

Analisis Eksergi pada Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Pabrik Gula PT. X

Arief Rahman Prayuda^{1*}, Heru Kuncoro²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma
Jl. Margonda Raya, No. 100, Depok, Indonesia
*Corresponding author: prayudaarief24@gmail.com

Abstract

Power plants in sugar factories generally utilize a cogeneration system to generate electricity and heat for industrial processes. Bagasse, a byproduct of the sugarcane milling process, can be reused as the primary fuel in boilers. However, bagasse still contains a relatively high moisture content of 55%, which can affect combustion efficiency and subsequently impact the overall performance of the power plant. Therefore, an exergy analysis study is conducted to evaluate energy losses and identify opportunities for efficiency improvement. This study aims to analyze the exergy efficiency and exergy destruction in various key components of the power plant. The method used in this research involves the calculation of physical and chemical exergy based on the operational data of the cogeneration power plant at PT. X sugar company. The results indicate that the overall exergy efficiency of the system remains relatively low due to the high exergy destruction in the boiler, which accounts for 93.89% of the total incoming exergy. On the other hand, the steam turbine has an average exergy efficiency of 73%, suggesting room for improvement in the steam expansion system. Based on the analysis, enhancing combustion efficiency, optimizing of waste heat utilization and operations, and improving the heat transfer system are key strategies that can be implemented to reduce exergy destruction and enhance the overall system efficiency.
Keywords: exergy, biomass, cogeneration, exergy efficiency, sugar factory.

Abstrak

Pembangkit listrik di pabrik gula pada umumnya menggunakan sistem kogenerasi dalam menghasilkan energi listrik dan panas untuk menjalankan proses industrinya. Ampas tebu atau *bagasse* merupakan produk sampingan yang dihasilkan dari proses penggilingan tebu yang dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar utama pada boiler. Akan tetapi, ampas tebu masih memiliki kandungan air yang cukup tinggi, yaitu sebesar 55% sehingga dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran yang dapat berdampak terhadap kinerja keseluruhan pembangkit. Maka dari itu, penelitian analisis eksergi dilakukan guna mengevaluasi kehilangan energi dan mengidentifikasi peluang peningkatan efisiensi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi eksergi dan destruksi eksergi pada berbagai komponen utama pembangkit. Metode yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan perhitungan eksergi fisik dan kimia berdasarkan data operasional pembangkit perusahaan gula PT. X. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi eksergi keseluruhan sistem masih tergolong rendah akibat tingginya destruksi eksergi pada boiler yang mencapai 93,89% dari total eksergi yang masuk. Di sisi lain, turbin uap memiliki rata-rata efisiensi eksergi sebesar 73%, sehingga masih terdapat potensi perbaikan dalam sistem ekspansi uap. Berdasarkan hasil analisis, peningkatan kualitas pembakaran, optimasi pemanfaatan panas buang dan operasional, serta perbaikan pada sistem perpindahan panas merupakan beberapa strategi utama yang dapat dilakukan guna mengurangi destruksi eksergi dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem.

Kata kunci: eksergi, biomassa, kogenerasi, efisiensi eksergi, pabrik gula.

1. Pendahuluan

Pabrik gula merupakan salah satu sektor industri yang mengkonsumsi energi dengan skala cukup besar. Berdasarkan standar efisiensi KES (Konsumsi Energi Spesifik) oleh United Nations Industrial Development Organization, pabrik gula mencapai energi 5.9 GJ/Ton gula dengan rincian 0,6 GJ/Ton untuk energi listrik dan 5,3 GJ/Ton untuk energi panas proses [1]. Proses produksi gula umumnya melibatkan

beberapa tahapan proses di dalamnya seperti proses ekstraksi, klarifikasi, penyaringan, penguapan, kristalisasi, sentrifugasi, dan pengeringan [2]. Oleh karena itu, dalam memenuhi kebutuhan energi selama tahapan proses tersebut umumnya pabrik gula mengadopsi suatu sistem pembangkit listrik yang ditenagai oleh energi biomassa dari ampas tebu dengan konfigurasi kogenerasi.

Sistem kogenerasi memungkinkan pabrik dapat menghasilkan energi listrik dan

panas untuk proses industri gula, sehingga efisiensi energi sistem lebih tinggi dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik konvensional [3]. Sistem kogenerasi dapat dibedakan menjadi sistem kogenerasi turbin uap, turbin gas, maupun *internal combustion engines* [4]. Efisiensi energi dengan sistem kogenerasi turbin uap umumnya mencapai 65% hingga 80% [5]. Secara spesifik untuk efisiensi energi pabrik gula di Indonesia rata-rata mencapai hampir 68%, dengan daerah yang paling efisien mencapai tingkat efisiensi energi sebesar 77% serta daerah terendah sebesar 62% [6]. Adapun beberapa daerah dengan efisiensi tertinggi meliputi provinsi Gorontalo, Banten, Sulawesi Selatan, dan Jawa Timur [6].

