

Analisis Efisiensi Eksergi Water Tube Boiler Pada Unit Penyediaan Steam di Salah Satu Plant Gas Processing Aceh, Indonesia

Exergy Efficiency Analysis of Water Tube Boiler in the Steam Supply Unit at a Plant Gas Processing in Aceh, Indonesia

Ahmad Wisnu Prasetyo^{1*}, Widayat^{2*}, Mohamad Said Kartono Tony Suryo Utomo^{3*}

¹Magister Energi, Universitas Diponegoro Pleburan, Indonesia 50241

²Departemen Teknik Kimia, Universitas Diponegoro, Tembalang, Indonesia, 50275

³Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Tembalang, Indonesia, 50275

Artikel histori :

Diterima 22 Mei 2024
Diterima dalam revisi 11 Agustus 2024
Diterima 19 Agustus 2024
Online 11 September 2024

ABSTRAK: Artikel ini membahas analisis efisiensi eksergi water tube boiler pada unit penyediaan steam di plant pengolahan gas di Aceh, Indonesia. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi penggunaan energi aktual dan kerusakan eksergi akibat ireversibilitas. Boiler merupakan sumber utama kerusakan eksergi dalam sistem penyediaan uap, sehingga ada peluang besar untuk meningkatkan efisiensi kinerja dan mengurangi konsumsi bahan bakar. Hasil analisis menunjukkan efisiensi eksergi sekitar 65,9%. Total kerusakan eksergi mencapai 13,90 MW atau 62% dari eksergi masuk sebesar 22,40 MW, dengan kerusakan pada Combustor sebesar 37% dan Heat Exchanger sebesar 25%. Angka ini lebih rendah dibandingkan penelitian lain yang menunjukkan kerusakan eksergi hingga 89,13% dari eksergi masuk sebesar 279,58 MW. Kerusakan terbesar terjadi pada Combustor dan Heat Exchanger, dipicu oleh udara berlebih yang meningkatkan kehilangan gas buang, kerusakan isolasi termal yang menyebabkan kehilangan panas, pengaturan rasio pembakaran yang tidak seimbang sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna, serta aktivitas blowdown yang hanya dilakukan saat konduktivitas tinggi, yang menurunkan efisiensi boiler.

Kata Kunci: water tube boiler; analisis eksergi; kerusakan eksergi; efisiensi eksergi;

ABSTRACT: This article discusses the exergy efficiency analysis of a water tube boiler in the steam supply unit of a gas processing plant in Aceh, Indonesia. The study aims to identify actual energy usage and exergy destruction due to irreversibilities. The boiler is identified as the primary source of exergy destruction in the steam supply system, highlighting a significant opportunity to improve performance efficiency and reduce fuel consumption. The analysis results show an exergy efficiency of approximately 65.9%. The total exergy destruction amounts to 13.90 MW, or 62% of the incoming exergy of 22.40 MW, with the combustor contributing 37% and the heat exchanger 25% to the total destruction. These figures are lower compared to other studies, which show exergy destruction up to 89.13% of the incoming exergy of 279.58 MW. The major exergy losses occur in the combustor and heat exchanger, driven by factors such as excess air leading to flue gas losses, damaged thermal insulation causing heat loss, imbalanced combustion ratios resulting in incomplete combustion, and blowdown activities only performed at high conductivity, all of which decrease boiler efficiency.

Key Word: water tube boiler; exergy analysis; exergy destruction; exergy efficiency.

1. Pendahuluan

Meningkatnya taraf hidup penduduk membuat kebutuhan energi semakin meningkat, yang tentunya akan berdampak pada pertumbuhan emisi karbondioksida (CO₂).

Ketergantungan penduduk terhadap bahan bakar fosil minyak dan gas sangat erat kaitannya dengan pertumbuhan polusi sehingga dapat memicu penurunan ketahanan energi mengenai ketersediaan cadangan minyak dan gas serta memicu adanya pemanasan global (Hasudungan Baringbing

* Corresponding Author

Email: ahmadwisnuprasetyo@outlook.com

& Nazaruddin Sinaga, 2023). Energi minyak dan gas masih berpengaruh pada konsumsi energi primer dunia, bahkan sampai tahun 2030 tuntutan energi dunia naik hingga 45% atau dalam per tahun rata – rata mengalami kenaikan hingga 1.6%. Kenaikan permintaan energi dunia ini disebabkan adanya laju pertumbuhan penduduk dan perkembangan kegiatan ekonomi. Konsumsi energi di Indonesia juga mengalami peningkatan, bahkan pada tahun 2050 permintaan energi akan didominasi oleh sektor industri dan transportasi. Menurut data dari *outlook* energi Indonesia 2017, permintaan energi nasional masing – masing sekitar 35% dan 29% untuk sektor industri dan transportasi di tahun 2025, sementara pada tahun 2050 sekitar 31% dan 30%, sisanya merupakan sektor lainnya seperti komersial, rumah tangga dan sebagainya (Abdurrahman, 2017).

Perlu langkah strategis untuk ikut berkontribusi dalam melakukan efisiensi terhadap penggunaan energi pada suatu *plant* untuk mengurangi dampak lingkungan, salah satunya dengan melakukan analisis *Dis* performansi *plant* melalui analisis eksergi. Metode pendekatan analisis eksergi dilakukan berdasarkan hukum kedua termodinamika dengan mempertimbangkan kerugian entropi dan kualitas energi (Tjoteng et al., 2023), berbeda dengan metode analisis energi yang didasarkan pada Hukum Pertama Termodinamika. Hukum ini tidak memperhitungkan kualitas energi namun memperhatikan terkait jumlah energi serta perubahan satu bentuk ke bentuk lainnya sehingga memberikan hasil yang tidak akurat terhadap kinerja peralatan (Heroza & Pratoto, 2022). Analisis eksergi memberikan gambaran perbedaan antara kehilangan energi terhadap lingkungan dan irreversibilitas internal dalam proses. Selain memiliki manfaat dalam meningkatkan efisiensi, analisis eksergi mampu memberikan petunjuk lokasi dan dominannya kerugian sehingga pada metode analisis ini dapat mengetahui distribusi *losses exergy* dan komponen-komponen yang memiliki kerusakan eksergi paling besar (Sarah, 2020). Dengan demikian metode analisis eksergi adalah salah satu formula yang baik untuk diimplementasikan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi pemakaian energi sebenarnya dan kehilangan energi sebenarnya pada suatu kerja sistem. Analisis eksergi telah dilakukan oleh beberapa peneliti untuk mengetahui alasan terjadinya *losses* pada sistem (Regulagadda et al., 2010).

Salah satu yang memiliki dampak besar terhadap efisiensi energi adalah efisiensi boiler. Meminimalisasi *heat loss* dan memaksimalkan perpindahan panas pada *heat exchanger* perlu dilakukan untuk mengidentifikasi lokasi terjadinya *losses* pada komponen boiler (Dharmakusuma, 2020). Pengoptimalan efisiensi boiler merupakan salah satu cara dalam memaksimalkan bahan bakar di sebagian besar *plant* di Indonesia (Yulia et al., 2022). Efisiensi boiler sangat berpengaruh terhadap kinerja boiler, sehingga program manajemen *maintenance* juga berpengaruh terhadap kelancaran dan kontinuitas produksi *steam* untuk sebuah *plant* (Priyanto & Wilastari, 2022).

