

Analisis Tekno-Ekonomi Pemanfaatan Limbah Menjadi Energi (Studi Kasus di Kawasan Industri Pulogadung, Jakarta Timur)

Wahyu Punjung Pesonagrata^{1,2*}, Mohammad Akita Indianto¹

¹Program Studi Teknik Sistem Energi, Universitas Indonesia Depok, Indonesia

²Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral DKI Jakarta, Indonesia

*e-mail: wahyupunjung@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis kelayakan tekno-ekonomi sistem pembangkit listrik berbasis RDF dan hybrid dengan PLTS di Kawasan Industri Pulogadung melalui lima skenario konfigurasi. Simulasi menggunakan perangkat lunak Homer dilakukan untuk mengevaluasi LCOE, NPV, konsumsi bahan bakar, dan emisi CO₂, CO, serta partikulat. Hasil menunjukkan adanya trade-off antara kapasitas PV, konsumsi RDF, dan LCOE: peningkatan penetrasi PV menurunkan konsumsi RDF dan emisi, tetapi LCOE cenderung meningkat. Dari lima skenario, Skenario C (hybrid PLT Sampah-PLTS dengan PV 10% beban) menunjukkan keseimbangan terbaik antara biaya energi, konsumsi bahan bakar, dan emisi, dengan NPV Rp 408 miliar, LCOE Rp 5.852/kWh, konsumsi RDF 2.435 ton/tahun, emisi CO₂ 379 kg/tahun, CO 39,8 kg/tahun, dan partikulat 0,241 ton/tahun. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi PLT Sampah-PLTS merupakan solusi berkelanjutan untuk pengelolaan limbah dan penyediaan energi di kawasan industri, sekaligus dapat direplikasi pada lokasi serupa.

Kata kunci: RDF, PLTS hybrid, LCOE, emisi CO₂, pengelolaan limbah, energi terbarukan.

Techno-Economic Analysis of The Utilization of Waste Into Energy (Case Study In The Jakarta Industrial Estate Pulogadung Industrial Area, East Jakarta)

ABSTRACT

This study evaluates the techno-economic feasibility of RDF-based and hybrid RDF-PV power systems in Pulogadung Industrial Area through five configuration scenarios. Simulations using Homer software assessed LCOE, NPV, fuel consumption, and emissions of CO₂, CO, and particulate matter. Results indicate a trade-off between PV capacity, RDF consumption, and LCOE: increasing PV penetration reduces RDF consumption and emissions but tends to raise LCOE. Among the scenarios, Scenario C (hybrid RDF-PV with 10% PV load) provides the best balance between energy cost, fuel consumption, and emissions, with an NPV of IDR 408 billion, LCOE of IDR 5,852/kWh, RDF consumption of 2,435 tons/year, CO₂ emissions of 379 kg/year, CO 39.8 kg/year, and particulate matter 0.241 tons/year. These findings confirm that integrating RDF power plants with PV is a sustainable solution for industrial waste management and energy supply, with potential for replication in similar industrial areas.

Keywords: *RDF, hybrid PV system, LCOE, CO₂ emissions, waste management, renewable energy.*

PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia, dengan populasi melebihi 270 juta. Dinamika demografis ini berkontribusi signifikan terhadap peningkatan jumlah limbah padat yang dihasilkan setiap tahun. Menurut laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [1], timbunan sampah domestik Indonesia pada awal dekade ini mencapai kurang lebih 67,8 juta metrik ton (Mt). Angka ini diprediksi akan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, urbanisasi yang masif, perubahan pola konsumsi, dan pertumbuhan ekonomi nasional. Pemerintah telah merespon situasi ini dengan memberlakukan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, yang bertujuan untuk menggeser paradigma pengelolaan sampah dari ujung pipa ke pendekatan berbasis 3R (Reduce, Reuse, Recycle). Salah satu mandat utama undang-undang ini adalah penghapusan pembuangan terbuka. Namun, implementasinya

masih menghadapi banyak kendala struktural, mulai dari keterbatasan anggaran, lemahnya koordinasi antar lembaga, hingga minimnya partisipasi masyarakat dalam pemilahan dan pengurangan sampah di sumber[2].

