

ECO-EFFICIENCY DALAM GREEN SCM: PLTSA SEBAGAI ALTERNATIF MANAJEMEN SAMPAH DAN SUMBER LISTRIK

¹ Fauzan Yoga Pratama, ² Sri Hartanti, ³ Deta Handy Prasetyo

^{1,2,3}Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Jl. Bulaksumur, Caturtunggal, Depok, Sleman, D.I Yogyakarta 55281

e-mail: ¹fauzanyogapratama@mail.ugm.ac.id, ²srihartanti2000@mail.ugm.ac.id,
³detahandyprasetyo@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Abstrak. Karbon dioksida (CO₂) dan gas metan (CH₄) memiliki kontribusi terbesar pada pemanasan global. Penggunaan pembangkit listrik rendah emisi CO₂ menjadi cara untuk mengurangi kadar polusi udara. Hal ini sejalan dengan kondisi di TPST Piyungan yang mengalami overcapacity sampah. Sampah menjadi potensi penghasil energi terbarukan yang dapat menghasilkan energi listrik dengan proses incinerator. Metode open dumping yang saat ini diterapkan di TPST Piyungan dinilai tidak efektif. TPST Piyungan mengalami penutupan selama 1,5 bulan karena overcapacity. Integrasi teknologi Waste to Energy dalam sistem pengelolaan limbah menggunakan incinerator dapat menjadi solusi untuk menjamin pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Hasil energi listrik dari pembakaran sampah dapat digunakan sebagai sumber energi untuk mengoperasikan incinerator, maupun untuk kebutuhan masyarakat sekitar. Strategi yang digunakan adalah Eco-Efficiency, untuk mengurangi dampak lingkungan dari setiap proses pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) Piyungan. Eco-Efficiency merupakan kombinasi efisiensi ekonomi dan efisiensi ekologi. Evaluasi yang digunakan adalah EEI (Eco Efficiency Index) dan EER (Eco Efficiency Ratio). Penulis mengusulkan 2 skenario, diantaranya penggunaan spesifikasi incinerator yang memiliki kapasitas burn rate sebesar 600 kg/h, dan sebesar 12.500 kg/h. Berdasarkan perhitungan menggunakan EEI, EVR, dan EER pada penerapan PLTSA menghasilkan kesimpulan bahwa PLTSA lebih terjangkau secara finansial dan ramah lingkungan serta layak diterapkan. Skenario yang menjadi rekomendasi adalah pada skenario 2, memiliki nilai ERR sebesar 89%. Artinya nilai eko-efisiensi dari penerapan insinerator nilai eko efisiensi sebesar 89%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan insinerator di TPST Piyungan dapat diinterpretasikan sebagai langkah yang signifikan menuju pengelolaan limbah yang lebih green.

Kata kunci: *Eco-Efficiency, Incinerator, Waste to Energy*

Pendahuluan

Isu pemanasan global menjadi perbincangan yang mengambil perhatian masyarakat global saat ini. Adanya pemanasan global ditimbulkan oleh karbon dioksida (CO₂) dan gas metan (CH₄). CO₂ mendominasi Gas Rumah Kaca (GRK) di atmosfer, yaitu lebih dari 75%. Artinya jika kandungan CO₂ dari aktivitas manusia dapat dikurangi maka memiliki potensi adanya penurunan pemanasan global dan perubahan iklim (Sagala, 2012). Peningkatan temperature iklim tentunya memberikan dampak besar terhadap kelangsungan hidup. Selain itu, kematian dini (*premature death*) di dunia kebanyakan disebabkan oleh peningkatan polusi udara. Pembangkit listrik rendah emisi menjadi solusi pengurangan polusi udara, terutama pada kandungan CO₂. Emisi yang dihasilkan pada setiap pembangkit tersebut berbeda tergantung faktor emisi. Semakin besar faktor emisi pembangkit tersebut maka semakin besar pula emisi CO₂ yang dihasilkan. Pembangkit listrik berbahan bakar fosil mempunyai emisi CO₂ cukup besar karena melalui proses pembakaran rantai karbon (Rizki & Suparman, 2013).

