



Analisis *Exergoeconomic* pada Kompresor *Gas Engine Siklus Miller* Berbahan Bakar Pome

Ahmad Hasnul Fajri Arsyah¹, Adriansyah^{2*}, Hendri Candra Mayana³, Desmarita Leni⁴

¹Program Studi Teknik Mesin Politeknik Negeri Padang

^{1*}ahmad.arsyah94@gmail.com

Abstract

Energy efficiency is one of the key challenges in global energy resource management, particularly in the renewable energy sector. The increasing demand for energy drives the need for innovative approaches to optimize energy utilization while minimizing economic and environmental impacts. This study aims to evaluate energy efficiency and operational costs in the Tandun Biogas Power Plant (PLTBg) using exergy and exergoeconomic analysis. Exergy analysis assesses the quality of available energy based on the second law of thermodynamics, while exergoeconomic analysis integrates exergy evaluation with economic aspects, such as investment, operation, and maintenance costs. The study collected data on investment costs of \$0.016/kWh, fixed operation and maintenance (O&M) costs of \$0.030/kWh, and variable O&M costs of \$0.009/kWh. The analysis identified cost losses due to exergy destruction in key components, such as the compressor (\$21.62/hour), additional compressor (\$2.193/hour). The results show that exergy and exergoeconomic analyses not only provide deeper insights into energy efficiency but also identify opportunities for operational cost reductions. These findings affirm that the proposed approach can be a strategic tool for optimizing the performance of biogas-based power plants. Furthermore, the results offer practical guidance for developing more efficient, sustainable, and economical energy systems in the renewable energy sector. This study is expected to contribute significantly to innovations in energy efficiency and serve as a reference for optimizing renewable energy management.

Keywords: exergy, exergoeconomic, biogas power plant (PLTBg), gas engine, efficiency

Abstrak

Efisiensi energi merupakan salah satu tantangan utama dalam pengelolaan sumber daya energi global, khususnya pada sektor energi terbarukan. Permintaan energi yang terus meningkat mendorong perlunya pendekatan inovatif untuk mengoptimalkan penggunaan energi sekaligus mengurangi dampak ekonomi dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi energi dan biaya operasional pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) Tandun dengan menggunakan pendekatan *analisis exergy* dan *exergoeconomic*. *Analisis exergy* digunakan untuk mengkaji kualitas energi yang tersedia berdasarkan hukum kedua termodinamika, sementara analisis *exergoeconomic* mengintegrasikan evaluasi *exergy* dengan aspek ekonomi, seperti perhitungan biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan. Data penelitian mencakup biaya investasi sebesar \$0,016/kWh, biaya operasi dan pemeliharaan (OM) tetap \$0,030/kWh, serta biaya OM variabel \$0,009/kWh. Analisis juga mengidentifikasi kerugian biaya akibat pemusnahan *exergy* pada komponen utama, yaitu kompresor (\$21,62/jam), kompresor tambahan (\$2,193/jam). Hasil menunjukkan bahwa analisis *exergy* dan *exergoeconomic* tidak hanya memberikan pemahaman mendalam tentang efisiensi energi tetapi juga mengidentifikasi potensi pengurangan biaya operasional. Temuan penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan tersebut dapat menjadi alat strategis untuk mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik berbasis biogas. Selain itu, hasilnya memberikan panduan praktis bagi pengembangan sistem energi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ekonomis dalam sektor energi terbarukan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap inovasi di bidang efisiensi energi dan menjadi referensi untuk pengelolaan energi terbarukan yang lebih optimal.

Kata kunci: *exergy*, *exergoeconomic*, PLTBg, gas engine, efisiensi

1. Pendahuluan

Banyak faktor yang mengakibatkan terjadinya peningkatan konsumsi energi, diantaranya dikarenakan perkembangan sektor-sektor di Indonesia (sektor industri, sektor rumah tangga, sektor komersial, sektor transportasi, sektor kelistrikan) dan peningkatan jumlah penduduk, namun dengan perkembangan sektor-sektor tersebut tidak diimbangi dengan

ketersediaan energi di Indonesia sehingga muncul krisis energi.[1]

Energi listrik merupakan suatu faktor penunjang yang sangat penting bagi perkembangan secara menyeluruh suatu bangsa, semakin meningkatnya kegiatan industri dan jumlah penduduk, maka kebutuhan akan energi listrik juga mengalami peningkatan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi ketersediaan listrik di

Indonesia antara lain ketersediaan energi primer dan harga bahan bakar.[2,3]

Di Indonesia, terdapat banyak pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil seiring berjalannya waktu pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil harus digantikan dengan pembangkit yang dapat diperbaharui (*renewable*) seperti halnya Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) dimana merupakan pembangkit yang mengolah energi alternatif yang berasal dari biogas dengan kandungan utama adalah metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Gas *methane* pada Biogas tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar *gas engine* sebagai motor penggerak untuk menghasilkan energi listrik pada PLTBg. Efisiensi termal dari *gas engine* hanya berkisar pada 30-40%, sehingga diperlukan pemanfaatan yang lebih efisien.