Masalah yang sama mendesaknya adalah peningkatan timbulan sampah plastik. Beberapa tahun terakhir, Indonesia telah menjadi sorotan internasional sebagai kontributor utama pencemaran plastik laut. Menurut studi oleh Jambeck et al. dan update oleh Meijer et al., Indonesia menempati urutan kedua sebagai negara dengan kontribusi tertinggi terhadap kebocoran sampah plastik ke laut [3], [4]. Perkiraan menunjukkan bahwa sekitar 0,27 hingga 0,59 juta ton sampah plastik per tahun berakhir di perairan Indonesia[5]. Misalnya, kawasan industri Kawasan Industri Jakarta Pulogadung (JIEP) yang seluas 433 hektar di Jakarta Timur masih mengalami masalah pengelolaan sampah yang signifikan. Sistem pengumpulan sampah yang digunakan masih konvensional, termasuk penggunaan tempat sampah manual yang membutuhkan pembukaan dan penutupan langsung, yang berpotensi meningkatkan penyebaran patogen dan risiko kesehatan bagi pekerja dan masyarakat sekitar. [6], [7]

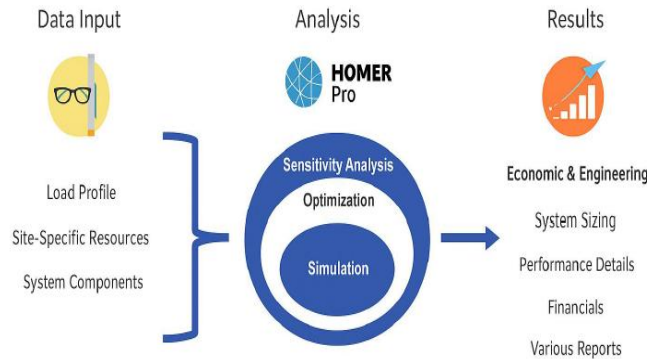
Dengan skala tantangan yang mencakup dimensi nasional hingga regional, kawasan industri menjadi representasi nyata kompleksitas pengelolaan limbah di Indonesia. Aktivitas industri yang padat, heterogenitas jenis limbah, serta tingginya volume sampah menjadikan kawasan industri sebagai titik kritis yang membutuhkan pendekatan manajemen limbah yang lebih maju dan terintegrasi. Oleh karena itu, strategi waste-to-energy memiliki potensi signifikan sebagai solusi yang tidak hanya mengurangi timbulan sampah, tetapi juga menghasilkan energi. Pengelolaan sampah di bidang ini menunjukkan perlunya penguatan sistem teknologi dan mengintegrasikan pengelolaan sampah berdasarkan prinsip-prinsip ekonomi sirkular. Kondisi ini menunjukkan perlunya penguatan sistem teknologi pengelolaan limbah yang terintegrasi dengan prinsip-prinsip ekonomi sirkular.

Penelitian ini akan mengkaji jenis limbah di Kawasan Industri JIEP dan potensi pemanfaatannya sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Selain limbah, area pabrik di JIEP juga memiliki potensi energi surya yang tinggi berdasarkan nilai Global Horizontal Irradiance (GHI), sehingga energi matahari dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi tambahan. Dengan skala aktivitas industri yang padat, kawasan industri seperti JIEP menjadi representasi nyata kompleksitas pengelolaan limbah. Oleh karena itu, strategi waste-to-energy memiliki potensi signifikan sebagai solusi terintegrasi.