Upaya Pemerintah Indonesia untuk mengurangi emisi CO₂ terutama pada bidang kelistrikan tertuang pada Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi yang

menjadi payung hukum pengembangan energi terbarukan dan ditindaklanjuti dengan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) serta Peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 44 Tahun 2015 tentang Pembelian Tenaga Listrik oleh PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) dari Pembangkit Listrik Berbasis Sampah Kota. Dalam KEN, sampah adalah sumber energi terbarukan, serta diarahkan untuk dapat dimanfaatkan sebagai sumber ketenagalistrikan dan transportasi. Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah juga mengatur bahwa sampah dapat dijadikan sebagai sumber energi (Qodriyatun, 2021).

Nurdiansah, et al., (2020) menyatakan bahwa PLTSa mampu menjadi alternatif dalam upaya pengurangan volume sampah. Namun masih dibutuhkan sistem dan standarisasi operasi agar tidak merusak lingkungan sehingga mampu bekerja dengan baik dan efisien. Menurut Heviati (2021), pengelolaan sampah yang dilakukan dengan baik dan benar saat ini baru mencapai 49,18%. Sisanya sebesar 50,82%, meliputi sampah yang langsung dibuang ke lingkungan 18,02% dan ditangani di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) *open dumping* 32,8%. Tetapi praktik ini justru mengganggu masyarakat sebab menjadi penyumbang GRK.

Terdapat 12 kota di Indonesia yang dipilih oleh pemerintah untuk membangun PLTSa di daerahnya sesuai Peraturan Presiden Nomor 35 Tahun 2018. Indonesia terdapat beberapa PLTSa yang telah beroperasi, salah satunya yaitu PLTSa Benowo Kota Surabaya yang telah mulai beroperasi pada tahun 2015. Volume pengelolaan sampah di Kota Surabaya melalui PLTSa Benowo mencapai angka 1.500 ton/hari yang kemudian dapat dikelola melalui PLTSa dan menghasilkan energi listrik sebesar 2 MW (Kadang & Sinaga, 2020). Apabila sampah dapat tereduksi melalui PLTSa, maka dapat mengurangi *overcapacity* dan tumpukan gas emisi metana (CH₄).

TPST Piyungan yang telah mengalami *overcapacity*. TPST Piyungan menerima pasokan sampah dari 3 kabupaten. Diantaranya Sleman, Bantul, dan Kota Yogyakarta. Rata-rata jumlah sampah yang dibuang di TPST Piyungan mencapai 742,2ton/hari. Kondisi ini mengakibatkan TPST Piyungan tidak dapat menampung sampah terus menerus, hingga dilakukan penutupan selama 1,5 bulan. Metode *open dumping* yang saat ini diterapkan di TPST Piyungan dinilai tidak efektif dan berpotensi menimbulkan masalah baru. Sebab metode ini dapat menimbulkan penumpukan sampah, sehingga berdampak pada masalah lingkungan, seperti bau menyengat, pencemaran air dan tanah, hingga berbagai penyakit yang dapat terjadi (Defitri, 2022). Selain itu, *open dumping* juga mampu mencemari air tanah dengan zat berbahaya dari sampah, serta menghasilkan gas rumah kaca dari metana dan karbon dioksida (CO₂). Penggunaan metode ini membutuhkan lahan yang luas (Susanti et al., 2014).