Penggunaan analisis eksergi pada performansi *plant* khususnya komponen boiler telah didiskusikan dan dilakukan oleh beberapa penulis untuk penelitian (Cengel, 2019). Beberapa penelitian mengenai analisis eksergi telah

dilakukan oleh para peneliti, diantaranya penelitian (Elwardany, 2024) melakukan penelitian mengenai meningkatkan efisiensi boiler melalui analisis energi dan eksergi secara komprehensif, dari hasil simulasi, dengan melakukan pengoptimalan temperatur pemanasan awal udara pembakaran mampu mengurangi kerusakan eksergi sebesar 5%-9%, sedangkan dengan mengurangi rasio udara berlebih pada *combustor* akan meningkatkan efisiensi eksergi sebesar 1%-2%. Pada sisi boiler dengan meningkatkan kondisi *steam* dan mengoptimalkan temperatur air umpan berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi melebihi 6% dalam simulasi studi kasus. Selanjutnya penelitian dari (Abuelnuor et al., 2024) melakukan analisis eksergi boiler di *plant* PLTU Khartoum, Sudan. Dari hasil penelitian mengidentifikasi bahwa *combustor* atau ruang pembakaran menyumbang kerusakan eksergi tertinggi dengan persentase mencapai 39.8%, sedangkan penyumbang kerusakan eksergi kedua terdapat pada komponen evaporator dengan persentase sekitar 12.7% dari seluruh eksergi yang masuk pada kondisi kapasitas maksimum laju boiler di 90%. Penelitian berikutnya dari (Lin & Wu, 2023) dengan melakukan eksperimen bahan bakar dan evaluasi menggunakan analisis eksergi pada *fire tube* boiler di Taiwan dengan menggunakan beberapa bahan bakar seperti biodiesel (BD), biodiesel *undistilled* (UB), *Low Sulfur Oil* (LSO) dan diesel sulfur rendah (ULSD). Dari hasil penelitian didapatkan efisiensi eksergi terbesar sekitar 44.8% dengan menggunakan bahan bakar biodiesel (BD), sementara efisiensi eksergi terendah sekitar 38.7% dengan menggunakan bahan bakar biodiesel *undistilled* (UB). Manfaat dari penelitian ini tidak hanya untuk aplikasi boiler saja, namun juga sebagai referensi arah kebijakan pemerintah.

Penelitian dari (Tony Suryo, 2015), dengan melakukan perhitungan analisis efisiensi eksergi pada boiler wanson III-unit kilang di pusdiklat migas, dari hasil analisis didapatkan total laju kerusakan eksergi (*losses exergy*) sekitar 34 MW atau 38.9% dari eksergi yang diterima dengan angka efisiensi eksergi pada boiler wanson sekitar 58,13%. Penelitian selanjutnya dari (Rozi, 2014) melakukan penelitian mengenai peningkatan performansi melalui analisis eksergi. Dari hasil analisis penelitian, didapatkan angka rata-rata efisiensi eksergi total sekitar 71,8% dimana tinggi atau rendahnya angka suatu efisiensi eksergi ini dapat disebabkan oleh beberapa aspek diantaranya *flowrate*, insulasi, kebersihan tubes, jumlah air masuk yang terbuang pada bagian *blowdown* dan temperatur *flue gas*. Selanjutnya terdapat penelitian dari (Chatib et al., 2023), melakukan analisis eksergi ekonomi penggilingan padi terintegrasi dengan alat Gasifier. Hasil penelitian mengungkapkan gas produser dapat menjadi pengganti solar di sistem skala kecil pada penggilingan padi. Dilihat dari bahan bakunya, sekam dapat membuat eksergi sekitar 6 kali lipat sementara gas produser dapat membuat eksergi sekitar 4 kali lipat. Penggunaan gas produser mampu menekan anggaran bahan bakar hingga 84.67%. Penelitian Selanjutnya dari (Pradipta Ahluriza, 2023), melakukan analisis eksergi siklus rankine organik terintegrasi untuk pembaharuan limbah panas sistem AC. Hasil dari analisis didapatkan sistem siklus rankine

organik dari energi listrik bersih yaitu 4.14 kW dan efektivitas termal 5.12%. Sistem siklus gabungan AC-ORC terintegrasi memiliki efektivitas eksergi 25.37%. Berdasarkan penelitian (Dila Aprilia, 2021), yang melakukan penelitian mengenai Penentuan efisiensi boiler, boiler dikatakan efisien apabila angka efisiensinya berada pada range 70% - 90%.

State of the arts (kebaruan) penelitian ini dilakukan di *plant gas processing* di Aceh, Indonesia pada unit 46 yaitu unit penyediaan *steam*. Literasi diatas menjadi referensi dalam pertimbangan bahwa penghematan energi terbesar terdapat pada efisiensi boiler secara keseluruhan. oleh karena itu dengan referensi beberapa literasi penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis *water tube boiler* baik itu pada sisi efisiensi *combustor*, efisiensi *heat exchanger* dan efisiensi total boiler.

2. Metode Penelitian

2.1. Deskripsi Sirkulasi dan Uap pada Boiler

Tipe Boiler yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe *water tube boiler* dengan kapasitas 75.000 lb/hr. Terdapat 2 boiler yang digunakan dengan kondisi 1-unit operasi dan 1-unit *standby*. Pemilihan tipe *water tube boiler* dipakai untuk proses pada tekanan uap tinggi dengan kisaran *outlet pressure* sekitar 43 barg / 257 °C. Prinsip dari tipe boiler ini adalah *feedwater* boiler akan mengalir melalui pipa-pipa kemudian dipanaskan pada bagian *combustor* sehingga terjadi perpindahan panas. Uap yang dihasilkan akan ditampung pada drum sebelum dialirkan menuju ke sistem. Suplai air boiler bersumber dari pencampuran *make-up water* dan keluaran dari *deaerator* sehingga temperatur *feedwater* untuk boiler masih cukup tinggi sekitar 112 °C sesuai yang ditunjukkan pada tabel 2 data spesifikasi boiler berikut

Tabel 1. Data spesifikasi boiler

Parameter	Keterangan
Tipe Boiler	<i>Water Tube</i>
Jumlah Boiler	2 unit
Kapasitas tiap Boiler	75.000 lb/hr
<i>Outlet Steam Pressure / Final Steam Temp.</i>	43 bar(g) / 257 °C
<i>Feed Water Temperature</i>	112 °C
Tipe Bahan Bakar Utama	<i>Fuel Gas</i>

Pada unit *steam* ini, Boiler memiliki sistem kerja untuk merubah fase air menjadi uap yang akan digunakan pada pengguna uap di unit-unit lainnya. Unit pengguna pada *Gas Processing Plant* diantaranya adalah unit *sulfur recovery*, unit *acid gas removal*, unit *condensate stabilization system*, unit *acid gas enrichment* dan *EG Regeneration*.

Pada unit penyediaan *steam* ini memiliki beberapa sistem distribusi *steam* dan sistem pengumpulan *steam* dan *condensate*. *Steam* dibutuhkan pada *Central Processing Plant* (CPP) pada kondisi tiga tekanan berbeda. *High*

Pressure Steam (HPS) dihasilkan dari *High Pressure Package Boiler*, kemudian ada *Medium Pressure Steam* (MPS) dihasilkan dari *letdown* HPS, sementara *Low Pressure Steam* (LPS) dihasilkan dari *waste heat boiler*, *sulfur condenser* dan *letdown* dari HPS/LPS. *Steam* uap kemudian didistribusikan melalui *header* uap menuju ke *user*. HP *steam* banyak digunakan pada alat *pre-heater* di unit *Sulfur Recovery*, sedangkan untuk MP *steam* digunakan pada unit sistem *condensate stabilization* untuk alat *reboiler* dan unit *Sulfur Recovery (Steam Tracing)* dan untuk LP *Steam* yang dihasilkan dari *letdown station* dikirim menuju unit *Acid Gas Removal* dan *Acid Gas Enrichment*.