Sumber energi biomassa dapat berupa batang singkong, ampas tebu, tandan kosong sawit, dll [7,8,9]. Biomassa yang menjadi sumber energi utama yang digunakan dalam pembangkit listrik di pabrik gula adalah ampas tebu (*bagasse*). Ampas tebu merupakan limbah atau residu berserat yang tersisa dari proses ekstraksi jus dari batang tebu [10]. Ampas tebu sendiri memiliki komposisi yang terdiri dari selulosa sekitar 32-45%, hemi-selulosa sekitar 20-32%, lignin sekitar 17-32%, kadar air sekitar 40-60%, dan serta kadar abu sekitar 1-9% [11]. Penggunaan ampas tebu sebagai bahan bakar pembangkit merupakan salah satu langkah efektif untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, mengurangi emisi karbon, serta dapat menekan biaya bahan bakar [12].

PT. PG. X merupakan salah satu pabrik gula yang terletak di pulau Jawa, Indonesia. Perusahaan tersebut memiliki pembangkit listrik kogenerasi dengan turbin uap berkapasitas daya riil sebesar 4,38 MW guna mencukupi kebutuhan pasokan energi pabrik yang memanfaatkan ampas tebu sebagai bahan bakar utamanya. Pemanfaatan biomassa ampas tebu dalam menghasilkan energi listrik dan panas untuk proses industri gula perlu digunakan

seoptimal mungkin. Bahkan umumnya tidak hanya mencakup kebutuhan energi pada pabrik akan tetapi surplus energi yang dihasilkan dapat dijual kembali ke negara [13]. Maka dari itu, diperlukan langkah analisis dan evaluasi guna meningkatkan performa tiap komponen yang dapat berdampak terhadap performa keseluruhan sistem pembangkit.

Dalam termodinamika, analisis eksergi menjadi salah satu metode guna mengevaluasi sistem pembangkit. Eksergi merupakan akumulasi kerja yang dapat diekstrak dari suatu sistem hingga mencapai kesetimbangan dengan lingkungan di sekitarnya atau dengan kata lain, eksergi lebih mengukur kepada potensi energi untuk dapat melakukan kerja yang berguna sebelum sistem tersebut mencapai tahap kesetimbangan dengan lingkungannya [14]. Berbeda dari analisis energi konvensional yang hanya cukup mempertimbangkan kuantitas energi, analisis eksergi mempertimbangkan kualitas energi dan destruksi eksergi yang terjadi dalam setiap proses, sehingga penghematan bahan bakar pun dapat tercapai [15,16,17].

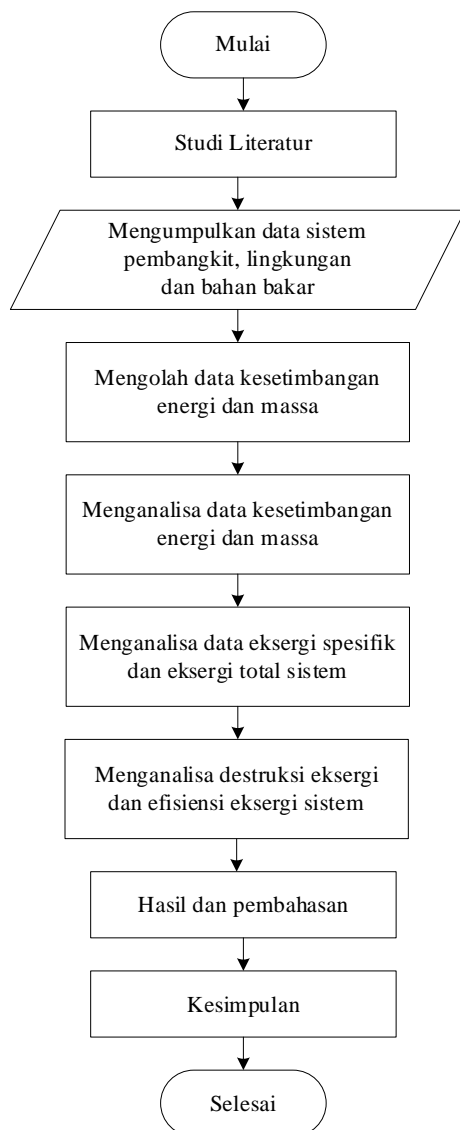
Berdasarkan hal tersebut penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi eksergi dan destruksi eksergi pada berbagai komponen utama pembangkit sehingga dapat ditentukan langkah-langkah yang tepat guna meningkatkan pemanfaatan energi secara lebih efektif dan efisien.