Melihat permasalahan pada TPST Piyungan, perlu dilakukan alternatif pengelolaan sampah yang lain. Salah satu upaya yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan sampah menjadi energi dengan *incinerator*. Integrasi teknologi *Waste to Energy* dalam sistem pengelolaan limbah dapat menjadi solusi untuk menjamin pengelolaan sampah yang berkelanjutan dan meningkatkan variasi sumber energi yang dihasilkan (Rohman et al., 2023). Proses *Waste to Energy* ini memperhatikan proses dari hulu hingga hilir untuk memastikan bahwa setiap proses telah memiliki unsur *green supply chain*. Karakteristik dari setiap proses disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Proses pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

Kategori	PLTSa
<i>Raw Material</i>	Sampah padat (organik dan anorganik)
<i>Bunker</i>	Sampah didiamkan, memiliki nilai kalor antara 800-1400 kkal/kg dengan kadar air sebanyak 50-60%. Bau dari sampah ini tidak menyebar keluar, melainkan langsung terhisap oleh kipas udara dan disalurkan ke tungku pembakaran.
<i>Sorted</i>	Pemilahan sampah organik dan anorganik. organik masuk ke dalam tungku pembakaran, sedangkan anorganik seperti logam tidak dapat diproses
<i>Transfer</i>	Sampah yang sudah kering lalu diangkut ke tungku pembakaran menggunakan <i>grabber</i> pada <i>overhead travelling crane</i>
<i>Burning</i>	Sampah dilakukan pencacahan untuk mempermudah pembakaran. Selanjutnya dilakukan pembakaran di tungku pembakaran pada temperatur tinggi (antara 850-900C)
<i>Output</i>	Gas panas hasil pembakaran digunakan untuk menguapkan air di dalam boiler. Uap yang bertemperatur dan memiliki tegangan tinggi ini berfungsi untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator pembangkit listrik
<i>Environmental Impact</i>	<i>Fly ash & bottom ash</i> , dimanfaatkan untuk menstabilkan tanah lunak, memberikan kekuatan 75x lipat, memiliki sifat drainase yang baik.

Penerapan konsep *Waste to Energy* di TPST Piyungan ini dilakukan melalui penggunaan insinerator untuk pembakaran sampah sebagai sumber energi listrik. Pemanfaatan sampah untuk menjadi energi listrik dengan insinerator menjadi solusi yang efektif (Simanjuntak et al., 2022). Teknologi *Waste-to-Energy* melibatkan pengelolaan berbagai jenis sampah untuk menghasilkan energi dalam bentuk listrik, panas, dan/atau bahan bakar transportasi. (Lauselet et al., 2016). Proses pembakaran tersebut mampu mengurangi volume penumpukan sampah hingga 95% (Maknun & Umami, 2021).

Penumpukan sampah dapat menghasilkan gas metana dan karbon dioksida yang berbahaya. Penumpukan sampah di TPST Piyungan dapat terjadi fermentasi anaerobik untuk menghasilkan gas metana. Gas metana (CH₄) ini sangat berbahaya, yaitu 21 kali lebih buruk dari emisi gas CO₂ dan berdampak signifikan terhadap pemanasan global. Produksi metana tergantung pada komposisi sampah, dimana setiap kilogram sampah dapat menghasilkan 0,5 m³ CH₄ dan menyumbang pemanasan global sebesar 15% (Purba, 2022). Banyaknya sampah yang ditampung di TPST Piyungan memberikan kontribusi yang besar terhadap timbulnya gas metana dan karbondioksida yang berbahaya bagi lingkungan. Energi listrik yang dapat dihasilkan dari setiap pembakaran 100ton sampah adalah 731 kWh.

Hasil energi listrik dari pembakaran sampah dapat digunakan sebagai sumber energi untuk mengoperasikan *incenerator*. Selain dimanfaatkan untuk *incenerator* itu sendiri, juga dapat dimanfaatkan sebagai *supply* kebutuhan masyarakat, seperti praktik yang telah dilakukan di salah satu PLTSa yang ada di Indonesia bekerja sama dengan pihak PLN dengan menjual listrik hasil PLTSa. Maka, selain tujuan utama yaitu pengurangan sampah yang ada di TPST Piyungan, penerapan *Waste to Energy* ini mampu memberikan manfaat lain seperti mengurangi gas metana yang dihasilkan oleh sampah yang dibiarkan menumpuk, serta berpotensi menghasilkan energi listrik yang bermanfaat bagi warga setempat.