2.2. Pengambilan Data

Data parameter kerja dalam analisis eksergi yang akan digunakan pada proses perhitungan diperoleh dari *process data for line index* unit penyediaan *steam* pada *Plant Gas Processing*. Data yang diperlukan diantaranya adalah temperatur (T), tekanan (p), laju alir massa (m) pada kondisi normal operasi hingga kondisi maksimum operasi siklus serta proses sirkulasi uap dan air pada unit boiler. Perhitungan atau simulasi pada penelitian dilakukan dalam rentang waktu 1 hari atau selama 24 jam.

2.3. Bahan Bakar Boiler

Sumber energi yang digunakan oleh Boiler pada Unit penyediaan *steam* ini menggunakan *Fuel Gas*. Penyediaan *fuel gas* untuk *Central Processing Plant* (CPP) akan disuplai dari Sumur Julu Rayue (JR) yang merupakan sumber utama. Selain digunakan pada boiler, *fuel gas* ini juga akan disuplai untuk alat lainnya seperti *gas engine generators*, *compressor driver*, *SRU Main burner*, *Incinerator* dan juga untuk *HP flare* atau *acid gas flare*. Komponen terbesar *fuel gas* pada penelitian ini terletak pada kandungan *methane* sebesar 85.5% *volume*. *Methane* merupakan komponen utama gas alam dan hidrokarbon gas sederhana yang digunakan untuk menghasilkan panas. *Fuel gas* memiliki karakteristik *non-corrosive*, tidak berwarna, tidak berbau dan *non-toxic* (Santoso, 2014) dengan komposisi sesuai yang ditunjukkan pada Tabel 2 Spesifikasi *fuel gas* pada unit penyediaan *steam*.

Tabel 2 Spesifikasi *Fuel Gas*

Komponen	Unit	Hasil
<i>Methane</i>	% vol	85.5
<i>Ethane</i>	% vol	7.01
<i>Propane</i>	% vol	3.43
<i>Nitrogen</i>	% vol	0.24
<i>Carbon dioxide</i>	% vol	0.70
<i>Iso Butane</i>	% vol	1.00
<i>N-Butane</i>	% vol	0.98
<i>Iso Pentane</i>	% vol	0.42
<i>N-Pentane</i>	% vol	0.21
<i>N-Hexane</i>	% vol	0.09
<i>Water Vapor</i>	% vol	0.38

2.4. Parameter Operasi

Parameter operasi diperlukan sebagai seperangkat petunjuk tentang apa yang harus diamati dalam menentukan arah penelitian. Parameter operasi yang ditunjukkan pada tabel 3 seperti data laju alir, tekanan dan temperatur setiap item dibawah digunakan sebagai basis perhitungan entalpi dan entropi pada penelitian ini untuk menentukan kerusakan eksergi pada sisi *combustor*, *heat exchanger* dan total boiler. Kondisi parameter operasi penelitian ini juga menentukan nilai persentase efisiensi eksergi boiler. Berikut parameter operasi yang digunakan untuk penelitian ini:

Tabel 3 Parameter Operasi Penelitian

Deskripsi	Parameter Operasi		
	m (kg/s)	P (bar)	T (°C)
<i>Fuel Gas</i>	0.60	4.00	1100.00
<i>Air Comb.</i>	20.00	39.71	29.44
<i>Heat Product</i>	20.50	6.10	540.00
<i>Feed Water</i>	0.15	61.70	112.78
<i>Steam</i>	15.18	43.06	256.11
<i>Flue Gas</i>	0.30	0.001	270.56

Parameter operasi penelitian pada Tabel 3 diperoleh dari *process data for line index* unit penyediaan *steam*, yang akan diolah dalam rentang waktu 1 hari atau 24 jam dengan parameter kondisi normal operasi hingga maksimum operasi. Data yang diperoleh digunakan untuk basis perhitungan entalpi dan entropi pada penelitian dengan mengacu kepada *International Association for the Properties of Water and Steam IAWPS-95 Formulation*. Angka entalpi dan entropi yang didapatkan dari hasil formulasi digunakan untuk menentukan angka laju eksergi pada *water tube boiler*.

2.5. Perangkat Data Analisis

Perangkat lunak yang digunakan sebagai alternatif dalam pengolahan data penelitian analisis efisiensi eksergi *water tube boiler* pada unit penyediaan *steam* di salah satu *plant gas processing* adalah *microsoft excel*. *Microsoft excel* merupakan perangkat lunak atau aplikasi yang dibuat dan didistribusikan oleh *Microsoft Corporation*. Sangat familiar digunakan dalam mengolah data sesuai dengan penggunaan fungsi dan formula secara otomatis. Fasilitas tampilan layar yang sederhana memudahkan saat praktik analisis sehingga pengolahan data tidak sulit dan efisien.

2.6. Formulasi Eksergi pada Boiler

Pada penelitian ini memiliki batasan – batasan masalah diantaranya adalah kondisi aliran dianggap tunak (*Steady State*) sehingga angka dari energi potensial dan energi kinetik pada sistem tidak diperhitungkan, sedangkan terkait temperatur dan tekanan lingkungan pada penelitian ini diasumsikan konstan yaitu $p_0 = 1$ bar dan $T_0 = 25$ degC. Laju alir uap dan *feedwater* dianggap *steady state*, proses pembakaran pada boiler dianggap adiabatik. Suatu sistem dapat dibagi menjadi 4 eksergi komponen yaitu eksergi fisik, eksergi kimia, eksergi kinetik dan eksergi potensial.

$$E_x = E^{ph} + E^{ch} + E^{kn} + E^{pt} \quad (1)$$

Keterangan:

- E_x = eksergi
- E^{ph} = eksergi fisik
- E^{ch} = eksergi kimia
- E^{kn} = eksergi kinetik
- E^{pt} = eksergi potensial

Total eksergi spesifik pada suatu sistem dengan basis massa (e) dinyatakan dalam formulasi berikut:

$$e = e^{ph} + e^{ch} + e^{kn} + e^{pt} \quad (2)$$

Keterangan:

- e_x = laju alir eksergi total (kJ/kg)
- e^{ph} = laju alir eksergi fisik (kJ/kg)
- e^{ch} = laju alir eksergi kimia (kJ/kg)
- e^{kn} = laju alir eksergi kinetik (kJ/kg)
- e^{pt} = laju alir eksergi potensial (kJ/kg)

dimana $e^{kn} = e^{pt} = 0$, sehingga mengenai laju perpindahan eksergi sistem yaitu

$$\dot{E} = \dot{m} (e^{ph} + e^{ch}) \quad (3)$$

Sehingga:

$$\dot{E}^{ph} = \dot{m} [(h-h_0) - T_0 (s-s_0)] \quad (4)$$

Keterangan:

- \dot{E}^{ph} = laju eksergi (MW)
- \dot{m} = laju aliran massa (kg/s)
- h = entalpi sistem (kJ/kg)
- h_0 = entalpi lingkungan (kJ/kg)
- T_0 = temperatur lingkungan (K)
- S = entropi sistem (kJ/kg.K)
- S_0 = entropi lingkungan (kJ/kg.K)