2. Material dan Metode

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa langkah yang dijelaskan secara rinci oleh diagram alir pada gambar 1.

2.1 Studi Literatur Pembangkit Gula

Tahapan ini sangat diperlukan sebagai landasan dalam menganalisa faktor-faktor penentu dalam menganalisa eksergi sistem pembangkit. Literatur yang digunakan berisi tentang teori dasar maupun lanjut yang berasal dari buku, artikel jurnal penelitian terdahulu, maupun *proceeding* yang telah diterbitkan.



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian eksergi pembangkit PT. PG. X

2.2 Deskripsi Pembangkit

Data awal yang digunakan pada penelitian ini merupakan data operasional yang diperoleh dari petugas lapangan yang berada di pembangkit perusahaan gula terkait. Kondisi sistem pembangkit eksisting yang menjadi studi kasus dalam penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 2 yang terdiri dari beberapa komponen pembangkit

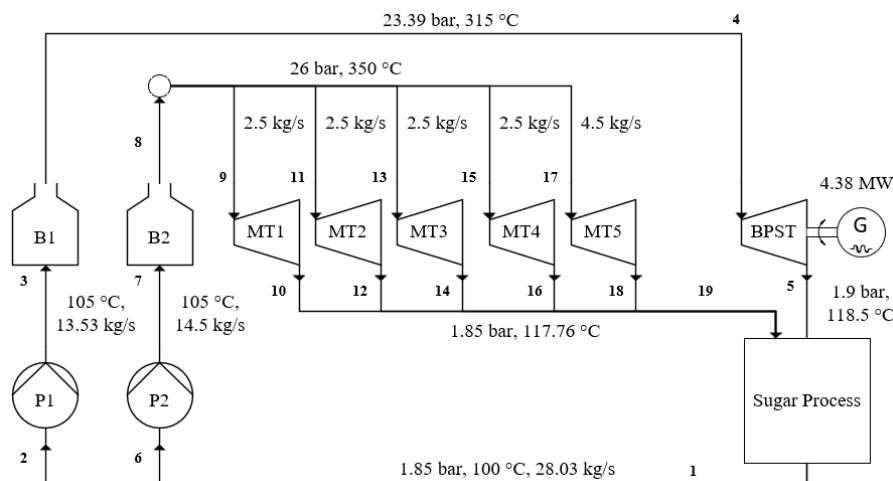
diantaranya ialah turbin uap utama tipe *back pressure steam turbine* untuk pembangkitan listrik dengan kapasitas daya riil sebesar 4,38 MW, serta tekanan uap masuk dan keluar sebesar 23,39 bar, 1,9 bar dengan temperatur uap masuk sebesar 315,24°C. Desain sistem ini menggunakan 2 buah jenis pompa yang terbagi untuk memompa dua buah jenis ketel menuju 1 turbin uap utama dan 5 turbin uap gilingan. Adapun skema pembangkit eksisting ditunjukkan pada gambar 2.

Sedangkan bahan bakar yang digunakan untuk mengoperasikan PLTU perusahaan gula PT. X adalah ampas tebu yang memiliki kadar air hingga 55%/wt. Sifat-sifat bahan bakar ampas tebu dengan kadar air 55% dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Properti *bagasse* dengan kadar air 55% [18]

No.	Properti	Nilai
1	<i>Moisture content</i>	55,00 wt%
2	<i>Volatile matter</i>	37,49 wt%
3	<i>Fixed carbon</i>	7,52 wt%
4	<i>Carbon</i>	21,48 wt%
5	<i>Hydrogen</i>	2,59 wt%
6	<i>Oxygen</i>	20,34 wt%
7	<i>Nitrogen</i>	0,07 wt%
8	<i>Total (with halides)</i>	99,47 wt%
9	<i>Chlorine (Cl)</i>	55,80 mg/kg
10	<i>Net calorific value (LHV)</i>	7,27 MJ/kg

Dalam termodinamika terdapat istilah yang dinamakan dengan kondisi *dead state*. *Dead state* secara harfiah adalah kondisi di mana suatu sistem mencapai kesetimbangan sempurna dengan lingkungan sekitarnya, sehingga tak ada lagi potensi untuk melakukan kerja [19]. Akibatnya dalam kondisi ini, semua jenis perbedaan suhu, tekanan, maupun komposisi kimia telah hilang, sehingga eksergi sistem menjadi nol. Dalam penelitian analisis eksergi pembangkit perusahaan gula PT. X, kondisi *dead state* ditentukan pada 1 atm dan 32 °C.