Telah banyak usaha yang dilakukan dalam pengefisienan energi pada pembangkit listrik. Salah satunya dengan melakukan analisis *exergy*. Selama ini analisis yang dilakukan hanya berdasarkan kepada hukum pertama termodinamika, yaitu energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan yang mana penurunan kualitas energi tidak diperhitungkan. Maka untuk mengkaji lebih dalam mengenai penurunan kualitas dari energi tersebut digunakanlah analisis *exergy*. Analisis *exergy* menggunakan konservasi massa dan energi serta berdasar pada hukum termodinamika kedua, yaitu proses termodinamika selalu tidak ideal sehingga terjadi penurunan kualitas energi.[4]

Kompresor gas engine dalam siklus Miller merupakan salah satu komponen kunci yang mendukung kinerja mesin dengan efisiensi termal yang lebih tinggi. Siklus Miller adalah modifikasi dari siklus Otto yang menggunakan prinsip pemadatan udara sebelum masuk ke ruang bakar, serta pengendalian rasio kompresi efektif melalui penutupan awal atau penundaan penutupan katup masuk. Kompresor digunakan untuk meningkatkan tekanan dan densitas udara masuk, memungkinkan pembakaran yang lebih efisien.

Fungsi Kompresor pada Siklus Miller:

1. Meningkatkan Efisiensi Volumetrik
Dengan memampatkan udara sebelum masuk ke silinder, jumlah udara yang lebih besar dapat masuk ke ruang bakar, meningkatkan efisiensi volumetrik.
2. Menurunkan Temperatur Gas Sisa
Karena udara lebih padat dan suhu lebih rendah, proses pembakaran lebih terkendali sehingga mengurangi kerugian energi akibat suhu tinggi.
3. Mengurangi Ketukan Mesin (Knocking)
Dengan mengurangi tekanan dan suhu pada akhir langkah kompresi melalui penutupan awal katup masuk, risiko knocking berkurang, memungkinkan mesin beroperasi pada rasio kompresi yang lebih tinggi.

Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi adalah melalui analisis *exergy*. Analisis ini memungkinkan identifikasi lokasi, penyebab, dan besaran kerugian serta pemborosan pada suatu sistem termal. Namun, analisis *exergy* saja tidak cukup, karena hanya mampu menunjukkan nilai *exergy* yang terbuang tanpa mengungkap kerugian nyata dalam bentuk biaya. Untuk memahami aspek kerugian biaya secara lebih mendalam, diperlukan analisis lanjutan yang disebut *analisis exergoeconomic*, yaitu kombinasi antara analisis *exergy* dan analisis ekonomi teknik [5]

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kerugian biaya akibat kehilangan energi pada *gas engine* siklus Miller di Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg).

2. Metode Penelitian

Metodologi yang dilakukan dalam penelitian ini dimulai dari pendekatan sebagai berikut :

2.1 Analisis Ekonomi

Analisis ini dilakukan untuk menentukan biaya total yang dikeluarkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) Tandun dalam satu tahun operasional, serta menghitung biaya produksi listrik per kilo watt-jam (kWh) yang dihasilkan oleh PLTBg tersebut. Proses analisis mencakup berbagai aspek yang memengaruhi total biaya, termasuk estimasi biaya investasi awal, biaya operasional dan perawatan rutin (*fix operation and maintenance cost*), serta biaya operasional dan perawatan yang sifatnya *variabel* (*variable operation and maintenance cost*). Dengan memahami komponen-komponen biaya ini, dapat diketahui seberapa efisien PLTBg dalam memproduksi listrik dan bagaimana biaya ini dapat dioptimalkan untuk meningkatkan profitabilitas dan efisiensi energi [6]

