karena tingginya dominasi fraksi organik memungkinkan dilakukannya intervensi pengelolaan sejak dari sumbernya.

Studi serupa [8] pada kawasan pemukiman padat di Surabaya menunjukkan dominasi fraksi organik sebesar 72%, namun dengan komposisi yang lebih bervariasi pada fraksi anorganik seperti kertas dan logam. Sementara itu, penelitian [7] di kawasan industri Balkan menunjukkan bahwa tingkat pemulihan

sampah domestik di area industri umumnya lebih rendah akibat kurangnya sistem pemilahan di sumber dan terbatasnya fasilitas pengolahan onsite.

Hal ini mengindikasikan bahwa tingginya proporsi fraksi organik serta nilai kalor yang moderat dalam penelitian ini memiliki karakteristik yang khas pada lingkungan PLTU, terutama karena sumber sampah sebagian besar berasal dari aktivitas perkantoran dan kantin. Oleh karena itu, pendekatan *zero waste* pada lingkungan industri seperti PLTU perlu dirancang berbeda dibanding pendekatan pada pemukiman padat atau kawasan komersial umum, khususnya dalam integrasi program pemanfaatan onsite dan edukasi pemilahan

3.2. Karakteristik Sampah Domestik

Berdasarkan hasil uji proksimat, rata-rata kadar air total (arb) menunjukkan nilai cukup tinggi, terutama pada SRT yang mencapai lebih dari 50%, sedangkan SSRT menunjukkan kadar air lebih rendah. Kandungan *volatile solid* yang tercatat lebih dari 60% pada SSRT mengindikasikan potensi mudah terbakar, namun kadar abu yang relatif tinggi membatasi efisiensi konversi energi secara langsung. Nilai kalor yang diperoleh dari analisa proksimat dan ultimat menunjukkan kisaran antara 3560 hingga 4640 kkal/kg (adb), di mana SSRT cenderung memiliki nilai kalor lebih tinggi daripada SRT. Variasi ini dipengaruhi oleh komposisi material yang lebih heterogen dan mengandung fraksi plastik serta sisa makanan berkalor tinggi.

Sementara itu, analisis ultimat mengungkapkan dominasi karbon (C) dan oksigen (O) sebagai unsur utama dalam material sampah, dengan kontribusi masing-masing sebesar 30–40%. Kandungan hidrogen (H) dan nitrogen (N) relatif rendah namun tetap penting dalam menentukan nilai kalor dan emisi pembakaran. Sulfur (S), sebagai indikator potensi polusi, tercatat dalam jumlah sangat rendah (<1%), yang memperkuat kesimpulan bahwa sampah ini aman untuk diolah secara termal maupun biologis. Hal ini sejalan dengan temuan serupa dari penelitian yang menyatakan bahwa kandungan sulfur rendah merupakan keunggulan bagi proses pengolahan ramah lingkungan [6], [9].

Komposisi kimia seperti ini secara umum menggambarkan karakteristik *biomass-based solid waste*, yang memiliki potensi signifikan untuk pengomposan, dekomposisi biologis, atau alternatif energi. Dibandingkan dengan referensi studi lain [10], nilai kalor dan struktur kimia dalam penelitian ini relatif lebih stabil serta berbasis data primer dengan metode representatif, sehingga memperkuat validitas sebagai dasar formulasi strategi pengelolaan lanjutan.

Tabel 3. Data Rata-rata Analisa Cuplikan Sampah

Parameter	SRT	SSSRT	Gabungan SRT dan SSSRT
Analisa Proksimat			
Total Moisture (arb)	54,03	38,86	54,99
Inherent Moisture (arb)	58,12	35,84	51,76
Kadar Abu	8,26	10,67	7,48
Volatile Solid	53,42	62,76	47,50
Fixed Carbon	0,69	0,90	0,63
Kalor (arb)	0,00	0,00	0,00
Kalor (adb)	3560,35	3985,69	3494,72
Kalor (db)	4253,16	4640,99	4087,53
Analisa Ultimat			
Karbon C (db)	33,75	40,94	30,93
Nitrogen N (db)	5,30	6,57	4,81
Hidrogen (db)	4,96	6,63	4,44
Oksigen O (db)	47,76	39,42	48,88
Sulfur S (db)	0,00	0,00	0,00
Abu (db)	7,65	9,88	6,93

Karakteristik fisik dan kimia dari sampah domestik di lingkungan industri seperti PLTU tidak hanya merefleksikan sumber aktivitasnya, tetapi juga memberikan dasar kuantitatif yang kuat untuk mendesain sistem pengelolaan *Zero Waste* yang tepat sasaran.