Gambar 2. Skema pembangkit

2.3 Pengolahan Data

Setelah data teknis pembangkit, lingkungan dan bahan bakar didapatkan. Maka selanjutnya ialah mengolah data-data tersebut untuk menentukan besaran energi dan eksergi sistem pada pembangkit gula. Adapun untuk efisiensi energi sistem pembangkit kogenerasi ialah akumulasi terhadap kerja yang dihasilkan dengan panas proses yang dapat digunakan terhadap panas yang masuk oleh bahan bakar dalam boiler [20].

$$\eta = \frac{W_{out} + Q_{ph}}{Q_{in}} \quad (1)$$

Mengevaluasi keseimbangan energi, eksergi spesifik, dan eksergi total pada setiap kondisi aliran fluida digunakan sebagai metode untuk mengevaluasi eksergi total sistem pada penelitian ini. Adapun untuk dapat menganalisa eksergi total pada sistem pembangkit diperlukan langkah untuk menganalisa akumulasi eksergi spesifik dari empat komponen eksergi, antara lain ialah eksergi fisik, eksergi kinetik, eksergi potensial, serta eksergi kimia [21].

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_k + \dot{E}x_{pt} + \dot{E}x_{ch} \quad (2)$$

Akan tetapi untuk studi kasus analisis termal sistem pembangkit hanya terdapat 2 jenis eksergi yang dapat

digunakan, yaitu eksergi fisik dan eksergi kimia. Eksergi fisik merupakan eksergi yang berhubungan dengan perubahan kondisi fisik dari sistem terkait seperti misalnya suhu dan tekanan relatif terhadap lingkungan [21]. Eksergi fisik dipengaruhi oleh perbedaan entalpi dan entropi antara kondisi sistem dengan lingkungan.

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m} (h_i - h_o) + T_o (s_i - s_o) \quad (3)$$

Kemudian eksergi kimia, eksergi ini berkaitan dengan potensi kerja yang dapat diperoleh dari reaksi kimia dalam sistem [21]. Eksergi kimia dari aliran uap dan air sangatlah kecil sehingga dalam hal ini dapat diabaikan.

Eksergi pada bahan bakar dapat ditentukan dengan cara mengetahui kandungan eksergi kimia spesifik dan eksergi fisik spesifik dalam bahan bakar tersebut. Adapun cara untuk menentukan eksergi kimia dalam bahan bakar perlu mengetahui nilai rasio eksergi (ϕ) terhadap nilai bersih kalor (LHV) bahan bakar. Umumnya untuk biomassa, rasio tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan empiris bahan bakar yang mempertimbangkan rasio molar hidrogen terhadap karbon (H/C) dan oksigen terhadap karbon (O/C) [14]. Nilai eksergi kimia spesifik dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\phi_{dry} = \frac{1,0438 + 0,1882 (H/C) - 0,2509 [1 + 0,7256 (N/C)] + 0,0383 (N/C)}{1 - 0,3035 (O/C)} \quad (4)$$

$$\dot{E}x_{ch} = [(LHV)_0 + wh]\phi_{dry} \quad (5)$$

Berdasarkan perhitungan data yang telah dilakukan, adapun nilai rasio bahan bakar *bagasse* dengan kandungan air 55% dalam penelitian ini ialah 1,02. Sedangkan nilai eksergi kimia pada bahan bakar *bagasse* ialah sebesar 7.506,63 kJ/kg.

Sementara itu, untuk eksergi fisik bahan bakar dapat dianggap nol karena *bagasse* memiliki kondisi yang sama dengan kondisi lingkungan yaitu pada temperatur 32°C dengan tekanan 1 atm. Sehingga eksergi dalam bahan bakar *bagasse* dapat didefinisikan sebagai akumulasi dari eksergi kimia spesifik dan eksergi fisik spesifik.

$$\dot{E}x_f = \dot{E}x_{ch} + \dot{E}x_{ph} \quad (6)$$

Sedangkan eksergi bahan bakar berdasarkan massa kebutuhan bahan bakarnya dapat didefinisikan sebagai nilai eksergi bahan bakar *bagasse* terhadap konsumsi massa *bagasse* per satuan waktu. Adapun kebutuhan bahan bakar pada pembangkit ialah sebesar 54,15 ton per jam.

$$\dot{E}f = \dot{m} + \dot{E}x_f \quad (7)$$

Dalam sistem termodinamika, akan selalu terdapat bagian eksergi yang hilang akibat proses ireversibel., yang disebut sebagai destruksi eksergi. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa semua proses nyata akan mengalami peningkatan entropi [17]. Sehingga dalam hal ini dapat diartikan selalu ada eksergi yang terbuang. Maka dari itu untuk menghitung besaran total eksergi sistem yang terbuang, perlu dirinci hingga tiap komponen sistem tersebut.