Untuk memperoleh nilai biaya pembangunan PLTBg, digunakan data dari periode pembangunan yang berlangsung sejak Januari 2011 hingga Desember 2011, dengan PLTBg mulai beroperasi pada Januari 2012. Komponen biaya yang digunakan dalam analisis ekonomi meliputi:

1. Biaya Investasi

Sebelum pembangkit dioperasikan, diperlukan investasi dana yang cukup besar untuk membeli dan memasang berbagai peralatan yang diperlukan (*purchased equipment*). Selain itu, lahan serta fasilitas pendukung lainnya harus tersedia agar pembangkit dapat didirikan dan beroperasi secara optimal. Fasilitas ini mencakup sistem perpipaan, kontrol, serta layanan lainnya. Semua biaya ini secara keseluruhan disebut sebagai biaya investasi total (*total capital investment*).[7]

Biaya investasi total terdiri dari dua komponen utama:

- Modal tetap (*fixed capital investment*)
 Modal tetap mencakup biaya langsung (*direct cost*) dan biaya tidak langsung (*indirect cost*). Komponen ini meliputi biaya pembelian perangkat dan komponen PLTBg, pemasangan peralatan, pembebasan lahan, dan elemen lain yang mendukung pembangunan.
- Modal kerja (*working capital*)
 Modal kerja adalah dana yang diinvestasikan untuk operasional awal, termasuk pembelian bahan baku dan kebutuhan untuk *start-up* PLTBg.

Purchased Equipment Cost (PEC) adalah biaya yang dikeluarkan untuk membeli peralatan utama dalam suatu proyek industri, termasuk harga beli yang tercantum dalam kontrak serta biaya pengiriman, yang menjadi komponen penting dalam menghitung total investasi modal karena memberikan gambaran awal tentang skala investasi yang diperlukan dan digunakan sebagai acuan untuk estimasi biaya lain seperti instalasi, perpipaan, dan perawatan [8]

Untuk menghitung *Purchased Equipment Cost* (PEC), diperlukan data operasional yang berkaitan dengan komponen utama Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Data ini mencakup informasi teknis dan parameter operasional yang digunakan dalam

perhitungan biaya peralatan. Sementara itu, Tabel 1 menyajikan data operasional rata-rata PLTBg yang diambil pada tanggal 11 September 2018, yang menjadi dasar untuk menganalisis dan menghitung PEC dengan akurat menggunakan persamaan[9]:

$$PEC_k = \left(\frac{71,1 \$(kg/s)m_{ac}}{0,9-\eta_{ac}} \right) \left[\frac{p_2}{p_1} \right] \ln \left[\frac{p_2}{p_1} \right] \quad (1)$$

Annual Levelized Cost (ALC) adalah biaya tahunan rata-rata yang dihitung untuk mencakup seluruh biaya yang terkait dengan pengadaan, operasi, pemeliharaan, dan investasi suatu proyek atau sistem selama masa operasionalnya. ALC digunakan untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi suatu proyek dengan menyamakan biaya-biaya yang muncul pada berbagai tahun ke dalam nilai tahunan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\dot{C}_k = \left[\left(PEC_k - \frac{1}{(1+i)^n} \right) \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \right) \right] \quad (2)$$

Laju biaya komponen adalah nilai yang menunjukkan tingkat pengeluaran atau kerugian biaya suatu komponen dalam sistem per satuan waktu. Istilah ini sering digunakan dalam *analisis exergoeconomic*, yang menggabungkan analisis *exergy* dengan evaluasi biaya ekonomi.

$$Z_k = \frac{\phi \times \dot{C}_k}{H} \quad (3)$$

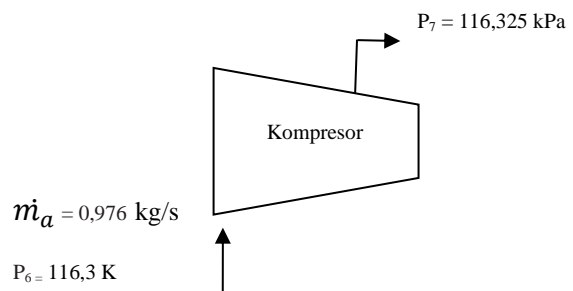
Tabel 1. Data Rara-rata Temperatur, Tekanan, Laju Aliran Massa pada tanggal 9/11/2018