METODE PENELITIAN

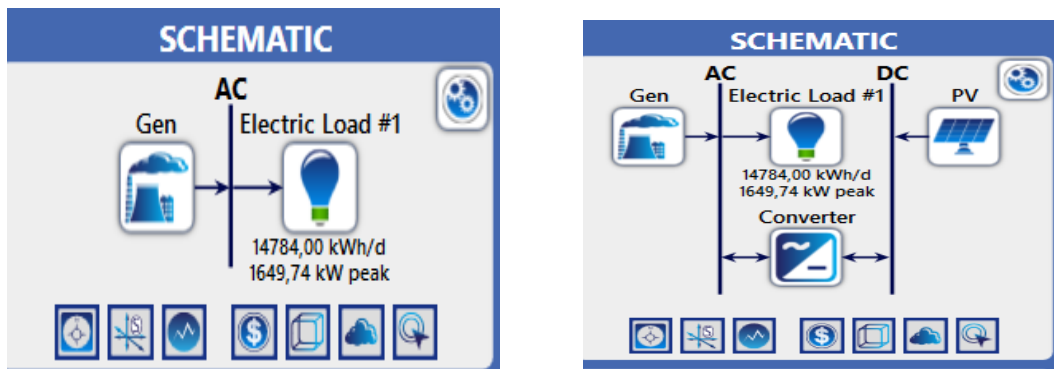
Penelitian ini menggunakan perangkat lunak Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER) Pro Edition, sebuah alat analisis microgrid yang digunakan untuk desain, analisis, dan optimalisasi sistem energi hybrid. Sistem energi hibrida ini menggabungkan sumber energi terbarukan, seperti energi surya dan biomassa, dengan sistem konvensional, serta komponen kelistrikan pendukung, termasuk generator, modul PV, dan konverter.





Gambar 1. Framework HOMER

Gambar 1 menyajikan kerangka kerja HOMER yang terdiri dari tiga bagian utama: input proyek, analisis, dan keluaran hasil. Input proyek mencakup profil beban, potensi limbah yang dimanfaatkan sebagai biomassa, sumber daya PV di lokasi penelitian, serta komponen sistem. Data ini menggambarkan pola konsumsi energi dan potensi sumber energi di lokasi, termasuk intensitas sinar matahari dan karakteristik limbah. Parameter teknis sistem yang dimasukkan meliputi kapasitas, biaya modal, biaya penggantian, biaya operasi dan pemeliharaan, masa pakai, faktor derating, serta karakteristik performa komponen.



Gambar 2. Skematik Diagram

Gambar 2 menunjukkan skematik diagram pemodelan sistem. Pemodelan dilakukan melalui beberapa tahapan:

1. Pengumpulan data lokasi untuk memperoleh parameter sumber daya surya berupa Global Horizontal Irradiance (GHI).
2. Perancangan konfigurasi sistem untuk setiap skenario pemodelan.
3. Penambahan kontroler Cycle Charging dan Load Follower agar HOMER dapat menentukan strategi operasi hybrid yang optimal.
4. Input parameter teknis dan ekonomi masing-masing komponen, termasuk biaya, kapasitas, masa pakai, dan karakteristik performa.
5. Definisi lima skenario simulasi, yaitu:
 - a. Pembangkit waste-to-energy berdiri sendiri;
 - b. Sistem hybrid waste-to-energy–PV dengan mode optimasi HOMER;
 - c. Sistem hybrid dengan kontribusi beban PV 10%;
 - d. Sistem hybrid dengan kontribusi beban PV 30%;

- e. Sistem hybrid waste-to-energy dengan tambahan limbah dari sumber terbuka (limbah berbayar) dan beban PV 10%.
6. Input profil beban hidrogen berdasarkan hasil observasi lapangan.
7. Simulasi konfigurasi untuk memperoleh keluaran teknis, ekonomi, dan emisi dari masing-masing skenario.
8. Analisis hasil dan perbandingan antar skenario untuk menentukan opsi konfigurasi yang paling layak dan optimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi sistem pembangkit listrik waste-to-energy dilakukan pada lima skenario konfigurasi, yaitu Skenario A hingga Skenario E. Seluruh simulasi menggunakan algoritma kontrol HOMER Cycle Charging dan Load Following dengan masa proyek 25 tahun. Hasil simulasi dievaluasi berdasarkan keluaran energi pembangkit, konsumsi RDF, total biaya sistem (NPC dan LCOE), serta emisi CO₂, CO, dan Particulate Matter (PM).

Skenario A: RDF Genset (Autosize Capacity)

Gambar 3 menunjukkan hasil optimasi Skenario A. Produksi energi tahunan mencapai 5.796.408 kWh, seluruhnya dipenuhi oleh genset RDF. Total NPC sistem mencapai Rp 382 miliar dengan biaya operasional tahunan Rp 17,4 miliar. Nilai LCOE tercatat Rp 5.482/kWh, mencakup seluruh biaya investasi, penggantian komponen, dan pemeliharaan.