3.3. Material Flow Analysis dan Recovery Factor

Pendekatan pemetaan sistem pengelolaan sampah domestik di lingkungan PLTU memerlukan metode yang mampu menggambarkan keterkaitan antara sumber timbulan, jalur pemrosesan, dan output akhir secara kuantitatif. *Material Flow Analysis* (MFA) digunakan untuk memenuhi kebutuhan ini dengan

menyajikan visualisasi aliran material yang memuat informasi proses dan massa dari setiap kategori sampah dalam sistem yang terintegrasi.

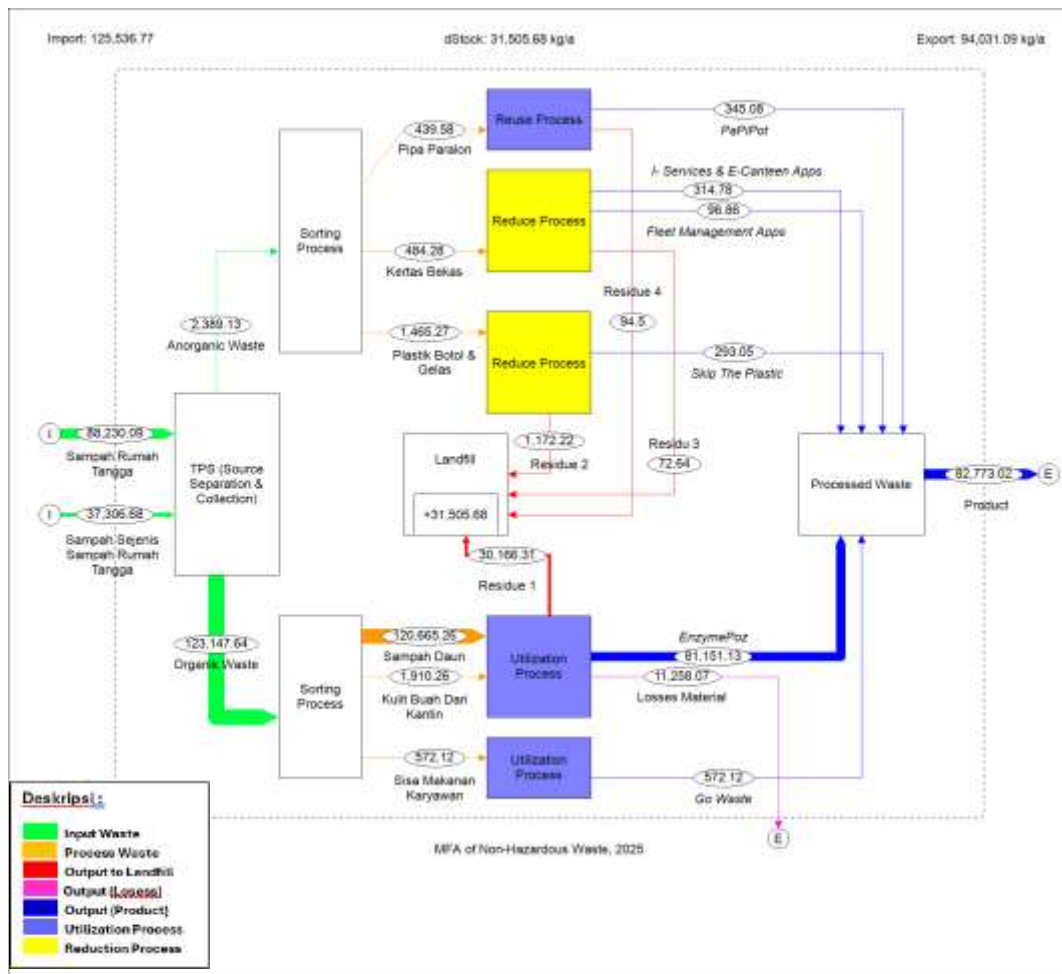
Model MFA yang dibangun memperlihatkan pergerakan material dari titik awal pengumpulan hingga tahap akhir pengelolaan, seperti pemanfaatan kembali, proses daur ulang, atau pembuangan sebagai residu. Diagram hasil pemodelan memberikan pemisahan visual yang jelas antara aliran fraksi organik dan anorganik, serta jalur-jalur pemanfaatan yang dilalui oleh masing-masing fraksi.