Parameter	Lambang	Satuan	Nilai
Temperatur lingkungan (Ambient)	T ₀	K	297,3
Temperatur udara masuk ruang bakar	T ₁	K	322,8
Temperatur Pembakaran	T ₂	K	677,2
Temperatur Maksimum	T ₃	K	1567,1
Temperatur Akhir langkah ekspansi	T ₄	K	1241,8
Temperatur exhaust	T ₅	K	869,1
Temperatur ambient	T ₆ =T ₀	K	297,3
Temperatur Intake Manifold	T ₇	K	322,9
Tekanan udara masuk ruang bakar	P ₁	kPa	116,325
Tekanan pembakaran	P ₂	kPa	2748,498
Tekanan maksimum	P ₃	kPa	6357,400
Tekanan akhir langkah ekspansi	P ₄	kPa	293,436
Tekanan ekhaus	P ₅	kPa	101,325
Tekanan ambient	P ₆ =P ₀	kPa	101,325
Tekanan intake manifold	P ₇	kPa	116,325
Laju aliran massa gas pembakaran	\dot{m}_g	kg/s	15,0752
Massa bahan bakar	\dot{m}_f	kg/s	0,007
Laju aliran massa udara	\dot{m}_a	kg/s	0,976

3. Hasil dan bahasan

Purchase Equipment Cost Kompresor

Parameter yang digunakan untuk menghitung biaya *Purchased Equipment Cost* (PEC) dari kompresor meliputi laju aliran massa udara (\dot{m}_a), tekanan udara masuk kompresor (P₇), tekanan udara keluar kompresor (P₂) serta efisiensi kompresor (η_k) yang bernilai 88%. [10]



$$C_k = \left(\frac{71,1 \$(kg/s)m_a}{0,9-\eta_{ac}} \right) \left[\frac{P_2}{P_7} \right] \ln \left[\frac{P_2}{P_7} \right]$$

$$= \left(\frac{71,1 \$(kg/s) \cdot 0,976}{0,9-0,88} \right) \left[\frac{2748,498}{116,325} \right] \ln \left[\frac{2748,498}{116,325} \right]$$

$$= \$ 259.343,67$$

Annual Levelized

Untuk mendapatkan nilai *annual levelized* yang perlu diketahui ialah nilai tingkat suku bunga bank adalah

2,43% (GlobalRates.com) dengan life time pembangkit 20 tahun. Sehingga diperoleh nilai C_k adalah :

$$C_k = \left[\left(\$ 518.515,3 - \frac{1}{(1 + 0,0243)^{20}} \right) \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{(1 + 0,0243)^{20}}} \right) \right]$$

$$= \$ 7019,85$$

Laju Biaya Komponen (Z_k)

Setelah diperoleh nilai *Annual Levelized* komponen, selanjutnya hitung laju biaya masing-masing komponen. Berdasarkan data Buku Panduan Konversi POME Menjadi Biogas dimana *life time* PLTBg adalah 20 tahun. Nilai faktor maintenance (ϕ) adalah 1,6[5]

$$Z_k = \frac{1,6 \times \$ 7019,85}{8760}$$

$$Z_k = \$ 1,28$$

- Modal Sendiri

Berdasarkan hasil interview dapat bahwa pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas PT KME ini dibangun menggunakan modal sendiri dengan nilai pendanaan sebagai berikut, dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$E = \% Equity \times \text{total biaya investasi}$ Sehingga diperoleh modal sendiri (*equity*);

$$E = 100 \% \times \text{total investasi}$$

$$\text{Total investasi} = \$ 1.935.924,4$$

Nilai nominal *equity* sejumlah \$1.935.924,4 adalah investasi selama 20 tahun dari tahun pembuatannya, sesuai dengan asumsi *lifetime* PLTBg selama 20 tahun

$$\frac{Equity}{Tahun} = \frac{1.935.924}{20 \text{ tahun}}$$

$$\frac{Equity}{Tahun} = 96.796,2 \$$$

Investasi total / tahun = \$ 96.796,2

- Jumlah jam operasi per tahun

$$\text{Jam operasi} = \text{jumlah} \frac{\text{jam}}{\text{hari}} \times \text{jumlah} \frac{\text{hari}}{\text{tahun}}$$

$$= 24 \frac{\text{jam}}{\text{hari}} \times 365 \frac{\text{hari}}{\text{tahun}}$$

$$= 8760 \frac{\text{jam}}{\text{tahun}}$$

- Energi listrik yang dihasilkan pertahun

Faktor kapasitas pembangkit merupakan perbandingan antara daya rata-rata yang dibangkitkan selama setahun, dengan daya maksimum yang dibangkitkan

pada periode yang sama dengan spesifikasi *gas engine* Guascor SFGM 560 adalah 1055 kW.