Tabel 1 menunjukkan konsumsi RDF sebesar 2.435 ton/tahun, yang masih jauh di bawah total potensi limbah industri (16.411 ton/tahun). Emisi CO₂, CO, dan PM berturut-turut sebesar 383 kg/tahun, 40,2 kg/tahun, dan 0,244 kg/tahun..

Architecture		Cost				System	Gen				
Gen (kW)	Dispatch	COE (Rp)	NPC (Rp)	Operating cost (Rp)	Initial capital (Rp)	Ren. Frac (%)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (Rp)	Fuel Cost (Rp)
1.900	CC	Rp5.482	Rp382B	Rp17,4B	Rp157B	100	8.760	5.796.408	2.435	17.425.436.672	0

Gambar 3. Optimazion result on Scenarion a

Pada Tabel 1 ditunjukkan bahwa pembangkitan energi pada Skenario A mencapai 5.796.408 kWh/tahun, dengan konsumsi RDF sebesar 2.435 ton/tahun. Jumlah limbah industri sebesar 16.411,22 ton, sehingga mencukupi kebutuhan RDF tahunan. Emisi yang dihasilkan berupa CO₂ sebesar 383 kg/tahun, CO sebesar 40,2 kg/tahun, dan Particulate Matter (PM) sebesar 0,244 kg/tahun.

Tabel 1. Parameter yang akan diamati untuk Skenario A

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	383	Kg/tahun
Carbon Monoxide	40,2	Kg/tahun
Particulate Matter	0,244	Kg/tahun
Fuel Consumption	2.435	Tons/tahun
Specific Fuel Consumption	0,294	L/kWh

Skenario B: Hybrid RDF – PV (Optimizer Mode)

Gambar 4 memperlihatkan integrasi PV berkapasitas otomatis melalui optimizer. Genset menghasilkan 5.785.644 kWh (99,5%), sedangkan PV menghasilkan 26.901 kWh (0,49%). Total NPC sebesar Rp 383 miliar, dengan biaya operasional Rp 157 miliar/tahun. LCOE sedikit meningkat menjadi Rp 5.487/kWh. Konsumsi RDF menurun menjadi 2.431 ton/tahun, diikuti penurunan emisi CO₂ dan CO.

Export...														Optimization Results									
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.																							
Architecture				Cost				System		Gen				PV									
PV (kW)	Gen (kW)	Converter (kW)	Dispatch	COE (Rp)	NPC (Rp)	Operating cost (Rp)	Initial capital (Rp)	Ren Frac (%)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (Rp)	Fuel Cost (Rp)	Capital Cost (Rp)	Production (kWh)								
19.3	1.900	3,22	CC	Rp5.487	Rp3838	Rp17,48	Rp1578	100	8.760	5.785.644	2.431	17.425.436.672	0	251.426.864	26.901								

Gambar 4. Hasil Optimazion pada Skenario b

Tabel 2. Parameter Skenario B

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	382	Kg/tahun
Carbon Monoxide	40,1	Kg/tahun
Particulate Matter	0,244	Kg/tahun
Fuel Consumption	2.431	Tons/tahun
Specific Fuel Consumption	0,294	L/kWh

Skenario C: Hybrid RDF – PV (10% Load Capacity)

Gambar 5 menunjukkan kapasitas PV ditetapkan sebesar 10% beban puncak sistem. Energi tahunan dari genset sebesar 5.733.644 kWh (73,5%), sedangkan PV menghasilkan 2.065.325 kWh (26,5%). NPC meningkat menjadi Rp 408 miliar, dengan biaya operasional Rp 177 miliar/tahun. LCOE meningkat menjadi Rp 5.852/kWh. Konsumsi RDF turun menjadi 2.413 ton/tahun, dengan emisi yang juga menurun...