Pemanfaatan MFA tidak hanya memungkinkan pemetaan sistem secara menyeluruh, tetapi juga membantu dalam mengidentifikasi titik-titik kritis yang berpotensi menjadi sumber inefisiensi, seperti fraksi yang belum optimal ditangani atau jalur aliran yang berujung langsung ke landfill tanpa melalui proses pemulihan. Hal ini menjadi landasan penting untuk melakukan intervensi teknis dan manajerial berbasis data.

Lebih lanjut, informasi yang diperoleh dari diagram MFA memungkinkan analisis terhadap kontribusi masing-masing fraksi terhadap keberhasilan sistem, termasuk efisiensi pemilahan di awal, efektivitas pengolahan di tengah proses, dan rasio residu yang tersisa. Dengan demikian, MFA tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis dan proyektif dalam menyusun strategi peningkatan performa sistem pengelolaan limbah.

Dari hasil visualisasi pada **Gambar 1**, aliran material menunjukkan bahwa fraksi organik seperti daun, sisa makanan, dan kulit buah mengalir dominan ke jalur pemanfaatan biologis. Sementara fraksi anorganik, khususnya plastik dan paralon, cenderung tidak seluruhnya termanfaatkan dan masih terdapat dalam residu akhir. Hal ini menunjukkan perbedaan efektivitas pengelolaan berdasarkan sifat dan karakteristik material.

Untuk menggambarkan efektivitas pemrosesan tersebut secara kuantitatif, dilakukan penghitungan *Recovery Factor* (RF) untuk masing-masing fraksi sampah. Pada kategori Sampah Rumah Tangga (SRT), fraksi seperti pipa paralon bekas mencatat nilai RF tertinggi, disusul oleh sampah daun dan kertas bekas. Fraksi plastik menunjukkan kinerja pemanfaatan paling rendah



Gambar 1. Material Flow Analysis Untuk Sampah Rumah Tangga & Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga

Tabel 3. Recovery Factor SRT

Jenis Sampah	Berat (kg)	Reduce (kg)	Recycle (kg)	Total Pemanfaatan (kg)	Recovery Factor (%)
Pipa Paralon Bekas	220,35	0	176,28	176,28	80,00
Sampah Daun	87.032,72	0	65.274,54	65.274,54	75,00
Kertas Bekas	242,51	157,63	0	157,63	65,00
Botol dan Gelas Plastik	734,5	146,9	0	146,9	20,00

Adapun pada kategori Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga (SSSRT), kulit buah dari kantin merupakan fraksi dengan RF tertinggi, disusul oleh sampah daun dan sisa makanan karyawan. Fakta ini memperlihatkan bahwa karakteristik fraksi sangat berpengaruh terhadap peluang pemanfaatannya, khususnya pada sistem yang mengandalkan proses biologis seperti komposting dan pengolahan *maggot*.

Tabel 4. Recovery Factor SSSRT

Jenis Sampah	Berat (kg)	Reduce (kg)	Recycle (kg)	Total Pemanfaatan (kg)	Recovery Factor (%)
Pipa Paralon Bekas	219,23	0	168,8	168,8	77,00
Sisa Makanan Karyawan	572,12	0	284,63	284,63	49,75
Kulit Buah dari Kantin	1.910,26	0	1.569,28	1.569,28	82,14
Sampah Daun	33.632,54	0	25.224,41	25.224,41	75,00
Kertas Bekas	241,76	157,15	0	157,15	65,00
Botol dan Gelas Plastik	730,77	146,15	0	146,15	20,00

Lebih lanjut, analisis data semesteran untuk masing-masing fraksi memperlihatkan perbedaan signifikan pada efektivitas pemrosesan. Untuk kategori SRT, sampah daun memiliki kontribusi dominan pada jalur *recycle* (> 99%), sedangkan plastik dan kertas masih berada pada kisaran di bawah 1%. Hal ini mempertegas tantangan dalam menangani fraksi plastik yang bersifat campuran dan seringkali tidak memenuhi kualitas daur ulang.