Metodologi Penelitian

Penulis akan melakukan pengukuran tingkat efisiensi pada perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Piyungan. Seperti halnya dengan semua proyek energi

dan lingkungan lainnya, penting untuk dilakukan analisis yang komprehensif untuk memahami dampaknya terhadap lingkungan dan ekonomi. Strategi yang digunakan adalah *Eco-Efficiency*, untuk mengurangi dampak lingkungan dari setiap proses pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) Piyungan. *Eco-Efficiency* merupakan kombinasi efisiensi ekonomi dan efisiensi ekologi (Graddy, 1999).

Paper ini fokus pada perhitungan emisi dari penggunaan insinerator di TPST Piyungan sebagai alat untuk pembakaran sampah sebagai sumber energi listrik. Selanjutnya dilakukan evaluasi menggunakan *EI* (*Eco Efficiency Index*) dan *EER* (*Eco Efficiency Ratio*). Sehingga dapat diketahui besarnya keuntungan yang diperoleh dari penggunaan insinerator, serta mengetahui tingkat *sustainability* dari penggunaan insinerator di TPST Piyungan. Sistem yang diteliti hanya berfokus pada proses konversi dari sampah menuju energi listrik, tidak mempertimbangkan emisi transportasi. Jumlah aliran sampah ke TPST Piyungan disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Jumlah Aliran Sampah ke TPST Piyungan dan Potensi Daya Listrik

Wilayah	Jumlah Produksi Sampah (ton)	Daya Listrik (kWh)
Kota Yogyakarta	303.13	221.588,03
Sleman	738	539.478
Bantul	440	321,64
Total	1481.13	1.082.706,03
Harga Jual Listrik/kWh	Rp1,992	Rp2.156.750.411,76

Daya listrik diperoleh dengan ketentuan bahwa setiap 100ton sampah yang dibakar melalui insenerator dapat menghasilkan 731 kWh, namun perlu waktu lebih dari 1 hari untuk menyelesaikan pembakaran seluruh sampah yang dihasilkan 1 hari dari 3 wilayah tersebut, hal ini dikarenakan kapasitas pembakaran dan laju pembakaran pada *incinerator* terbatas. Emisi dari material yang digunakan untuk bahan bakar insenerator disajikan pada tabel 3. Sedangkan spesifikasi *incinerator* disajikan pada tabel 4.

Berikut contoh perhitungan daya listrik di tiap wilayah:

1. Kota Yogyakarta = 303,13 ton x 731 kWh = 221.588,03 kWh
2. Sleman = 738 ton x 731 kWh = 539.478 kWh
3. Bantul = 440 ton x 731 kWh = 321.640 kWh
4. Total = 1481,13 ton x 731 kWh = 1.082.706,03 kWh

Untuk perhitungan harga jual listrik/kWh seperti pada contoh berikut:

1. Kota Yogyakarta = 221.588,03 kWh x Rp1.992 = Rp441.403.355,76
2. Sleman = 539.478 kWh x Rp1.992 = Rp1.074.640.176
3. Bantul = 321.640 kWh x Rp1.992 = Rp640.706.880
4. Total = 1.082.706,03 kWh x Rp1.992 = Rp2.156.750.411,76