Export...														Optimization Results									
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.																							
Architecture				Cost				System		Gen				PV									
PV (kW)	Gen (kW)	Converter (kW)	Dispatch	COE (Rp)	NPC (Rp)	Operating cost (Rp)	Initial capital (Rp)	Ren Frac (%)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (Rp)	Fuel Cost (Rp)	Capital Cost (Rp)	Production (kWh)								
1.900	1.900	15,5	CC	Rp5.852	Rp4088	Rp17,98	Rp1778	100	8.760	5.733.549	2.413	17.425.436.672	0	20.177.223.680	2.065.324								

Gambar 5. Parameter SkenarioC

Tabel 3. Parameter Skenario C

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	379	Kg/tahun
Carbon Monoxide	39,8	Kg/tahun
Particulate Matter	0,241	Kg/tahun
Fuel Consumption	2.413	Tons/tahun
Specific Fuel Consumption	0,295	L/kWh

Skenario D: Hybrid RDF – PV (High Penetration, ±47%)

Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi sistem pembangkit listrik waste-to-energy berbasis generator bahan bakar Biogas (RDF) dengan kapasitas ukuran otomatis hibrida dengan mode PV system 10% Load Capacity, dijalankan menggunakan algoritma kontrol HOMER Cycle Charging and Load Following. Total durasi proyek yang digunakan dalam simulasi adalah 25 tahun. Produksi listrik tahunan dari genset mencapai 5.733.302 kWh yang mencakup 52,6% pembangkit listrik serta untuk PV 5.164.709 kWh yang mencakup 47,4% pembangkit listrik. Total Net Present Cost (NPC) adalah Rp 447.000.000.000,00, sedangkan biaya operasional tahunan mencapai Rp 18.500.000.000,00. Berdasarkan output energi yang dihasilkan dan biaya sistem, Levelized Cost of Electricity (LCOE) sistem ini adalah Rp 6.411,0 per kWh proyek. Perhitungan LCOE ini mencakup kontribusi dari semua biaya sistem, termasuk biaya investasi awal, penggantian komponen, biaya operasional dan pemeliharaan.

Optimization Results															
Architecture			Cost				System		Gen				PV		
PV (kW)	Gen (kW)	Converter (kW)	Dispatch	COE (Rp)	NPC (Rp)	Operating cost (Rp)	Initial capital (Rp)	Ren. Frac (%)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (Rp)	Fuel Cost (Rp)	Capital Cost (Rp)	Production (kWh)
1.900	1.900	15,5	CC	Rp5.482	Rp3828	Rp17,48	Rp1578	100	8.760	5.796.408	2.435	17.425.436.672	0		
3.696	1.900		CC	Rp6.411	Rp4478	Rp18,58	Rp2088	100	8.760	5.733.302	2.413	17.425.436.672	0	50.800.893.952	5.164.708

Gambar 6. Hasil Optimazion pada Skenario D

Tabel 4. Parameter yang harus diamati untuk Skenario D

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	379	Kg/tahun
Carbon Monoxide	39,8	Kg/tahun
Particulate Matter	0,241	Kg/tahun
Fuel Consumption	2.413	Tons/tahun
Specific Fuel Consumption	0,295	L/kWh

Dari Tabel 4, ditemukan bahwa dalam setahun, pembangkit listrik sebesar 5.733.644 kWh/tahun, dengan konsumsi bahan bakar sebesar 2.413 ton/tahun. Dari data sampah, sampah dari kawasan industri sebanyak 16.411,22 ton. Dimana tentunya limbah dari kawasan industri cukup untuk kebutuhan BBM dalam pembangkitan. Untuk Hasil Emisi, parameter utama yang harus diamati adalah emisi karbon dioksida dan karbon monoksida. Dimana hasil karbon dioksida, karbon monoksida dan Partikulat masing-masing adalah 379 kg/tahun, 39,8 kg/tahun dan 0,241 kg/tahun.

Skenario E: Hybrid RDF – PV dengan Tambahan Limbah dari Sumber Eksternal

Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi sistem pembangkit listrik waste-to-energy berbasis generator bahan bakar Biogas (RDF) dengan kapasitas ukuran otomatis dengan limbah tambahan dari open source (limbah berbayar) hybrid dengan sistem PV mode 10% Load Capacity, dijalankan menggunakan algoritma kontrol HOMER Cycle Charging and Load Following. Total durasi proyek yang digunakan dalam simulasi adalah 25 tahun. Produksi listrik tahunan dari genset mencapai 5.733.644 kWh yang mencakup 73,5% pembangkit listrik serta untuk PV 2.065.325 kWh yang mencakup 26,5% pembangkit listrik. Total Net Present Cost (NPC) adalah Rp 408.000.000.000,00, sedangkan biaya operasional tahunan mencapai Rp 17.900.000.000,00. Berdasarkan output energi yang dihasilkan dan biaya sistem, Levelized Cost of Electricity (LCOE) sistem ini adalah Rp 5.853,0 per kWh proyek. Perhitungan LCOE ini mencakup kontribusi dari semua biaya sistem, termasuk biaya investasi awal, penggantian komponen, biaya operasional dan pemeliharaan.