Tabel 5. Persentase Pengelolaan SRT

Periode	Reduce		Recycle	
	Kertas Bekas	Botol dan Gelas Plastik	Sampah Daun	Pipa Paralon Bekas
Juli - Desember 2023	0,37%	0,26%	99,06%	0,31%
Januari - Juni 2024	0,35%	0,25%	99,10%	0,30%

Sementara itu, pada SSSRT, kulit buah dari kantin memperlihatkan proporsi *recycle* paling menonjol pada semester kedua. Fraksi lainnya seperti kertas dan makanan memiliki performa yang fluktuatif, dan plastik tetap menjadi fraksi dengan pemanfaatan rendah. Rendahnya RF dan persentase *recycle* pada fraksi plastik dapat dikaitkan dengan rendahnya nilai ekonomis serta ketidaksesuaian dengan infrastruktur pengolahan yang ada.

Tabel 6. Persentase Pengelolaan SSSRT

Periode	Reduce			Recycle		
	Kertas Bekas	Botol dan Gelas Plastik	Sisa makanan karyawan	Kulit Buah dari Kantin	Sampah Daun	Pipa Paralon Bekas
Juli - Desember 2023	0,70%	0,50%	2,11%	2,50%	93,60%	0,60%
Januari - Juni 2024	0,83%	0,58%	2,13%	11,75%	84,06%	0,65%

Temuan ini memperkuat studi yang menyebutkan bahwa perbedaan karakteristik fisik dan kimia sampah menentukan jalur optimal pengelolaan material [4], [12]. Selain itu, juga menegaskan pentingnya pemetaan berbasis massa dalam merancang strategi pengurangan residu menuju nol limbah [14]. Dengan demikian, MFA bukan hanya alat visualisasi, namun juga dapat menjadi dasar perumusan kebijakan

berbasis data yang spesifik untuk jenis fraksi tertentu. Dalam konteks ini, peningkatan fasilitas pengolahan fraksi plastik dan penguatan sistem pemilahan di sumber menjadi krusial untuk meningkatkan efektivitas sistem dan mendekati target *zero waste* yang diharapkan.

3.4. Efektivitas Sistem Pengelolaan dan Relevansi Penerapan *Zero Waste*

Analisis integratif antara hasil komposisi, karakteristik teknis, dan aliran material memberikan gambaran yang utuh mengenai kinerja sistem pengelolaan sampah domestik di lingkungan PLTU. Secara keseluruhan, sistem yang diterapkan telah menunjukkan kecenderungan positif dalam mengarahkan fraksi organik ke proses pemanfaatan, baik melalui pengurangan (*reduce*) maupun daur ulang (*recycle*). Hal ini merupakan indikator penting bahwa sistem telah memenuhi prinsip *fit-for-purpose* terhadap jenis material yang paling mendominasi dalam timbulan, yakni organik basah.

Kesesuaian ini menjadi poin penting karena berdasarkan literatur, fraksi organik dalam wilayah tropis cenderung memiliki kadar air tinggi dan mudah terdegradasi [8] sehingga pengelolaan berbasis pendekatan biologis seperti komposting lebih tepat diterapkan dibanding pendekatan termal. Fakta bahwa sebagian besar massa material berhasil dialirkan ke jalur pemanfaatan menunjukkan efektivitas sistem yang telah berjalan.

Namun demikian, efektivitas tersebut belum merata pada seluruh jenis material. Salah satu indikator penting yang memperlihatkan ketimpangan ini adalah nilai *Recovery Factor* (RF) pada fraksi non-organik seperti plastik dan beberapa komponen anorganik lainnya yang tergolong rendah. Rendahnya nilai pemanfaatan fraksi plastik menunjukkan bahwa hingga saat ini, fraksi tersebut cenderung berakhir sebagai residu yang dikirim ke tempat pemrosesan akhir (TPA). Temuan ini juga diperkuat oleh hasil *Material Flow Analysis* (MFA), yang menunjukkan masih adanya proporsi aliran signifikan menuju *landfill*. Hal ini serupa dengan temuan yang menyebutkan bahwa plastik merupakan salah satu fraksi dengan tingkat *circularity* paling rendah di sistem pengelolaan kawasan tropis, utamanya karena keterbatasan sistem segregasi di sumber dan belum tersedianya infrastruktur daur ulang yang memadai [12].