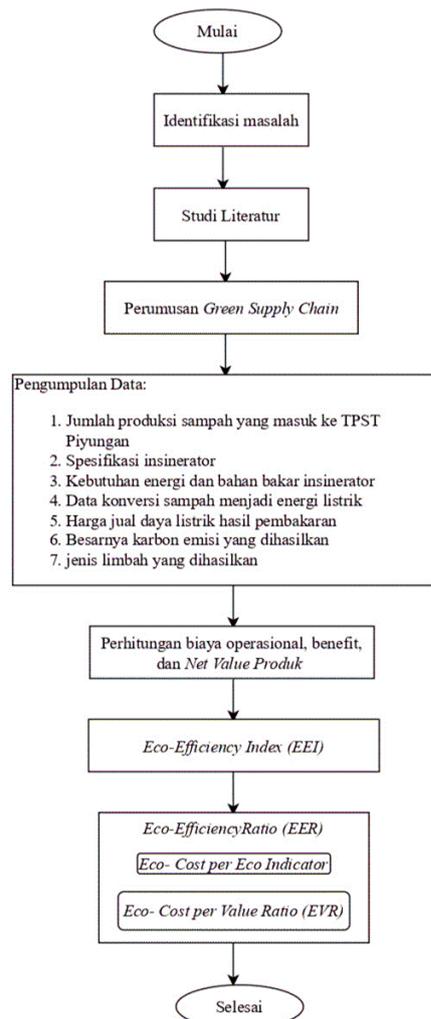
Tabel 3. Data Emisi Karbon

Material	Jumlah	Satuan	Emisi Karbon (kg)	Pajak Karbon
Solar	100	Liter	281.4012	Rp8,442
Oli Bekas	100	Liter	3,183.609000	Rp95,508.27
Batubara	2	ton	3,510.00	Rp105,300
Sampah	1481.13	kg	6000.798195	Rp180,024

Tabel 4. Spesifikasi Incinerator

Spesifikasi Incinerator yang direkomendasikan					
Spesifikasi	Jumlah	Satuan	24h Operation	Harga	Total harga
<i>Burn Rate</i>	12500	kg/h	300000	Rp1,992	Rp4,368,456
<i>Fuel Consumption</i>	1000	Liter/day	1000	Rp1,000	Rp1,000,000
<i>Electricity Consumption</i>	750	kW/day	750	Rp1,114	Rp835,500

Pengolahan data pada penelitian ini melakukan pengukuran terhadap *Eco-Efficiency*. Pengukuran tingkat *Eco-Efficiency* ini melalui beberapa langkah, disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Pengolahan Data

Hasil dan Pembahasan

Analisis *green supply chain* dilakukan pada pengolahan sampah menggunakan insinerator di TPST Piyungan. Analisis yang dilakukan yaitu efisiensi operasional pada penggunaan insinerator dalam proses pembakaran sampah sebagai sumber energi listrik. Evaluasi efisiensi operasional ini melibatkan bahan bakar dan spesifikasi pada insinerator. Tahap *burning* pada proses penggunaan insinerator dilakukan evaluasi, yaitu pada *burn*

rate capacity, agar dapat meminimalkan waktu pembakaran. Sebab banyaknya sampah yang menumpuk di TPST Piyungan menuntut waktu pembakaran yang efektif pula. Analisis efisiensi operasional ini digunakan untuk mengetahui jenis proses yang menghasilkan emisi terbanyak dari penggunaan insinerator di TPST Piyungan. Evaluasi yang digunakan adalah *EEI (Eco Efficiency Index)* dan *EER (Eco Efficiency Ratio)*.

EEI (Eco Efficiency Index) digunakan dalam perhitungan nilai yang *affordable* dan *sustainable* dari sebuah aktivitas produksi. Dengan rincian rumusnya sebagai berikut:

$$EEI = \frac{Price - Cost}{Cost + Eco - Cost}$$

Sedangkan *EER (Eco Efficiency Ratio)* digunakan untuk menghitung nilai *EER Rate* yang nantinya dijadikan sebagai acuan tingkat eko-efisiensi sebuah produk dalam wujud persentase harga. Adapun rumusnya sebagai berikut:

$$EER\ Rate = (1 - EVR) \times 100\%$$

Penulis mengusulkan 2 skenario, diantaranya penggunaan spesifikasi insinerator yang memiliki kapasitas burn rate sebesar 600 kg/h, dan sebesar 12.500 kg/h.