Optimization Results															
Architecture			Cost				System		Gen				PV		
PV (kW)	Gen (kW)	Converter (kW)	Dispatch	COE (Rp)	NPC (Rp)	Operating cost (Rp)	Initial capital (Rp)	Ren. Frac (%)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (Rp)	Fuel Cost (Rp)	Capital Cost (Rp)	Production (kWh)
1.900	1.900	15,5	CC	Rp5.483	Rp3828	Rp17,48	Rp1578	100	8.760	5.796.408	2.435	17.425.436.672	4.870.594		
1.478	1.900		CC	Rp5.853	Rp4088	Rp17,98	Rp1778	100	8.760	5.733.549	2.413	17.425.436.672	4.825.480	20.177.223.680	2.065.324

Gambar 7. Hasil Optimazion pada Skenario E

Dari Tabel 5, ditemukan bahwa dalam setahun, pembangkit listrik sebesar 5.733.644 kWh/tahun, dengan konsumsi bahan bakar sebesar 2.413 ton/tahun. Dari data sampah, sampah dari kawasan industri sebesar 16.631,08 ton. Dimana tentunya limbah dari kawasan industri cukup untuk kebutuhan BBM dalam pembangkitan. Untuk Hasil Emisi, parameter utama yang harus diamati adalah emisi karbon dioksida dan karbon monoksida[9] Dimana hasil karbon

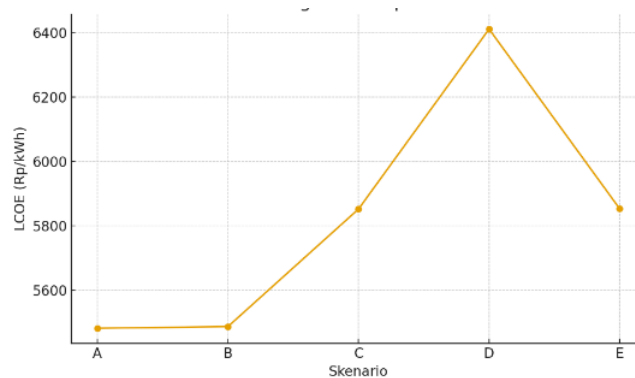


dioksida, karbon monoksida dan Partikulat masing-masing adalah 379 kg/tahun, 39,8 kg/tahun dan 0,241 kg/tahun. Skenario ideal dapat dirumuskan dengan berbagai cara. Dalam hal produksi listrik, skenario yang paling cocok adalah Skenario d, yang menghasilkan total 10.898.011 kWh/tahun. Namun, ia memiliki LCOE tertinggi sebesar Rp 6.411,00/kWh. Dalam hal pengurangan limbah untuk bahan bakar, Skenario A paling cocok karena memiliki konsumsi bahan bakar sebesar 2.435 ton/tahun, LCOE terendah sebesar 5.482,00, tetapi memiliki emisi tertinggi sebesar 383 kg/tahun untuk CO₂, 40,2 kg/tahun untuk CO₂, dan 0,244 kg/tahun untuk partikel. Oleh karena itu, Skenario c, yang memiliki semua kelebihan dan sedikit kelemahan dari skenario lainnya, dipilih, dengan parameter sebagai berikut: Skenario c memiliki COE 5.852,00/kWh, diimbangi dengan konsumsi bahan bakar yang relatif tinggi dan emisi yang relatif lebih rendah. Jadi skenario c dianggap paling memungkinkan.