Jadi rata-rata, *gas engine* akan beroperasi pada daya 650 kW dari 1.055 kW.

Faktor Kapasitas Pembangkit

$$= \frac{\text{total daya}}{\text{daya terpasang (desain)}}$$

$$= \frac{650 \text{ kWatt}}{1055 \text{ kWatt}}$$

$$= 0,61 = 61 \%$$

Energi = Daya x jam operasi x faktor kapasitas

$$= 1055 \text{ kW} \times 8.760 \text{ jam} \times 61 \%$$

$$\frac{\$}{\text{kWh}} \text{ Investasi} = \frac{\text{Nominal dolar investasi/ tahun}}{\text{Energi /tahun}}$$

$$= \frac{96.796,2}{5.637.498}$$

$$= \$ 0,016/ \text{kWh}$$

Pada Tabel 2. diberikan data nilai pemusnahan *exergy* pada setiap komponen PLTBg Tandun.

Komponen	Eksergi Produk (kW)	Eksergi Destroy (kW)	Efisiensi Eksergi (%)
Kompresor	136,374	30,923	3,447
Ruang bakar	28,897	107,478	14,827
Turbin	136,813	1,181	0,295

Sedangkan laju biaya aliran *exergy* dapat dihitung dengan perkalian harga spesifik *exergy* dengan nilai nilai *exergy*, seperti persamaan berikut:

$$\dot{C} = c \times \dot{X}$$

Parameter yang telah diketahui untuk mendapatkan nilai harga spesifik *exergy* adalah harga listrik (c_L) = 0,055 \$/kWh dan harga bahan bakar (c_{bb}) = 0 \$/kWh. Berikut adalah nilai W dan Q per setiap komponen:

Tabel 3. Nilai W dan Q Setiap Komponen

Parameter	Unit	Nilai
W kompresorturbo	kW	30,484
W turbinturbo	kW	2,154
W nett gas	kW	5,071
Qin	kW	209,972
Efisiensi system	%	44,72

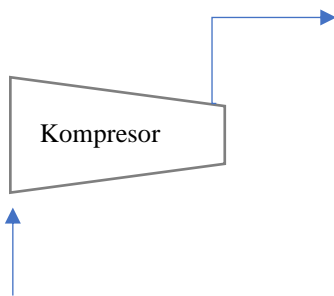
Parameter yang juga telah telah diketahui untuk mendapatkan nilai harga spesifik *exergy* adalah nilai *exergy* per setiap state nya. Berikut adalah nilai *exergy* per setiap state:

Berikut adalah nilai pemusnahan *exergy* pada setiap komponen PLTBg Tandun:

Tabel 4. Nilai Exergy Setiap Komponen

State	Laju Exergy (kW)
1	136,81
2	136,37
3	28,92
4	21,27
5	19,13
6	136,84
7	136,81

1. Kompresor turbocharger



Gambar 1. Kompresor

Biaya eksergi pada kompresor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$\Sigma_{out} \dot{C}_k = \Sigma_{in} \dot{C}_k + \dot{Z}_k$$

$$c_k \dot{X}_2 = c_1 \dot{X}_1 + c_L W_k + \dot{Z}_k$$

$$c_k = \frac{c_1 \dot{X}_1 + c_L W_k + \dot{Z}_k}{\dot{X}_2}$$

$$c_k = \frac{0 + (0,055 \$/kWh \times 30,484 kW) + (1,2821 \$/jam)}{136,37 kW}$$

$$= 0,012 \$/kWh$$

Kerugian *cost* pada kompresor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$\dot{C}_{Dk} = c_k \dot{X}_{D,k}$$