Kerugian eksergi pada *combustor* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$I_c = \dot{m}_f (h_f - T_0 s_f) + \dot{m}_a (h_a - T_0 s_a) - \dot{m}_p (h_p - T_0 s_p) \quad (5)$$

Keterangan:

- I_c = destruksi eksergi *combustor* (MW)
- \dot{m}_f = laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
- h_f = entalpi bahan bakar (kJ/kg)
- s_f = entropi bahan bakar (kJ/kg.K)
- \dot{m}_a = temperatur udara (K)
- h_a = entropi udara (kJ/kg.K)
- s_a = entropi udara (kJ/kg.K)
- \dot{m}_p = temperatur *heat product* (K)
- h_p = entropi *heat product* (kJ/kg.K)
- s_p = entropi *heat product* (kJ/kg.K)

Sementara efisiensi eksergi pada *combustor* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\Psi_c = \frac{\dot{m}_p \varepsilon_p}{\dot{m}_f \varepsilon_f} = \frac{\dot{m}_p (h_p - T_0 s_p)}{\dot{m}_f (h_f - T_0 s_f)} \quad (6)$$

Keterangan:

- Ψ_c = efisiensi eksergi *combustor* (%)
 \dot{E}_p = laju eksergi *heat product* (MW)
 \dot{E}_f = laju eksergi bahan bakar (MW)

Kerugian eksergi pada *heat exchanger* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\dot{I}_H = \dot{m}_H(h_p - T_{0s_p}) - (h_g - T_{0s_g}) - \dot{m}_c(h_1 - T_{0s_1}) - (h_s - T_{0s_s}) \quad (7)$$

Keterangan:

- \dot{I}_H = destruksi eksergi *heat exchanger* (MW)
 \dot{m}_H = laju aliran massa *heat exchanger* (kg/s)
 \dot{m}_c = laju aliran massa *combustor* (kg/s)
 h_g = laju aliran massa *flue gas* (kg/s)
 s_g = entropi *flue gas* (kJ/kg.K)
 h_s = laju aliran massa *product steam* (kg/s)
 s_s = entropi *product steam* (kJ/kg.K)

Sementara efisiensi eksergi pada *heat exchanger* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\Psi_H = \frac{\dot{m}_c(\dot{E}_s - \dot{E}_f)}{\dot{m}_H(\dot{E}_p - \dot{E}_g)} \quad (8)$$

Keterangan:

- Ψ_c = efisiensi eksergi *heat exchanger* (%)
 \dot{E}_s = laju eksergi *product steam* (MW)
 \dot{E}_f = laju eksergi *feed water* (MW)
 \dot{E}_p = laju eksergi *heat product* (MW)
 \dot{E}_g = laju eksergi *flue gas* (MW)

Sehingga total kerugian eksergi pada boiler:

$$\dot{I}_X = \dot{I}_C + \dot{I}_H \quad (9)$$

Keterangan:

- \dot{I}_X = total kerugian eksergi *boiler* (MW)
 \dot{I}_C = kerugian eksergi *combustor* (MW)
 \dot{I}_H = kerugian eksergi *heat exchanger* (MW)

Total efisiensi eksergi pada boiler adalah:

$$\Psi_X = \frac{\dot{m}_c(\dot{E}_s - \dot{E}_f)}{\dot{m}_f \dot{E}_f} \quad (10)$$

Keterangan:

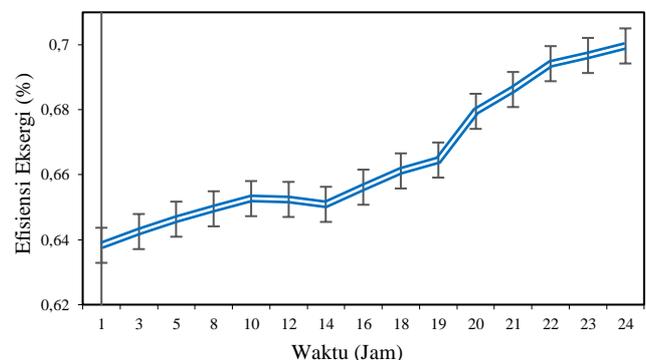
- Ψ_c = efisiensi eksergi *combustor* (%)
 \dot{E}_f = laju eksergi bahan bakar (MW)

3. Hasil dan Bahasan

3.1. Efisiensi Eksergi Total (Boiler)

Perhitungan efisiensi eksergi boiler dilakukan pada rentang waktu 24 jam dengan hasil persentase efisiensi eksergi *water tube boiler* berada pada kisaran 63% hingga 70%. Perhitungan efisiensi eksergi total boiler pada penelitian ini memperhitungkan keadaan temperatur lingkungan sekitar, berbeda dengan perhitungan efisiensi energi boiler yang tidak memperhitungkan kondisi temperatur lingkungan. Perhitungan efisiensi energi boiler mengacu standar *The*

American Society of Mechanical Engineers Performance Test Codes (ASME, 2008), berdasarkan literatur sumber jurnal (Wulandari & Basri, 2022) terdapat perbedaan antara persentase efisiensi energi dengan persentase efisiensi eksergi boiler yang disebabkan oleh kerusakan energi yang tidak dapat dimanfaatkan oleh adanya faktor irreversibilitas, sehingga tidak ada acuan khusus terkait standar nilai efisiensi eksergi pada penelitian ini, hanya menggunakan referensi dari jurnal ilmiah. Menurut literatur jurnal (Heroza & Pratoto, 2022) secara keseluruhan, efisiensi eksergi dapat menunjukkan nilai yang mendekati kondisi ideal dibandingkan dengan perhitungan efisiensi energi. Analisis efisiensi eksergi mampu mengetahui adanya kondisi abnormal dari kondisi ideal sehingga sangat membantu dalam proses optimasi peralatan.

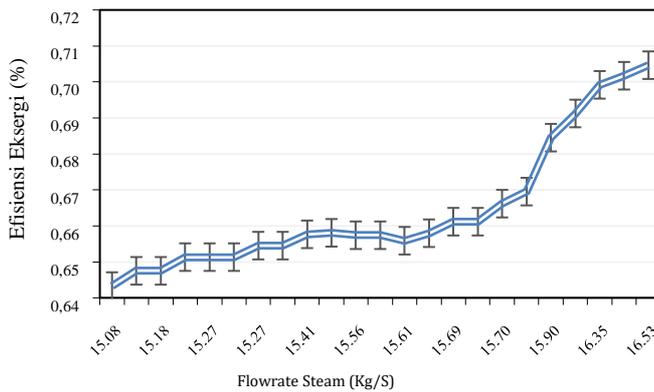


Gambar 1. Efisiensi Eksergi Total (Boiler)

Berdasarkan Gambar 1 menyatakan bahwa angka efisiensi eksergi terendah terjadi pada jam ke 1 sebesar 63.8%, kemudian mengalami kenaikan secara bertahap hingga pada jam ke 24 memiliki angka efisiensi eksergi total tertinggi sebesar 70%. Terdapat perubahan gradien nilai efisiensi eksergi pada waktu operasi pada jam ke 19 menuju jam ke 20. Hal ini dapat disebabkan karena adanya peningkatan *flowrate steam*. Parameter tekanan tidak memiliki pengaruh yang berarti terhadap kenaikan ataupun penurunan persentase angka efisiensi eksergi. Adapun perubahan temperatur lingkungan dapat mempengaruhi proses pembakaran pada *combustor* sehingga nilai eksergi *heat product* menjadi meningkat. Kenaikan nilai eksergi *heat product* ini juga akan mempengaruhi peningkatan produksi *steam*, namun perubahan temperatur lingkungan tidak akan mempengaruhi efisiensi eksergi boiler secara signifikan.