Tabel 5. Perhitungan pada Spesifikasi Incinerator Incener8 I8-1000G (skenario 1)

Perhitungan Incinerator Incener8 I8-1000G					
Spesifikasi	Jumlah	Satuan	24h Operation	Harga	Total harga
<i>Burn Rate</i>	600	kg/h	14400	Rp1,992	Rp209,686
<i>Fuel Consumption</i>	100	Liter/day	100	Rp1,000	Rp100,000
<i>Electricity Consumption</i>	75	kW/day	75	Rp1,114	Rp83,550

Spesifikasi *incinerator* dengan *burn rate* 600 kg/h, ditambah penggunaan *electricity* 75kW/day pada tabel 5 di atas membutuhkan waktu 103 hari hingga seluruh sampah terbakar. Hal ini menyebabkan adanya tumpukan sampah, karena untuk 1 kali pengiriman sampah memerlukan waktu 103 hari untuk dibakar seluruhnya, sedangkan setiap hari TPST Piyungan menerima pasokan sampah setiap hari. Hasil perhitungan *EEI* untuk *Incinerator Incener8 I8-1000G* disajikan pada tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan EEI Penggunaan Spesifikasi Incinerator Incener8 I8-1000G (skenario 1)

<i>Price</i>	Rp209,686
<i>Cost</i>	Rp155,700
<i>Net Value</i>	Rp53,986
<i>Eco cost</i>	Rp288,402
<i>EEI</i>	0.12

Nilai *EEI* pada tabel di atas diperoleh dari pembagian antara *net value* dengan nilai *eco cost*. Hasil perhitungan *EEI* adalah senilai 0,12 menunjukkan bahwa penggunaan Spesifikasi *Incinerator Incener8 I8-1000G* yang memiliki *burn rate* sebesar 600 kg/h dengan *electricity* 75kW/day ini tidak *affordable* dan tidak *sustainable*. Skenario ini menunjukkan kondisi yang tidak ramah lingkungan dan tidak terjangkau secara finansial.

Skenario selanjutnya menggunakan spesifikasi *incinerator* dengan *burn rate* sebesar 12.500kg/h dan *electricity* 750kW/day. Ini merupakan jenis insinerator yang direkomendasikan. Spesifikasi *incinerator* yang direkomendasikan ini disajikan pada tabel 7.

Tabel 7. Rekomendasi Spesifikasi *Incinerator* (skenario 2)

Spesifikasi <i>Incinerator</i> yang direkomendasikan					
Spesifikasi	Jumlah	Satuan	24h Operation	Harga	Total harga
<i>Burn Rate</i>	12500	kg/h	300000	Rp1,992	Rp4,368,456
<i>Fuel Consumption</i>	1000	Liter.day	1000	Rp1,000	Rp1,000,000
<i>Electricity Consumption</i>	750	kW/day	750	Rp1,114	Rp835,500

Spesifikasi seperti pada tabel 7 di atas mampu menghasilkan waktu yang lebih efisien. Dengan spesifikasi *incinerator* yang diusulkan, maka sampah 1 kali pengiriman akan selesai dibakar seluruhnya selama 5 hari. Ini menjadi waktu minimal yang harus dipenuhi. Waktu 5 hari dapat digunakan sebagai proses pengeringan yang datang di hari berikutnya. Sehingga ini menghindari adanya penumpukan sampah berlebih di TPA yang dapat menimbulkan emisi.

Pada skenario ini, selisih biaya operasional dengan biaya jual listrik yang senilai Rp21,567,504 masih dapat dimaksimalkan. Perhitungan ini menggunakan asumsi atau toleransi terkait jumlah bahan bakar dan energi listrik yang diperlukan. Hal ini didasarkan bahwa ketika pembakaran pada ruang *incinerator* sudah berjalan dan stabil, maka bahan bakar tidak digunakan secara terus-menerus. Penggunaan bahan bakar secara signifikan dilakukan pada awal proses pembakaran, yaitu sebelum terdapat api. Hal ini juga demikian pada energi listrik yang digunakan secara signifikan pada saat operasi awal. Namun yang menjadi pembeda adalah energi listrik akan digunakan secara terus-menerus sebagai daya untuk penggerak *grab crane* yang digunakan untuk mengangkat sampah lalu dimasukkan ke ruang pembakaran. Tetapi juga dapat digantikan dengan energi listrik hasil dari pembakaran itu sendiri, sehingga dapat meningkatkan efisiensi biaya. Hasil perhitungan EEI disajikan pada tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perhitungan EEI pada *Insinerator* yang Direkomendasikan (skenario 2)