Selain itu, fraksi minor seperti kertas bekas dan pipa paralon bekas juga menunjukkan nilai pemanfaatan yang belum maksimal, meskipun dari sisi karakteristik teknis, material tersebut tergolong mudah ditangani secara daur ulang. Hal ini membuka ruang evaluasi terhadap efektivitas pemilahan di hulu (*source segregation*) dan efisiensi sistem penyaluran ke unit pengolahan yang sesuai. Perbandingan antar fraksi juga memperlihatkan bahwa tingginya tingkat pemanfaatan tidak selalu berkorelasi langsung dengan volume timbulan, tetapi juga dipengaruhi oleh karakteristik fisik, kimia, serta aksesibilitas teknologi pengolahan yang tersedia.

Dengan mempertimbangkan dinamika tersebut, penerapan *Zero Waste Management* di lingkungan PLTU ini dapat dikatakan telah menunjukkan keberhasilan awal pada fraksi dominan, namun masih terdapat tantangan nyata dalam mengelola fraksi minor dan residu. Oleh karena itu, meskipun arah pengelolaan telah sejalan dengan prinsip keberlanjutan, perbaikan sistem diperlukan terutama pada aspek berikut:

- Penguatan sistem pemilahan di sumber dan peningkatan partisipasi penghuni kawasan perumahan maupun pengguna fasilitas umum.
- Penyediaan sarana pengolahan tambahan khusus untuk fraksi plastik dan anorganik non-B3 yang saat ini belum tertangani optimal,
- Peningkatan monitoring terhadap jalur pemanfaatan untuk menjamin bahwa nilai *Recovery Factor* mencerminkan upaya pengurangan yang efektif.

Keseluruhan hasil ini memperkuat urgensi implementasi pendekatan *zero waste* secara menyeluruh, bukan hanya terbatas pada fraksi dominan. *Zero Waste Management* dalam konteks sistem pengelolaan sampah domestik di PLTU tidak hanya menjadi tuntutan kebijakan, tetapi juga strategi teknis yang dapat meningkatkan efisiensi operasional, memperpanjang umur TPA, dan mendukung pencapaian target PROPER maupun sertifikasi lingkungan lainnya.

3.5. Implikasi Penerapan *Zero Waste Management*

Penerapan *Zero Waste Management* dalam sistem pengelolaan sampah domestik di lingkungan pembangkitan tenaga listrik menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan, khususnya melalui optimalisasi fraksi yang bernilai guna tinggi. Pemetaan sistem aliran material mengidentifikasi bahwa mayoritas aliran material masih didominasi oleh residu yang belum termanfaatkan secara optimal, terutama dari fraksi plastik dan sisa makanan. Temuan ini mengisyaratkan adanya ruang peningkatan untuk mengurangi volume sampah yang berakhir di TPA.

Analisis karakteristik teknis menunjukkan bahwa fraksi organik seperti kulit buah dan sisa makanan memiliki potensi yang tinggi untuk dimanfaatkan melalui jalur pemrosesan biologis, dengan nilai *Recovery Factor* (RF) mencapai lebih dari 80%. Sementara itu, fraksi anorganik seperti kertas bekas dan pipa paralon menunjukkan kontribusi signifikan melalui skema daur ulang, sedangkan fraksi plastik masih mencatat RF rendah, sehingga memerlukan pendekatan pengelolaan khusus.

Secara sistemik, pendekatan MFA mengungkapkan bahwa sekitar seperempat hingga sepertiga total massa sampah tahunan masih berupa residu. Hal ini membuka peluang strategis untuk menekan residu dengan memperkuat strategi pemilahan di sumber dan menambah titik pemanfaatan onsite. Misalnya, dalam konteks fraksi organik, teknologi pengomposan dan pemrosesan berbasis larva *Black Soldier Fly* dapat diperluas implementasinya karena terbukti memberikan hasil konversi yang efisien dan aman secara lingkungan [10].