Berdasarkan Gambar 2 menunjukkan bahwa pengaruh laju aliran massa *steam* dapat mempengaruhi angka persentase angka efisiensi eksergi. Pada Gambar tersebut menjelaskan bahwa dengan laju aliran massa *steam* sebesar 16.53 kg/s memiliki persentase efisiensi eksergi sekitar 70%, sementara dengan laju aliran massa *steam* sebesar 15.08 kg/s, persentase efisiensi eksergi memiliki angka sekitar 64%, dimana angka ini merupakan angka efisiensi eksergi terendah. Efisiensi eksergi boiler pada literatur Jurnal (Nugroho et al., 2023) didapatkan juga peningkatan *trend*

dimana ketika semakin tinggi beban maka efisiensi eksergi pada boiler meningkat.



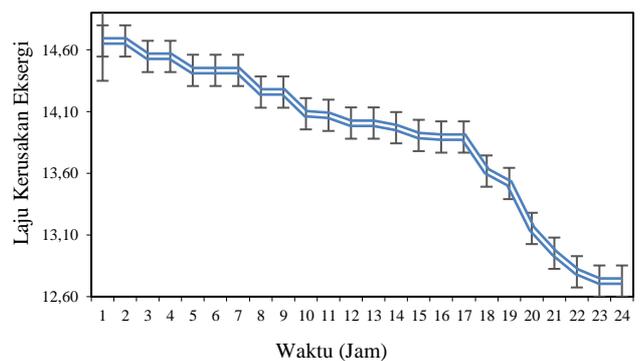
Gambar 2. Pengaruh *Flowrate Steam* terhadap Efisiensi Eksergi

Peningkatan efisiensi eksergi boiler penelitian ini karena bahan bakar digunakan secara maksimal sepenuhnya dalam proses konversi menjadi *steam* dan komponen pada *Combustor* dan *Heat exchanger* mampu beroperasi lebih efisien mendekati kondisi desain sehingga boiler beroperasi lebih stabil ketika pada kondisi beban tinggi. Selain itu temperatur air umpan boiler yang sudah dipanaskan terlebih dahulu dengan memanfaatkan *flue gas* pada *economizer* membuat hasil pembakaran semakin sempurna dikarenakan nilai entropi turun sementara nilai entalpi mengalami peningkatan. Temuan dari hasil penelitian ini memberikan wawasan terkait sejauh mana efisiensi eksergi pada boiler berubah dengan variasi *flowrate*, sehingga perlu diperhatikan dampak yang terjadi jika operasi boiler dilakukan pada kondisi beban rendah akan meningkatkan *heat loss* pada sistem sehingga efisiensi pada boiler akan berkurang signifikan.

3.2. Laju Kerusakan Eksergi Total Boiler

Gambar 3 menunjukkan bahwa angka laju kerusakan eksergi boiler terkecil yaitu sekitar 12.73 MW yang terdapat pada jam ke 23 dan jam ke 24, sementara angka laju kerusakan eksergi boiler tertinggi berlangsung di jam ke 1 dan jam ke 2 yaitu sekitar 14.67 MW. Rata – rata kerusakan eksergi boiler pada 1 hari atau 24 jam sekitar 13.90 MW. Besaran nilai rata - rata laju kerusakan eksergi *water tube boiler* ini sekitar 62% dari eksergi yang masuk yaitu 22.40 MW. Laju kerusakan eksergi pada literatur jurnal (Ahmad, 2022) didapatkan hasil laju kerusakan eksergi boiler sebesar 249.21 MW atau sekitar 89.13% dari total kerusakan eksergi sebesar 279.58 MW. Fenomena yang terjadi dengan temuan nilai tersebut, semakin tinggi laju alir maka laju kerusakan pada boiler mengalami penurunan, hal ini sebanding dengan adanya peningkatan efisiensi eksergi boiler. Tentunya laju kerusakan eksergi rata-rata sebesar 13.90 MW ini, sangat dipengaruhi oleh 2 komponen utama yaitu *combustor* dan *heat exchanger*. Dampak yang terjadi dari adanya peningkatan laju kerusakan eksergi ini adalah penurunan efisiensi eksergi boiler. Berdasarkan gambar tersebut terdapat perubahan gradien dengan penurunan laju kerusakan eksergi pada jam ke 17 yaitu sekitar 13.89 MW

menuju ke jam 18 yaitu sekitar 13.62 MW, hal ini dapat disebabkan karena adanya permintaan kenaikan *flowrate heat product steam* pada jam ke 18. Naik turunnya *flowrate steam* tergantung dari permintaan *user* pada unit *process*, yang tentunya hal ini akan sangat berpengaruh kepada laju kerusakan eksergi dan efisiensi eksergi boiler. Hal ini juga mengindikasikan ketika *flowrate steam* berada pada beban rendah akan mengakibatkan *heat loss* yang tinggi karena akan lebih banyak udara diperlukan untuk pembakaran bahan bakar, sehingga disarankan untuk operasi boiler berada pada beban tinggi atau *flowrate steam* yang tinggi sehingga tidak jauh dari kondisi desain boiler tersebut. Selain itu, dalam proses untuk menghindari laju kerusakan eksergi yang terjadi pada boiler perlu adanya tindakan *preventif* dan tindakan *curative* untuk mendukung dan menjamin kelangsungan peralatan agar boiler dapat beroperasi dengan baik. Pencatatan berupa logbook setiap kondisi operasi dapat menjadi dasar tindakan *preventif* dan tindakan *curative* yang perlu dilakukan sehingga dapat monitor dan evaluasi kinerja dari boiler tersebut. Penjelasan mengenai tindakan *preventif* dan tindakan *curative* tertuang pada seksi 3.7.



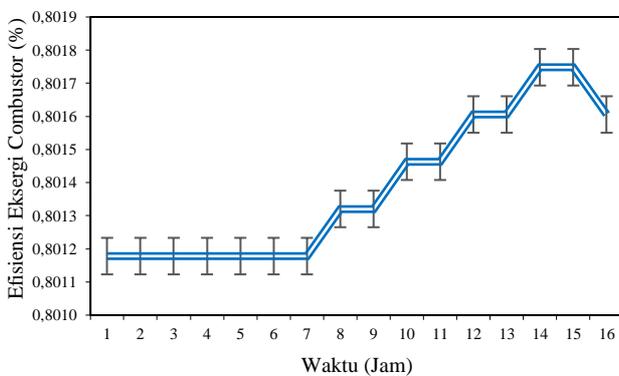
Gambar 3. Laju Kerusakan Eksergi Boiler

Laju kerusakan eksergi boiler yang tidak dapat ditangani dengan baik tentunya akan juga berdampak pada *lifetime* (sisa umur pakai) peralatan. Menurut literatur jurnal (Setiawan et al., 2021) prediksi *lifetime* perlu dilakukan untuk memberikan gambaran waktu sebuah peralatan boiler mengalami kegagalan, sehingga dapat diketahui kapan waktu proses perbaikan tanpa menghambat proses produksi sebuah *plant*. Berdasarkan literatur jurnal (Fadilah et al., 2018) performansi *water tube boiler* akan menurun seiring dengan lamanya *operating hours* sehingga tingkat laju kerusakan boiler pun akan meningkat. Menurut jurnal tersebut bahwa rata rata lama umur boiler dapat berfungsi optimal adalah saat pertama kali digunakan hingga mengalami kerusakan awal sekitar 12303 jam atau sekitar 17 bulan tanpa adanya program *preventive maintenance*.