Destruksi pada komponen turbin didefinisikan sebagai selisih antara eksergi yang masuk pada turbin dengan eksergi keluar dan kerja yang dihasilkan oleh turbin.

$$\dot{E}x_{d,Turbin} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} - W_{Turbin} \quad (8)$$

Pada komponen pompa, destruksi eksergi didefinisikan sebagai selisih antara eksergi yang masuk dengan eksergi keluar beserta daya masuk pada pompa.

$$\dot{E}x_{d,Pompa} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} + W_{Pompa} \quad (9)$$

Kemudian untuk destruksi yang terjadi pada boiler ialah akumulasi dari eksergi pada bahan bakar dan eksergi aliran yang masuk dikurangi dengan eksergi yang keluar dari boiler.

$$\dot{E}x_{d,Boiler} = \dot{E}f + \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} \quad (10)$$

Dalam analisis eksergi, terdapat juga rasio destruksi eksergi (y_d). Rasio destruksi eksergi dapat dirumuskan sebagai besaran destruksi eksergi pada komponen pembangkit terhadap eksergi bahan bakar total pembangkit. Rasio ini dapat mengukur seberapa besar bagian dari eksergi yang masuk ke dalam sistem hingga mengalami kerusakan akibat proses irreversibilitas.

$$y_d = \frac{\dot{E}x_d}{\dot{E}f} \quad (11)$$

Efisiensi eksergi dari pembangkit kogenerasi ditentukan sebagai besaran kerja dan eksergi panas proses yang dihasilkan oleh suatu sistem pembangkit terhadap eksergi total dari bahan bakar yang masuk dalam sistem pembangkit.

$$\eta_{\dot{E}x} = \frac{W_{out} + \dot{E}x_Q}{\dot{E}f} \quad (12)$$

Sementara eksergi panas proses didefinisikan sebagai faktor eksergi (α) dan energi panas proses yang dihasilkan.

$$\alpha = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \quad (12)$$

$$Q_{ph} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{19} h_{19} - \dot{m}_1 h_1 \quad (13)$$

$$\eta_{\dot{E}x} = \frac{W_{out} + \alpha \cdot Q_{ph}}{\dot{E}_f} \quad (14)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Pada tahapan ini disajikan hasil perhitungan kesetimbangan energi dan massa serta eksergi sistem dari data awal yang telah diperoleh. Sehingga data tersebut

dapat dianalisa lebih lanjut untuk menentukan hal-hal apa saja yang mempengaruhi performa eksergi dari sistem pembangkit gula PT. PG. X.

3.1 Hasil

Hasil perhitungan kesetimbangan energi dan massa serta eksergi total dari setiap kondisi aliran ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Profil aliran massa, kesetimbangan energi dan eksergi pada pembangkit

Aliran	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	\dot{m} (kg/s)	$\dot{E}x$ (kW)	Fasa
1	100,00	1,85	419,16	1,31	28,03	7.231	Air
2	100,00	1,85	419,16	1,31	13,53	3.490	Air
3	105,00	23,39	441,85	1,36	13,53	3.773	Air
4	315,24	23,39	3050,44	6,75	13,53	36.727	Uap
5	118,50	1,89	2703,80	7,15	13,53	31.865	Uap jenuh
6	100,00	1,85	419,16	1,31	14,50	3.741	Air
7	105,00	26,00	442,05	1,36	14,50	4.048	Air
8	350,00	26,00	3124,83	6,82	14,50	40.414	Uap
9	350,00	26,00	3124,83	6,82	2,50	6.968	Uap
10	117,76	1,85	2702,67	7,15	2,50	5.886	Uap jenuh
11	350,00	26,00	3124,83	6,82	2,50	6.968	Uap
12	117,76	1,85	2702,67	7,15	2,50	5.886	Uap jenuh
13	350,00	26,00	3124,83	6,82	2,50	6.968	Uap
14	117,76	1,85	2702,67	7,15	2,50	5.886	Uap jenuh
15	350,00	26,00	3124,83	6,82	2,50	6.968	Uap
16	117,76	1,85	2702,67	7,15	2,50	5.886	Uap jenuh
17	350,00	26,00	3124,83	6,82	4,50	12.542	Uap
18	117,76	1,85	2702,67	7,15	4,50	10.595	Uap jenuh
19	117,76	1,85	2702,67	7,15	14,50	34.139	Uap jenuh