Implikasi teknis dari hasil ini adalah perlunya rekayasa sistem yang terstruktur untuk:

1. Optimalisasi pemilahan sumber di perkantoran dan perumahan,
2. Integrasi unit pengolahan onsite yang memanfaatkan pendekatan daur ulang dan konversi biologis,
3. Peningkatan pengawasan operasional melalui keterlibatan pengguna, edukasi dan monitoring berbasis data.

Selain itu, hasil pemodelan juga mengindikasikan bahwa keberhasilan pengurangan residu tidak hanya bergantung pada perangkat teknis, tetapi juga pada pendekatan kelembagaan dan manajerial. Oleh karena itu, penerapan *Zero Waste Management* perlu didukung dengan perbaikan kebijakan internal, sinergi lintas unit kerja, serta integrasi dengan program berkelanjutan seperti PROPER dan ISO 14001 [15], [16]

Secara keseluruhan, pendekatan berbasis data melalui MFA dan RF dapat menjadi instrumen valid untuk mengarahkan transformasi pengelolaan sampah di sektor energi menuju sistem yang lebih efisien, tidak hanya dalam hal kepatuhan lingkungan, tetapi juga dalam mendukung reputasi keberlanjutan dan efisiensi operasional jangka panjang [4], [12].

Temuan dalam penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk penguatan sistem manajemen sampah domestik di lingkungan PLTU, khususnya dalam merancang strategi pengelolaan yang berbasis pada karakteristik spesifik sumber timbunan dan efisiensi pemanfaatan. Salah satu implikasi praktis yang dapat diterapkan adalah optimalisasi pemanfaatan fraksi organik melalui fasilitas pengolahan onsite seperti komposter atau unit pemroses maggot, yang telah terbukti efektif dalam konteks penelitian ini. Pendekatan ini sejalan dengan praktik terbaik menyebutkan bahwa modularisasi sistem pengelolaan memungkinkan efisiensi lebih tinggi dalam pemrosesan fraksi tertentu [9].

Selain itu, tingginya nilai *Recovery Factor* (RF) pada beberapa fraksi anorganik seperti pipa paralon dan kertas bekas menunjukkan adanya potensi sirkularitas material yang dapat diadopsi dalam skema kebijakan hijau sektor energi, misalnya melalui integrasi pengelolaan limbah dalam sistem ISO 14001 atau indikator PROPER. Upaya ini juga mendukung arah kebijakan nasional yang mendorong penerapan ekonomi sirkular dan zero waste industry [12]

Peta aliran material yang diperoleh melalui metode *Material Flow Analysis* (MFA) juga membuka peluang untuk menyusun blueprint kebijakan pengurangan sampah domestik di sektor ketenagalistrikan, dengan berbasis pada segmentasi sumber timbunan dan potensi pemulihannya. Dengan pendekatan ini, manajemen PLTU dapat mengembangkan kebijakan internal yang lebih terarah, sekaligus memberikan kontribusi terhadap target pengurangan limbah nasional dan efisiensi sumber daya dalam jangka panjang.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan *Material Flow Analysis* (MFA) dapat memberikan gambaran kuantitatif dan visual terhadap efektivitas pengelolaan sampah domestik di lingkungan PLTU, khususnya untuk kategori non-B3. Hasil kajian memperlihatkan bahwa sistem yang telah berjalan secara umum berhasil mengarahkan fraksi organik ke jalur pemanfaatan biologis, dengan tingkat pemulihan yang tinggi terutama pada jenis sampah daun dan kulit buah. Kesesuaian karakteristik teknis, seperti kadar air dan komposisi kimia, memperkuat bahwa pengolahan berbasis komposting atau metode biologis lainnya merupakan pendekatan yang paling layak secara teknis.

Lebih dari itu, nilai *Recovery Factor* (RF) dari beberapa fraksi utama mencapai lebih dari 70%, mencerminkan efisiensi sistem dalam menangkap potensi pemanfaatan. Namun demikian, masih terdapat tantangan pada fraksi non-organik seperti plastik dan material anorganik lain yang menunjukkan pemanfaatan rendah dan berakhir sebagai residu. Temuan ini mengindikasikan perlunya intervensi lanjutan pada aspek pemilahan di sumber dan penyediaan sarana pengolahan yang sesuai.