3.3. Efisiensi Eksergi *Combustor*

Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa angka efisiensi eksergi tertinggi pada komponen *combustor* yaitu sekitar 80.17% pada jam ke 14 hingga jam ke 15. Sementara untuk angka efisiensi eksergi paling rendah berada di jam ke 1 sampai jam ke 7 sekitar 80.11%. Peningkatan dan penurunan

efisiensi eksergi *combustor* dapat disebabkan oleh udara berlebih. Berdasarkan literatur jurnal (MSK Tony Suryo; Eko Siswanto, 2015) diperoleh efisiensi eksergi *combustor* tertinggi sekitar 69.43% saat temperatur bahan bakar sekitar 362.15 K sedangkan pada saat temperatur bahan bakar sekitar 353.15 K diperoleh efisiensi eksergi *combustor* sekitar 353.15 K. Terdapat pengaruh perubahan temperatur terhadap efisiensi eksergi *combustor*. Bersumber data yang dipakai untuk perhitungan analisis ini, aspek yang memiliki pengaruh pada angka efisiensi eksergi komponen *combustor* adalah temperatur udara yang akan digunakan untuk proses pembakaran. Dampak ketika penurunan efisiensi terjadi akibat pembakaran yang tidak sempurna adalah terjadinya *fouling* pada komponen *heat exchanger*.

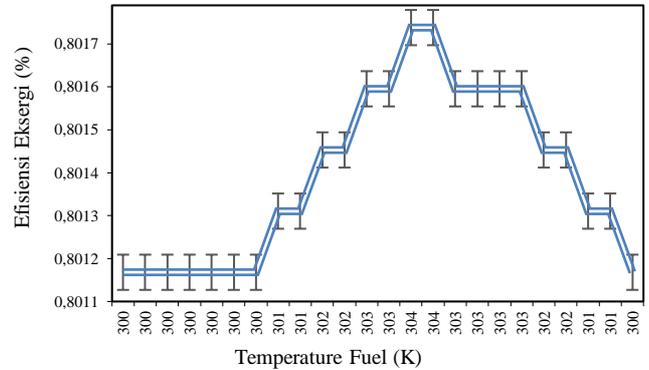


Gambar 4 Efisiensi Eksergi *Combustor*

Perhitungan pada subbab ini memberikan penjelasan bahwa analisis efisiensi eksergi dilakukan pemodelan terhadap variasi temperatur bahan bakar. Variasi temperatur bahan bakar dimulai dari 300.15 K hingga 304.15 K. Pengambilan data mengenai variasi temperatur ini memiliki tujuan untuk memberikan gambaran terkait pengaruh kepada laju kerusakan eksergi dan efisiensi eksergi *combustor*. Gambar 5 menunjukkan bahwa angka efisiensi eksergi *combustor* tertinggi yaitu sebesar 80.17% dan kondisi efisiensi eksergi *combustor* tertinggi ini terjadi saat temperatur sumber bahan bakar sekitar 304.15 K, sementara untuk angka efisiensi eksergi komponen *combustor* paling rendah sekitar 80.11% pada kondisi temperatur sumber bahan bakar sekitar 300.15 K. Hal ini memberikan fenomena bahwa semakin tinggi efisiensi eksergi pada *combustor* maka semakin baik pembakaran yang terjadi.

Fungsi temperatur memiliki pengaruh terhadap *trend* efisiensi eksergi meskipun tidak signifikan perubahannya. Pembakaran yang sempurna memerlukan kombinasi yang tepat antara *flowrate* bahan bakar, *flowrate* udara dan temperatur udara atau bahan bakar tersebut. Berdasarkan literatur jurnal (Rozi, 2014) semakin tinggi temperatur bahan bakar akan mempengaruhi efisiensi eksergi pada *combustor* yang mengalami peningkatan, sehingga dalam penelitian tersebut mengatakan bahwa untuk meningkatkan efisiensi termis 1% maka temperatur untuk pembakaran

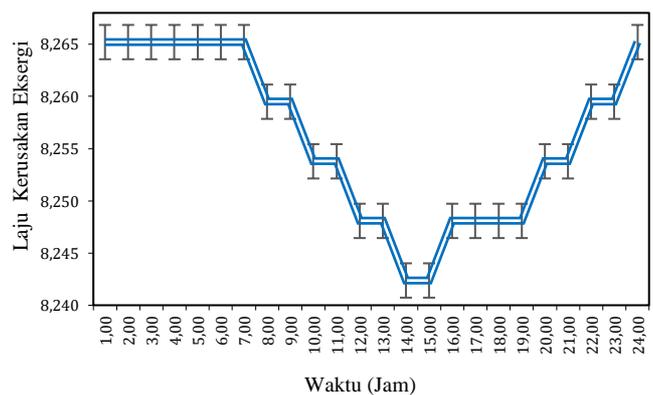
harus dinaikkan sekitar 20°C. Temperatur udara pembakaran rendah akan memiliki nilai entalpi yang rendah pula sehingga akan berdampak pada laju kerusakan eksergi yang meningkat.



Gambar 5. Pengaruh Temperatur Bahan Bakar terhadap Efisiensi Eksergi *Combustor*

3.4. Laju Kerusakan Eksergi Komponen *Combustor*

Gambar 6 menunjukkan bahwa angka laju kerusakan eksergi terendah *combustor* terjadi pada jam ke 14 dan ke 15 dengan angka sekitar 8.24 MW. Sementara angka laju kerusakan eksergi tertinggi *combustor* terjadi pada jam ke 24 dengan angka laju kerusakan sekitar 8.26 MW. Laju kerusakan eksergi *combustor* erat kaitannya dengan efisiensi eksergi boiler. Penelitian yang sama juga dilakukan oleh literatur jurnal (Regulagadda et al., 2010) dengan kerusakan eksergi maksimal pada boiler sekitar 12.66 KW.



Gambar 6 Laju Kerusakan Eksergi *Combustor*

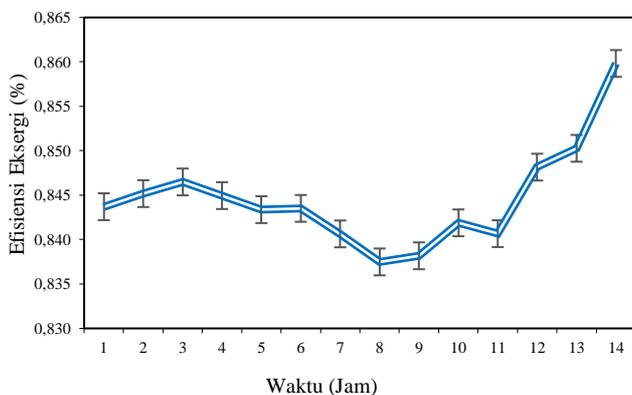
Fenomena yang terjadi adalah ketika semakin tinggi efisiensi *combustor* maka laju kerusakan eksergi akan mengalami penurunan, sehingga akan berdampak pada proses pembakaran yang lebih baik. Bersumber data yang digunakan untuk kalkulasi analisis ini, bahwa angka laju kerusakan sangat dipengaruhi oleh temperatur udara dan sumber energi (bahan bakar). Semakin tinggi angka temperatur maka akan semakin tinggi nilai entalpinya

sehingga semakin rendah angka laju kerusakan eksergi *combustor* dan begitu sebaliknya. Angka laju kerusakan eksergi juga dapat disebabkan adanya proses ireversibilitas pada pembakaran, kemudian terjadi ketidaksempurnaan pembakaran dan tidak secara keseluruhan adiabatik dalam prosesnya.