<i>Price</i>	Rp4,368,456
<i>Cost</i>	Rp1,835,500
<i>Net Value</i>	Rp2,532,956
<i>Eco Cost</i>	Rp288,402
<i>EEI</i>	1.19

Nilai EEI pada tabel di atas diperoleh dari nilai *net value* yang dibagi dengan nilai *eco cost*. Hasil perhitungan EEI yaitu senilai 1,19 menunjukkan bahwa penggunaan *insinerator* ini *affordable* dan *sustainable*. Kondisi ini menunjukkan bahwa skenario yang diusulkan tersebut ramah lingkungan, dan terjangkau secara finansial.

Setelah dilakukan perhitungan *EEI*, selanjutnya dilakukan perhitungan *EVR* dan *ERR*. Nilai *EVR* ini diperoleh dari nilai *eco-cost* yang dibagi dengan nilai *net value* sebagai nilai ekonomi dari masing-masing proses. Semakin besar *net value* menimbulkan nilai *EVR* yang semakin kecil pula. Semakin kecil nilai *EVR* maka semakin baik dan layak. Tetapi ini berbanding terbalik dengan nilai EEI pada perhitungan sebelumnya. Semakin besar nilai *EVR* maka semakin kecil nilai EEI, begitu juga sebaliknya apabila nilai *EEI* semakin besar maka nilai *EVR* semakin kecil.

Hasil dari nilai *EVR* digunakan untuk menghitung nilai *EER* pada penggunaan *insinerator*, caranya yaitu mengurangi nilai *EVR* dengan 1. Nilai akhir *EER* tersebut menunjukkan tingkat *eco-efficiency* dari penerapan *insinerator* sebagai alat pembakaran sampah organik di TPST Piyungan untuk menghasilkan energi listrik. Besarnya nilai *EVR* dan *EER* pada masing-masing skenario yang diusulkan disajikan pada tabel berikut.

Table 9. Nilai EVR dan ERR pada Skenario Penerapan Insinerator di TPST Piyungan.

Keterangan	Skenario 1	Skenario 2
EVR	5.34	0.11
EER	-43422%	89%

Pada tabel 9, fokus pada nilai ERR skenario 2, sebesar 89%. Artinya nilai eko-efisiensi dari penerapan insinerator di TPST Piyungan memiliki nilai eko efisiensi sebesar 89%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan insinerator di TPST Piyungan dapat diinterpretasikan sebagai langkah yang signifikan menuju pengelolaan limbah yang lebih *green*. Proses insinerasi mampu secara efisien mengurangi dampak lingkungan dari limbah yang dihasilkan, sehingga memberikan kontribusi dalam upaya menjaga ekosistem lingkungan.

Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan menggunakan *EEI*, *EVR*, dan *EER* pada penerapan PLTSa menghasilkan kesimpulan bahwa PLTSa lebih terjangkau secara finansial dan ramah lingkungan serta layak diterapkan. Pada penerapan PLTSa spesifikasi *incinerator* menjadi sangat penting terutama untuk berskala besar, seperti yang dihasilkan dari perhitungan antara *incinerator* 1 yang memiliki laju pembakaran rendah dengan *incinerator* 2 yang memang direncanakan sesuai dengan kebutuhan pembakaran skala besar memberikan hasil yang jauh berbeda. Durasi yang diperlukan juga perlu diperhatikan, jangan sampai terlalu cepat dan terlalu lama. Durasi yang terlalu lama juga akan berdampak pada timbulan sampah.