Penerapan MFA juga mengidentifikasi bahwa sekitar seperempat dari total massa tahunan limbah masih mengalir ke landfill, terutama dari jalur residu yang tidak termanfaatkan. Oleh karena itu, meskipun sistem pengelolaan telah selaras dengan prinsip *Zero Waste Management*, evaluasi dan optimalisasi masih

dibutuhkan pada titik-titik kritis dalam sistem. Pendekatan berbasis data ini tidak hanya relevan untuk meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga mendukung pencapaian indikator keberlanjutan perusahaan, termasuk PROPER dan ISO 14001.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi antara pemetaan aliran material, analisis karakteristik teknis, dan penghitungan RF dapat menjadi dasar yang kuat dalam merumuskan strategi pengelolaan sampah domestik industri yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Rekomendasi ke depan mencakup penguatan kebijakan pemilahan di sumber, integrasi teknologi pemrosesan organik, serta pelibatan pengguna dan manajemen dalam pengawasan sistem secara menyeluruh.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas dukungan fasilitas dan bantuan teknis dalam proses analisis laboratorium terhadap sampel sampah domestik.

6. Daftar Pustaka

- [1] PP RI No. 81, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 81 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga," 2012.
- [2] UU RI No. 18, "Undang-undang No. 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah," 2008.
- [3] Haqq, Millati. "Strategi Pengembangan Bank Sampah Sebagai Upaya Peningkatan Reduksi Sampah di Wilayah Surabaya Selatan." *Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Noember* (2018).
- [4] M. T. Islam and N. Huda, "Material flow analysis (MFA) as a strategic tool in E-waste management: Applications, trends and future directions," Aug. 15, 2019, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.062.
- [5] R. Barkhausen, L. Rostek, Z. C. Miao, and V. Zeller, "Combinations of material flow analysis and life cycle assessment and their applicability to assess circular economy requirements in EU product regulations. A systematic literature review," *J Clean Prod*, vol. 407, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137017.
- [6] Y. Wang and H. wen Ma, "Analysis of uncertainty in material flow analysis," *J Clean Prod*, vol. 170, pp. 1017–1028, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.202.
- [7] D. N. Markic *et al.*, "Using material flow analysis for waste management planning," *Pol J Environ Stud*, vol. 28, no. 1, pp. 255–265, 2019, doi: 10.15244/pjoes/78621
- [8] A. B. Patriatama, "Studi Material Flow Analysis (MFA) TPS 3R Sutorejo, Surabaya," 2021. [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/id/eprint/83362>
- [9] M. Haupt, T. Kägi, and S. Hellweg, "Modular life cycle assessment of municipal solid waste management," *Waste Management*, vol. 79, pp. 815–827, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.03.035.
- [10] Zahra, Sazha Chanifa. *Material Flow Analysis of Food Waste in Jambangan Recycling Center and Wonorejo Compost House, Surabaya*. Diss. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2023.
- [11] Kementerian PUPR RI, "Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 Tentang Penyelenggaraan Prasarana Dan Sarana Persampahan Dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga," 2013. [Online]. Available: www.djpp.kemendukham.go.id
- [12] J. Brändström and M. Saidani, "Comparison between circularity metrics and LCA: A case study on circular economy strategies," *J Clean Prod*, vol. 371, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133537.
- [13] T. Deng, Y. Zhang, and C. Fu, "Modelling dynamic interactions between material flow and stock: A review of dynamic material flow analysis," *Ecol Indic*, vol. 156, p. 111098, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2023.111098.
- [14] W. Wang, D. Jiang, D. Chen, Z. Chen, W. Zhou, and B. Zhu, "A Material Flow Analysis (MFA)-based potential analysis of eco-efficiency indicators of China's cement and cement-based materials industry," *J Clean Prod*, vol. 112, pp. 787–796, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.103.
- [15] PerMenLHK RI No. 1, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2021 Tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup," 2021.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, "SNI ISO 14001:2015 Sistem Manajemen Lingkungan – Persyaratan Dengan Panduan Penggunaan," Jakarta, 2015. [Online]. Available: www.bsn.go.id