Beban kondisi operasi juga akan mempengaruhi kerusakan eksergi pada komponen *combustor*, hal ini perlu dipertimbangkan dikarenakan jika boiler ini beroperasi di beban yang rendah akan mengakibatkan *heat loss* yang tinggi. Peningkatan gas buang ini tentunya akan mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar, dimana bahan bakar ini akan rentan terhadap terbentuknya jelaga pada internal boiler secara keseluruhan sehingga akan berdampak pada laju perpindahan panas yang tidak efektif.

3.5. Efisiensi Eksergi *Heat Exchanger*

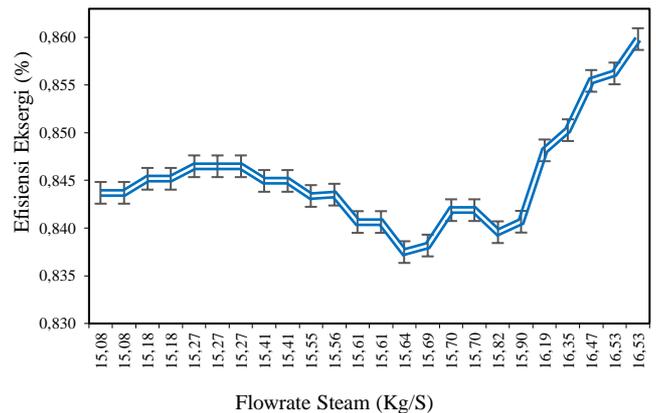
Berdasarkan Gambar 7 menyatakan bahwa angka efisiensi eksergi *heat exchanger* paling tinggi sekitar 86.0% pada waktu jam ke 24, sementara untuk angka efisiensi eksergi paling rendah berada pada waktu jam ke 12 dengan persentase sekitar 84.1%. Grafik diatas menunjukkan bahwa fenomena naik turunnya efisiensi eksergi pada komponen *Heat Exchanger* boiler sangat dipengaruhi oleh laju alir *steam* dan temperatur *steam*. Berdasarkan literatur jurnal (Tony Suryo Utomo et al., 2019) kondisi ideal efisiensi eksergi boiler sekitar 50.20% lebih besar dibandingkan dengan kondisi aktual efisiensi eksergi boiler sekitar 49.83%. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan kondisi operasi nilai temperatur dan *flowrate*, dimana dengan kondisi operasi mendekati kondisi desain akan memiliki nilai efisiensi yang lebih baik.



Gambar 7 Efisiensi Eksergi *Heat Exchanger*

Pada penelitian ini, kondisi *heat exchanger* boiler masih dalam kondisi baik dikarenakan efisiensi eksergi sebesar 80%. Pada kenyataannya sangat sulit untuk memperoleh efisiensi 100% akibat *heat loss* karena seiring lamanya penggunaan boiler tersebut. Berdasarkan literatur jurnal (Gumelar et al., 2022) turunnya efisiensi boiler dapat dikarenakan adanya kurang pemeliharaan atau tindakan *preventive maintenance* sehingga mengakibatkan timbulnya kerak pada aliran pipa di dalam komponen *heat exchanger* boiler tersebut. Pengukuran efisiensi boiler ini sangat diperlukan untuk menentukan performansi dari boiler

tersebut dalam kondisi baik atau diperlukan perawatan atau perbaikan. Selain temperatur dan *flowrate*, pengaruh lainnya dapat menyebabkan penurunan efisiensi boiler diantaranya yang disebutkan oleh literatur jurnal (Rahardja et al., 2022) yaitu kualitas bahan bakar dan kualitas air umpan. Uji laboratorium diperlukan untuk mengetahui sifat, kualitas dari bahan bakar dan air umpan tersebut sehingga memenuhi persyaratan dalam proses pembentukan *steam* pada boiler. Kegagalan boiler ini umum terjadi seperti halnya korosi, *fouling*, kebocoran pada tabung pendingin air, dinding boiler retak dan sebagainya.



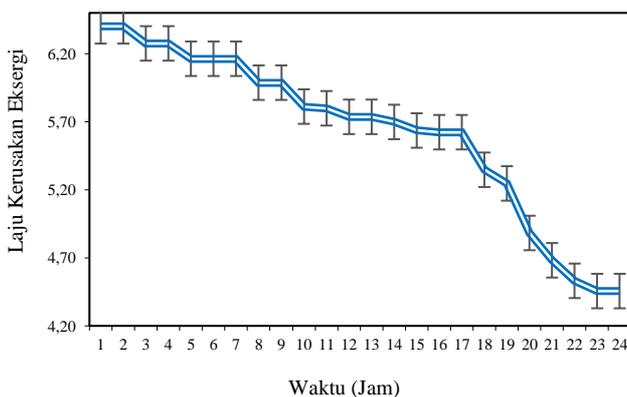
Gambar 8 Pengaruh *Flowrate Steam* terhadap Efisiensi Eksergi *Heat Exchanger*

Gambar 8 menunjukkan bahwa angka efisiensi eksergi *heat exchanger* tertinggi sekitar 86.0% dengan kondisi *flowrate steam* sebesar 16.53 kg/s, sementara angka efisiensi *heat exchanger* terendah sekitar 83.75% dengan kondisi *flowrate steam* sebesar 15.64 kg/s. Selain karena adanya perubahan *flowrate*, perubahan angka efisiensi eksergi *heat exchanger* juga dapat disebabkan karena adanya perubahan temperatur udara. Hal ini terlihat pada grafik, terdapat fluktuasi persentase pada *heat exchanger* meskipun tidak signifikan perubahan nilai efisiensinya. Berdasarkan literatur jurnal (Syalsabila et al., 2023) *flowrate steam* yang tidak stabil dan pemakaian bahan bakar yang berlebihan akan berdampak pada efisiensi boiler mengalami kondisi yang tidak optimal. Jurnal dari syalsabila diperoleh hasil ketika *flowrate steam* sebesar 38.78 T/hr maka efisiensi boiler sekitar 55.95%, sedangkan ketika *flowrate steam* sebesar 37.78 T/hr maka ada penurunan efisiensi boiler sekitar 36.29%. Peneliti lainnya (Megawati et al., 2023) melaporkan optimasi *flowrate* dan beban terhadap efisiensi turbin menyatakan bahwa semakin tinggi *flowrate* dan beban generator maka efisiensi akan semakin meningkat. Pada *flowrate* sebesar 34.31 kg/s dan beban generator sekitar 33.09 MW memiliki efisiensi sekitar 87.53% sedangkan pada *flowrate* sebesar 32.94 kg/s dan beban generator sekitar 28.09 MW memiliki efisiensi sekitar 77.39%. Berdasarkan laporan dari (Ika santiatma, 2017) penurunan efisiensi dapat ditandai dengan adanya indikasi kelebihan panas pada gas buang. Hal ini akan mengakibatkan pemborosan *heat product* yang akan berdampak pada nilai efisiensi boiler

tersebut. Kenaikan temperatur *flue gas* dapat disebabkan oleh perpindahan panas pada permukaan yang kurang dengan adanya kotoran atau *fouling* yang terdapat pada tubing – tubing *Heat Exchanger* bersumber dari bahan bakar atau air umpan boiler. Deposit kotoran pada boiler dengan menggunakan bahan bakar batu bara atau minyak lebih rentan terhadap kotoran pada permukaan internal boiler dibanding fuel gas.