Tabel 10. Hasil Analisis Perbandingan *Incinerator* 1 dan *Incenerator* 2

Analisis	Incinerator 1	Incinerator 2
EEI	0,005	1,19
EVR	5,34	0,11
EER	- 434%	88,61%
Durasi pembakaran total (1481,13 ton)	103 hari	5 hari

Untuk penelitian selanjutnya, kami menyarankan untuk memperluas cakupan daerah penelitian. Dalam penelitian ini hanya mencakup tiga kota/kabupaten, yaitu Kota Yogyakarta, Sleman, dan Bantul. Sedangkan di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta terdapat lima kota/kabupaten, yaitu Kota Yogyakarta, Sleman, Bantul, Kulonprogo, dan Gunung Kidul. Maka dari itu, untuk penelitian selanjutnya dapat menambahkan kabupaten Kulonprogo, dan Gunung Kidul sebagai acuan dasar pertimbangan perhitungan. Dengan begitu, aliran listrik hasil dari produksi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) dapat disalurkan secara merata hingga ke seluruh sudut Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta tanpa terkecuali.

Daftar Pustaka

- Defitri, M. (2022). *Sanitary Landfill : Pengertian, Metode, Keuntungan dan Kerugiannya*. <https://waste4change.com/blog/sanitary-landfill-pengertian-contoh-keuntungan-dan-kerugian/>
- Heviati, E. (2021a, Februari 6). Pengelolaan Sampah Menjadi Energi [Paparannya]. Webinar Teknik Mesin ITS dengan tema Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa): Tantangan, Kendala, dan Peluang, Surabaya.

- Kadang, J. M., & Sinaga, N. (2020). Pengembangan Teknologi Konversi Sampah Untuk Efektifitas Pengolahan Sampah dan Energi Berkelanjutan. *Jurnal Teknika*, 15(1), 33–44.
- Maknun, D., & Muhimatul Umami, Ms. (n.d.). *Naskah Akademik Hasil Penelitian Potensi Sumber Listrik Tenaga Sampah Di Wilayah Cirebon*.
- Nurdiansah, T., Purnomo, E. P., & Kasiwi, A. (2020). Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Sebagai Solusi Permasalahan Sampah Perkotaan; Studi Kasus di Kota Surabaya. *Jurnal Envirotek*, 12(1), 87–92.
- Purba, D. A. (2022). *Analisis Kadar Gas Metana (CH₄) Terhadap Faktor Lingkungan di TPA Piyungan, DI Yogyakarta*. 1–87. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/42006%0Ahttps://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/42006/18513157.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Qodriyatun, S. N. (2021). Pembangkit Listrik Tenaga Sampah: Antara Permasalahan Lingkungan dan Percepatan Pembangunan Energi Terbarukan. *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*, 12(1), 63–84. <https://doi.org/10.46807/aspirasi.v12i1.2093>
- Rizki, F.S.B., Suparman. (2013). Perhitungan Faktor Emisi CO₂ PLTU Batubara dan PLTN. *Jurnal Energi Nuklik Vol.15 No. 1*. Jakarta.
- Rohman, F. M., Ananta, H., Supraptono, E., & Sukamta, S. (2023). Analisis Kelayakan Teknis Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Pada TPA Pasuruhan. In *ELECTRICES - Jurnal Otomasi Kelistrikan dan Energi Terbarukan* (Vol. 5, Issue 3, pp. 78–87).
- Sagala, A. (2012). Petunjuk Teknis Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di Sektor Industri. Badan Pengkajian Iklim dan Mutu Industri.
- Simanjuntak, J. P., Napitupulu, R. A. M., & Lumbangaol, P. (2022). Rancangan Fasilitas Pembangkit Listrik Tenaga Sampah: Studi Kasus di Kota Medan Sumatera Utara. *Sprocket Journal of Mechanical Engineering*, 3(2), 84–93.
- Susanti, E. Y., Adhi, S., & Manar, D. G. (2014). Analisis Faktor Penghambat Penerapan Kebijakan Sanitary Landfill di TPA Jatibarang Semarang Sesuai Dengan Undang-Undang No.18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah. *Diponegoro Journal of Social and Political Science*, 1–13. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/>