Berdasarkan hasil perhitungan data kesetimbangan energi dan massa serta eksergi total setiap kondisi aliran yang ditampilkan pada tabel 2, maka dapat

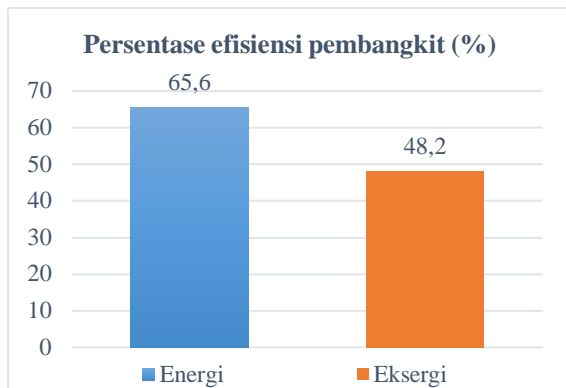
ditentukan besaran destruksi energi, rasio eksergi dan efisiensi eksergi setiap komponen pembangkit yang ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Destruksi eksergi, rasio destruksi eksergi dan efisiensi eksergi tiap komponen pembangkit

No.	Komponen	$\dot{E}x_d$ (kW)	$\dot{E}x_d$ (%)	y_d	$\eta_{\dot{E}x}$ (%)
1	Turbin alternator	483,37	1,04	0,0043	90,06
2	Turbin gilingan 1	381,91	0,82	0,0034	64,70
3	Turbin gilingan 2	381,91	0,82	0,0034	64,70
4	Turbin gilingan 3	381,91	0,82	0,0034	64,70
5	Turbin gilingan 4	381,91	0,82	0,0034	64,70
6	Turbin gilingan 5	697,41	1,50	0,0062	64,19
7	Pompa boiler 1	23,55	0,05	0,0002	92,33
8	Pompa boiler 2	102,56	0,22	0,0009	74,94
9	Boiler 1	19.092,65	41,13	0,1691	70,57
10	Boiler 2	24.491,40	52,76	0,2169	66,41

3.2 Pembahasan

Hasil pengolahan data yang didapatkan pada tabel 2 dan 3 disajikan dalam bentuk grafik 3 dan 4 untuk memudahkan proses analisa eksergi pada penelitian ini.



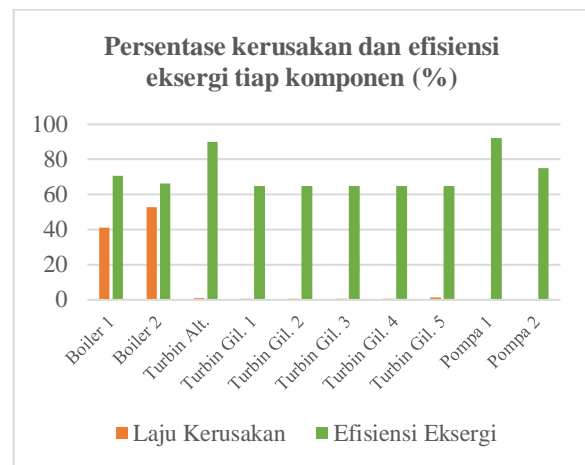
Gambar 3. Grafik perbandingan efisiensi energi dan eksergi pembangkit

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan oleh gambar 3, dapat diketahui bahwa efisiensi energi 65,6% menunjukkan sistem memiliki performa yang cukup baik dalam mengubah energi bahan bakar menjadi energi berguna yang berwujud listrik dan panas. Akan tetapi efisiensi eksergi yang mencapai 48,2% mengindikasikan bahwa terdapat kerusakan eksergi (irreversibilitas) yang bernilai cukup besar pada sistem, terutama untuk setiap proses yang melibatkan terjadinya konversi energi berkualitas tinggi menuju energi berkualitas rendah.

Terdapat kesenjangan sebesar 17,4% antara efisiensi energi dan eksergi yang menunjukkan bahwa saat proses berlangsung terdapat banyaknya energi panas yang dilepaskan ke lingkungan sekitar ataupun digunakan dalam keadaan suhu relatif rendah, sehingga dalam hal ini yang terjadi ialah nilai kerja potensialnya sangat rendah. Variasi dalam kualitas bahan bakar selama proses pembakaran secara langsung memengaruhi nilai eksergi, hal ini disebabkan oleh kandungan energi dan tingkat irreversibilitasnya turut menentukan efisiensi termodinamika sistem.