Tabel 5. Parameter yang harus diamati untuk Skenario E

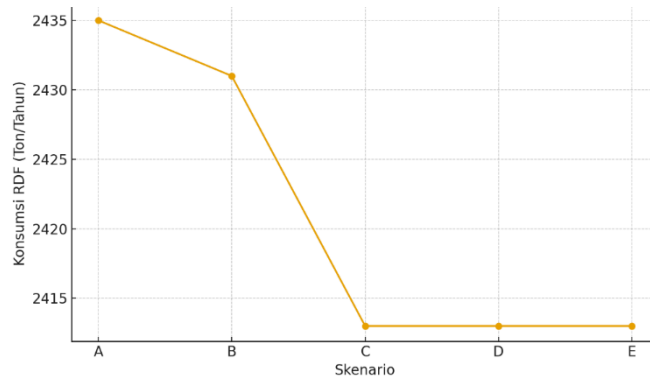
Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	379	Kg/tahun
Carbon Monoxide	39,8	Kg/tahun
Particulate Matter	0,241	Kg/tahun
Fuel Consumption	2.413	Tons/tahun
Specific Fuel Consumption	0,295	L/kWh

Berdasarkan grafik pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10, terlihat adanya keterkaitan langsung antara nilai LCOE, konsumsi RDF, serta emisi CO₂ dari setiap skenario yang diuji. Ketiga grafik tersebut memberikan gambaran komprehensif mengenai bagaimana peningkatan kapasitas PV dalam sistem *hybrid* RDF–PV memengaruhi performa ekonomi maupun lingkungan..



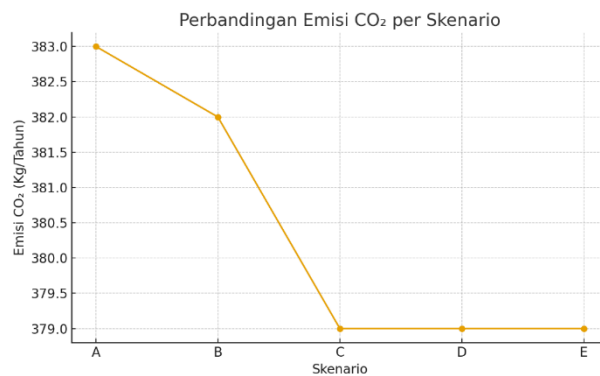
Gambar 8. Grafik Perbandingan LCOE tiap Skenario

Seperti ditunjukkan pada Gambar 8, peningkatan kapasitas PV justru berkontribusi pada kenaikan nilai LCOE (A < B < C < E < D). Fenomena ini disebabkan oleh tingginya biaya investasi awal PV yang tidak sepenuhnya terkompensasi oleh penghematan konsumsi RDF pada generator. Dengan demikian, penetrasi PV yang lebih besar belum memberikan keuntungan ekonomis yang signifikan dalam konfigurasi sistem ini.



Gambar 9. Grafik perbandingan Konsumsi RDF tiap Skenario

Tren berbeda terlihat pada konsumsi RDF. Berdasarkan Gambar 9, konsumsi RDF menurun secara konsisten dari Skenario A hingga E seiring meningkatnya kontribusi PV dalam memenuhi kebutuhan beban. Penurunan ini mengindikasikan bahwa energi terbarukan mampu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar RDF, terutama pada periode irradiance tinggi dan beban parsial.



Gambar 10. Grafik Nilai Konsumsi RDF tiap Skenario

Gambar 10 menunjukkan bahwa profil emisi CO₂ memiliki pola yang sejalan dengan konsumsi RDF. Skenario A menghasilkan emisi tertinggi, sedangkan Skenario C, D, dan E menunjukkan nilai emisi yang lebih rendah. Hal ini menegaskan bahwa pengurangan konsumsi RDF melalui penetrasi PV berperan penting dalam menurunkan emisi gas rumah kaca pada sistem hybrid RDF–PV.

Secara keseluruhan, ketiga grafik tersebut memperlihatkan adanya trade-off yang jelas antara aspek keekonomian dan aspek lingkungan. Meskipun penetrasi PV yang lebih tinggi efektif menurunkan konsumsi RDF dan emisi CO₂, peningkatan kapasitas PV juga menyebabkan biaya energi (LCOE) meningkat.

Berdasarkan keseluruhan parameter teknis, ekonomi, dan lingkungan, Skenario C dipilih sebagai konfigurasi paling optimal. Ringkasan parameter untuk skenario terpilih ditampilkan pada Tabel 6.