$$= 0,012 \$/kWh \times 30,93 kW$$

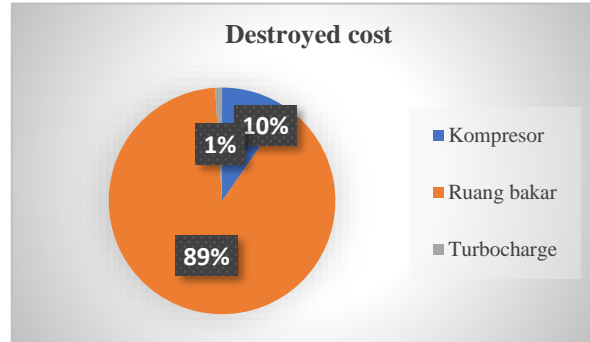
$$= 0,371 \$/jam$$

$$= Rp. 5.279/jam$$

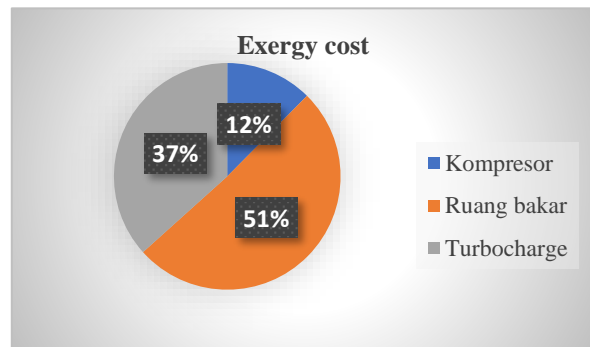
Tabel 5. Nilai Kerugian Cost Akibat Pemusnahan Exergy pada Tanggal 09/03/2019 jam 12.00 A.M

Komponen	Exergy cost (\$/kWh)	Destroyed cost (\$/h)
Kompresor	0,012	0,371
Ruang Bakar	0,056	6,01
Turbocharge	0,014	0,016
Total	0,082	6,397

Perbandingan biaya pemusnahan *exergy* yang terjadi disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik pemusnahan exergy



Gambar 3. Diagram persentase biaya exergy

Dari grafik diatas bisa kita ketahui bahwa pemusnahan *exergy* yang besar terjadi pada ruang bakar, itu menandakan bahwa proses operasi membutuhkan biaya. Ruang bakar menunjukkan persentase yang besar karena terjadinya pembakaran bahan bakar pada state ini, setelah itu diikuti oleh kompresor, dimana kompresor inilah yang memberikan tekanan terhadap bahan bakar biogas supaya bisa terbakar dengan sempurna, dan disusul oleh turbocharge.

4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa :

1. Analisis *exergoeconomic*, yang menggabungkan analisis *exergy* dan pendekatan ekonomi, merupakan metode efektif untuk mengevaluasi kinerja dan efisiensi sistem energi, seperti PLTBg (Pembangkit Listrik Tenaga Biogas).
2. Biaya produksi listrik PLTBg dihitung berdasarkan tiga komponen utama: biaya investasi sebesar \$0,018/kWh, biaya operasional

dan pemeliharaan tetap sebesar \$0,030/kWh, serta biaya operasional dan pemeliharaan variabel sebesar \$0,009/kWh, dengan total biaya produksi listrik sebesar \$0,055/kWh.

3. Pendekatan *exergoeconomic* membantu mengidentifikasi efisiensi energi dan mengoptimalkan biaya operasional, menjadikannya alat penting dalam pengembangan sistem energi berkelanjutan.

Daftar Rujukan

- [1] Kharisma, A., Pinandita, S., Jayanti, A. E., 2024. Literature Review: Kajian Potensi Energi Surya Alternatif Energi Listrik, *J. Energi Baru dan Terbarukan*, 5 (2), pp.145–154.
- [2] Imansyah, L. N., 2014. Jurnal Potensi Kerugian Akibat Penggunaan BBM Pada PLTG dan PLTGU di Sistem Jawa Bali. *Tek. Pomits*, 3 (1), pp.1–6.
- [3] Hakimah, Y., 2019. Analisis kebutuhan listrik dan penambahan pembangkit listrik. *J. Chem. Inf. Model*, 53 (9), pp.1689–1699.
- [4] Cavalcanti E. J. C., 2017. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system, *Renew. Sustain. Energy Rev*, 67 (2), pp.507–519.
- [5] Khan I. U., et al., 2017. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Convers. Manag*, 150 (10), pp.277–294.
- [6] K. Timur and D. A. N. Pengaruhnya, “ $CRF = C C = CIC \times InsCap \times CRF \times CF \times 8760$ ”.
- [7] Miran, A. Z., Nemat, A., Yari, M., 2017. Performance analysis and exergoeconomic evaluation of a TRC system enhanced by a dedicated mechanical subcooling. *Energy Convers. Manag*, 197 (5), pp.76-87
- [8] Humphreys, K. K., Engush, L. M., 1993. *Project and Cost Engineers' Handbook*, 18 (2).
- [9] Budzianowski, W. M., 2012. Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 16 (1), pp.342–349.
- [10] Moran, M. J., 2018. *Engineering thermodynamics*.