Grafik pada gambar 4 menunjukkan pengaruh laju kerusakan eksergi terhadap

sistem dan efisiensi eksergi pada setiap komponen pembangkit. Grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4 memperlihatkan bahwa laju kerusakan eksergi terbesar yang terjadi pada sistem tersebut ialah boiler 2 kemudian diikuti dengan boiler 1. Boiler 2 memiliki persentase destruksi tertinggi sebesar 52,76% dan boiler 1 sebesar 41,13% dari keseluruhan sistem, hal ini menunjukkan bahwa boiler merupakan sumber utama kerusakan eksergi dalam sistem.



Gambar 4. Grafik laju kerusakan eksergi dan efisiensi eksergi komponen pembangkit

Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti irreversibilitas saat proses pembakaran. Proses pembakaran bahan bakar dalam sistem boiler berlangsung sangat irreversibel dan reaksi kimia dari pembakaran dapat melepaskan energi, akan tetapi hal tersebut disertai dengan kenaikan entropi besar akibat dari gas hasil pembakaran bersuhu tinggi yang bercampur dengan udara sisa. Sehingga mengakibatkan banyak eksergi yang hilang sebagai panas buang melalui cerobong (*flue gas*) serta konversi energi dari kimia menuju termal yang sangat tidak efisien secara kualitas.

Panas buang melalui cerobong (*flue gas*) kemungkinan masih mengandung suhu yang tinggi, akan tetapi tidak dimanfaatkan lebih lanjut sehingga panas yang masih mengandung eksergi tinggi tidak dapat dimanfaatkan dengan baik namun dibuang

ke lingkungan dan mengakibatkan peningkatan kerusakan eksergi. Kualitas bahan bakar ampas tebu memiliki kadar air yang cukup tinggi, yaitu sebesar 55%, sehingga sejumlah besar energi yang digunakan terserap untuk menguapkan air dan hanya menghasilkan sedikit kerja, dengan kata lain energi besar tapi ekserginya rendah. Hal tersebut menyebabkan proses pembakaran yang terjadi dalam ruang bakar (*furnace*) menjadi tidak sempurna, sehingga mengakibatkan kehilangan banyak eksergi.

Proses perpindahan panas dalam boiler menjadi salah satu faktor yang perlu ditinjau. Karena perbedaan suhu yang terlalu tinggi pada perpindahan panas menyebabkan perpindahan panas menjadi irreversibel, sehingga menyebabkan kenaikan entropi, di mana hal ini tidak efisien secara eksergi akibat degradasi energi berkualitas tinggi menjadi rendah. Terakhir, terdapat kemungkinan operasional boiler tidak optimal. Hal ini dapat disebabkan oleh penumpukan kerak pada permukaan dinding pipa *heat exchanger* boiler sehingga menyebabkan menurunnya efektivitas perpindahan panas. Hal ini berakibat pada eksergi input dari bahan bakar tidak dapat sepenuhnya dikonversi ke dalam bentuk uap. Sehingga banyak eksergi yang hilang dan menjadi kerusakan eksergi internal.

Berdasarkan permasalahan yang telah disampaikan, adapun langkah-langkah yang perlu dilakukan antara lain ialah mengoptimasi rasio udara dan bahan bakar serta menerapkan teknik pembakaran tekanan tinggi untuk menekan irreversibilitas pada proses pembakaran. Pemanfaatan lebih lanjut terhadap panas buang (*flue gas*) dengan menggunakan *economizer*, integrasi dengan sistem HRSG (*heat recovery steam generator*), dan menggunakan untuk pengeringan bahan bakar ampas tebu. Sedangkan untuk mengurangi gradien suhu ekstrim saat perpindahan panas, dapat dilakukan langkah meningkatkan luas permukaan *heat exchanger*, dan menggunakan sistem *multi-stage heat exchange*. Perlu dilakukan

langkah audit termal serta perawatan pada pipa-pipa boiler secara berkala.

Sementara di sisi lain performa turbin uap alternator dan gilingan menunjukkan tingkat efisiensi eksergi yang cukup tinggi, yaitu 90,06% dan 64,44% atau 73% rata-rata dari keseluruhan. Hal ini menunjukkan bahwa konversi energi termal menuju kerja dapat berlangsung secara efisien dengan minimum kerugian, akan tetapi masih dapat ditingkatkan dengan menjaga kualitas uap masuknya. Kinerja boiler sebagai faktor terbesar perlu dioptimalkan menuju hasil yang maksimal sehingga berimbas kepada efisiensi eksergi total pembangkit yang dapat meningkat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian eksergi pembangkit gula PT. X., telah diperoleh beberapa hasil dari analisa data-data terkait. Sistem pembangkit kogenerasi memiliki efisiensi energi yang cukup baik, akan tetapi efisiensi eksergi yang masih kurang baik menunjukkan adanya proses kerusakan eksergi yang signifikan. Adapun hal-hal tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa komponen pembangkit yang memiliki kerusakan eksergi terbesar sehingga perlu dioptimasi kinerjanya.