Table 6. Parameter of the chosen Scenario

Skenario	Komponen					
	Net Present Cost (Rp)	Cost Of Energy (Rp)	Fuel Consumption (Tons/year)	Carbon Dioxide (kg/year)	Carbon Monoxide (kg/year)	Particulate Matter (kg/year)



Scenario	408.000.000.000,00	5.852,00	2.435	379	39,8	0,241
c						

KESIMPULAN

Analisis lima skenario sistem pembangkit hybrid RDF–PLTS di Kawasan Industri Pulogadung menunjukkan adanya trade-off antara kapasitas PV, konsumsi RDF, biaya energi (LCOE), dan emisi gas rumah kaca. Penggunaan RDF 100% mampu memenuhi kebutuhan listrik, namun menghasilkan emisi relatif tinggi, sedangkan integrasi PV menurunkan konsumsi RDF dan emisi, meskipun meningkatkan LCOE akibat biaya investasi PV. Penambahan sampah dari luar kawasan industri tidak memberikan dampak signifikan terhadap ekonomi, hanya menambah biaya bahan bakar. Dari lima skenario yang dianalisis, Skenario C (hybrid PLT Sampah–PLTS dengan PV 10% beban) menunjukkan keseimbangan terbaik antara biaya energi (LCOE Rp 5.852/kWh), konsumsi bahan bakar (2.435 ton/tahun), dan emisi (CO₂ 379 kg/tahun, CO 39,8 kg/tahun, partikulat 0,241 ton/tahun), sehingga direkomendasikan untuk implementasi. Konsumsi bahan bakar yang cukup tinggi tetap perlu dievaluasi lebih lanjut melalui strategi penghematan energi agar sistem menjadi lebih efisien secara ekonomi dan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dewan Perwakilan Rakyat, “Sisa Makanan, Plastik, dan Kertas Komposisi Sampah Paling Dominan,” *Perlementaria Terkini - Dewan Perwakilan Rakyat*.
- [2] C. M. Annur, “Sampah Indonesia Bertambah pada 2022, Terbanyak dalam Empat Tahun,” *Databoks.Katadata.Co.Id*, 2023.
- [3] L. J. J. Meijer, T. van Emmerik, R. van der Ent, C. Schmidt, and L. Lebreton, “More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean,” *Sci Adv*, vol. 7, no. 18, 2021, doi: 10.1126/sciadv.aaz5803.
- [4] J. R. Jambeck *et al.*, “Plastic waste inputs from land into the ocean,” *Science (1979)*, vol. 347, no. 6223, 2015, doi: 10.1126/science.1260352.
- [5] M. R. Cordova *et al.*, “Naskah Akademik Inisiasi Data Sampah Laut Indonesia Untuk Melengkapi Rencana Aksi Nasional Penanganan Sampah Laut Sesuai Peraturan Presiden RI No.83 Tahun 2018,” *Lipi*, no. 83, 2019.
- [6] Q. Arifianti, M. Abidin, E. Nugrahani, and K. Ummatin, “ancang Bangun Solar Dryer untuk Meningkatkan Kualitas Refuse Derived Fuels (RDF) sebagai Bahan Bakar Alternatif di Kiln Burner Industri Semen,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 9, no. 3, 2018, doi: 10.21776/ub.jrm.2018.009.03.8.
- [7] U. Azmiyati, G. T. Rancak, and W. Jannah, “Upaya Pengelolaan Sampah Berdasarkan Komposisi Sampah Di Kota Mataram,” *Lambda: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA dan Aplikasinya*, vol. 2, no. 2, 2022, doi: 10.58218/lambda.v2i2.194.
- [8] W. Yaici, E. Entchev, A. Annuk, and M. Longo, “Hybrid Renewable Energy Systems with Hydrogen and Battery Storage Options for Stand-Alone Residential Building Application in Canada,” in *11th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2022*, 2022. doi: 10.1109/ICRERA55966.2022.9922705.
- [9] Y. Fitrianingrum and A. Surjasatyo, “Techno-economic Analysis of co-firing waste Refused Derived Fuel (RDF) in coal-fired power plant,” *International Journal of Engineering Business and Social Science*, vol. 1, no. 05, 2023, doi: 10.58451/ijebss.v1i05.65.