Hal tersebut dapat ditunjukkan dari dua unit boiler yang memiliki total kerusakan eksergi yang cukup besar, yaitu 43.584 kW atau setara dengan 93,89% dari total keseluruhan sistem. Beberapa factor penyebabnya ialah irreversibilitas pada proses pembakaran, panas buang *flue gas* yang masih tinggi, kelembaban tinggi pada bahan bakar ampas tebu, gradien suhu tinggi pada transfer panas, serta operasional boiler yang kurang optimal. Akibatnya, hal ini dapat berdampak terhadap kinerja komponen lain pada pembangkit, seperti misalnya turbin uap.

Secara keseluruhan proses konversi energi termal menuju kerja oleh turbin uap mencapai rata-rata 73%, hal ini masih dapat ditingkatkan dengan menjaga kualitas uap masuk pada turbin. Dengan melakukan perbaikan pada komponen yang memiliki

tingkat laju kerusakan eksergi tertinggi, diharapkan efisiensi setiap komponen pembangkit dapat meningkat sehingga efisiensi sistem secara keseluruhan dapat ditingkatkan.

Referensi

- [1] UNIDO, 2010. Global Industrial Energy Efficiency Benchmarking.
- [2] Zhang, H. et al., 2021. Green production of sugar by membrane technology: How far is it from industrialization?. *Green Chemical Engineering*, 2(1), 27-43.
- [3] Abbas, T. et al., 2020. Biomass cogeneration technologies: A review. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 10(1), 1-15.
- [4] Bhatia, S. C., 2014. *Advanced renewable energy systems, Part 1 and 2 Ed.*, CRC Press, New Delhi.
- [5] Kabeyi, M. J. B., and Olanrewaju, O. A., 2023. Bagasse electricity potential of conventional sugarcane factories. *Journal of Energy*, 2023(1), 5749122.
- [6] Win, T., et al., 2021. Analysis of energy efficiency of Indonesia's sugar industry. *International Energy Journal*, 21(2), 245-256.
- [7] Irawan, D., & Handono, S. D., 2024. Karakteristik limbah batang singkong sebagai biomassa co-firing untuk pembangkit listrik. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 13(1).
- [8] Khotimah, N., 2023. Analisis Teoritis Perhitungan High Heating Value (HHV) Bio-Coal Berbahan Dasar Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 12(2).
- [9] Arifin, Z., Amrul, A., & Irsyad, M., 2021. Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (torrefied biomass). *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(1), 53-60.
- [10] Ajala, E. O., et al., 2021. Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. *Bioresources and Bioprocessing*, 8, 1-25.
- [11] Kumar, A., et al., 2021. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules*, 169, pp.564-582.
- [12] Kabeyi, M.J.B. and Olanrewaju, O.A., 2021. Preliminary design of a bagasse based firm power plant for a sugar factory. In 2021 Southern African Universities Power Engineering Conference/ Robotics and Mechatronics/ Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA) (pp. 1-9). IEEE.
- [13] Kabeyi, M.J.B. and Olanrewaju, O.A., 2021. Performance analysis of a sugarcane bagasse cogeneration power plant in grid electricity generation. In 11th annual international conference on industrial engineering and operations management Singapore (pp. 7-11).
- [14] Kotas, T.J., 2012. *The exergy method of thermal plant analysis*. Paragon Publishing.
- [15] James, C., et al., 2020. A review of exergy based optimization and control. *Processes*, 8(3), p.364.
- [16] Sharew, S.S., et al., 2024. Combining exergy and pinch analysis for the operating mode optimization of a steam turbine cogeneration plant in Wonji-Shoa, Ethiopia. *Entropy*, 26(6), p.453.
- [17] Sangi, R. and Müller, D., 2019. Application of the second law of thermodynamics to control: A review. *Energy*, 174, pp.938-953.
- [18] Energy Research Center of The Netherlands, 2009. Phyllis2 #3180 sugar cane bagasse. TNO Database.
- [19] Gaggioli, R., 2012. The dead state. *International Journal of Thermodynamics*, 15(4), pp.191-199.

- [20] Birru, E., 2016. Sugar cane industry overview and energy efficiency considerations. KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm.
- [21] Dincer, I. and Rosen M. A., 2020. Exergy, 3rd Ed., Elsevier Science.