3.6. Laju Kerusakan Eksergi *Heat Exchanger*

Berdasarkan Gambar 9 menunjukkan bahwa laju kerusakan eksergi *heat exchanger* terbesar yaitu terjadi pada jam ke 1 dengan angka sekitar 6.40 MW, sementara laju kerusakan eksergi *heat exchanger* terkecil sekitar 4.45 MW yang terjadi pada jam ke 24. Pada grafik juga menunjukkan adanya penurunan laju kerusakan eksergi yang signifikan pada jam ke 19 yaitu sekitar 5.24 MW menuju ke jam ke 20 yaitu sekitar 4.88 MW, kenaikan dan penurunan ini tentunya sangat dipengaruhi oleh *flowrate steam* dan temperatur *steam*. Observasi pada artikel ini, *heat product* dianggap merupakan hasil pembakaran sempurna. Meskipun, pembakaran tidak sempurna dapat terjadi di boiler, sehingga kerusakan eksergi sebenarnya yang terjadi lebih besar daripada perhitungan penelitian ini. Berdasarkan literatur jurnal (Kurniawati, 2018) terdapat pengaruh temperatur lingkungan dalam peningkatan laju kerusakan eksergi pada komponen mesin terutama pada boiler di PLTU Muara Jawa. Laju kerusakan eksergi diperoleh dari perbedaan besaran nilai eksergi yang masuk dengan nilai eksergi yang keluar, baik itu eksergi fisik (diperoleh dari sifat termodinamika) dan eksergi kimia (diperoleh dari molaritas aliran).



Gambar 9 Laju Kerusakan Eksergi *Heat Exchanger*

Kenaikan laju kerusakan eksergi ini disebabkan oleh semakin besar perbedaan nilai entropi antara sistem dan lingkungan sehingga irreversibilitas semakin meningkat. Menurut literatur jurnal (Sati et al., 2022) irreversibilitas merupakan banyaknya jumlah eksergi mengalami destruksi pada sistem atau adanya jumlah kerja potensial yang hilang, nilai irreversibilitas ini tidak digunakan kembali sehingga fenomena yang terjadi ketika efisiensi tinggi maka nilai

irreversibilitas tinggi begitu juga sebaliknya. Terdapat 3 (tiga) faktor irreversibilitas diantaranya adalah reaksi pada pembakaran, gesekan dan perpindahan panas menjadi penyebab utama besaran laju kerusakan eksergi.

3.7 Tindakan *preventive* dan *currative*

Penting untuk memastikan *water tube boiler* dalam kondisi optimal sehingga tindakan *preventive* dan tindakan *currative* diperlukan agar nilai efisiensi eksergi dan laju kerusakan eksergi boiler serta komponen lainnya tetap terjaga dan mencegah kerusakan yang tidak terduga sesuai uraian pada Tabel 4.

Tabel 4 Tindakan *Preventive* dan *Currrative*

No.	<i>Preventive</i>	<i>Currrative</i>
1	Hindari adanya udara berlebih untuk memastikan pembakaran api terjadi secara sempurna	Atur rasio supply udara ke burner sesuai spesifikasi boiler
2	Inspeksi komponen sistem pada boiler (Isolasi Termal, Ruang Bakar, Cek Fisik Boiler)	Penggantian isolasi termal yang mengalami kerusakan atau kebocoran
3	Hindari <i>blowdown</i> hanya dilakukan saat hasil tes air mengandung klorida tinggi	Lakukan <i>blowdown</i> secara reguler dengan waktu yang singkat (2 jam sekali sesuai aturan)
4	Perhatikan jelaga dari sisa pembakaran dapat menyebabkan pengurangan laju perpindahan panas	Pembersihan tabung boiler dan <i>economizer</i> secara rutin harus dilakukan

Berdasarkan tindakan *preventive* dan *currrative* pada Tabel 4 perlunya dilakukan *improvement* terhadap *water tube boiler* dengan urutan prioritas, diantaranya melakukan audit teknikal pada sistem boiler dengan melibatkan spesialis boiler (perencanaan *maintenance*), melakukan program perbaikan berdasarkan skala prioritas sesuai budget yang dimiliki dan evaluasi kinerja sebelum dan sesudah program *improvement* tersebut dilakukan. Menurut literatur jurnal (Pamungkas et al., 2021) tujuan utama dilakukan kegiatan atau program *maintenance* adalah untuk mempertahankan dan menjaga alat ataupun fasilitas *plant*, Menghindari adanya penyimpangan di luar kendali, Terjaga kualitas produk sesuai spesifikasi perusahaan, Menekan biaya *maintenance* yang berlebih, meningkatkan nilai keandalan komponen boiler di masa mendatang dan sebagainya. Pembuatan *maintenance schedule* yang cermat dan terencana sangat diperlukan agar tujuan utama *maintenance* bisa terlaksana. Terdapat dua (2) macam berdasarkan aktivitasnya yaitu *daily maintenance* (perawatan rutin) dan *periodic maintenance* (perawatan berkala setiap seminggu atau sebulan sekali).

4. Kesimpulan

Angka efisiensi eksergi total pada *water tube boiler* tertinggi yaitu sebesar 70%, dengan angka laju kerusakan terendah sebesar 12.73 MW. Angka efisiensi eksergi total paling rendah yaitu dengan persentase 64% dengan angka laju

kerusakan tertinggi sebesar 14.67 MW. Komponen *combustor*, dengan memvariasikan temperatur bahan bakar menghasilkan angka laju kerusakan eksergi terendah sekitar 8.24 MW dan angka efisiensi eksergi tertinggi *combustor* sekitar 80.17%, sementara angka laju kerusakan eksergi tertinggi sekitar 8.26 MW dan angka efisiensi terendah *combustor* sekitar 80.12%. Komponen *heat exchanger*, angka efisiensi eksergi tertinggi berada pada persentase 86% dengan laju kerusakan eksergi sekitar 4.45 MW. Sementara angka efisiensi eksergi terendah yaitu sekitar 83.75% dengan laju kerusakan eksergi sekitar 6.401 MW.

Daftar Pustaka

- Abuelnuor, A. A. A., Hassan Suliman, M. M., Abuelnour, M. A., Younis, O., & Mohamed, E. F. (2024). Exergy analysis of the boiler in phase 3 of the Khartoum North power plant. *Results in Engineering*, 21(February), 101919.
- Ahmad, R. V. N. A. (2022). Analisis Laju Kerusakan Eksergi dan Efisiensi Eksergi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Media Bina Ilmiah*, 17(1978), 263–270.
- ASME. (2008). ASME PTC 4-2008, Performance Test Codes (ASME (ed.); 2008th ed., Issue ASME).
- Cengel, Yunus A. Michael A. Boles, M. K. (2019). *Thermodynamics An Engineering Approach* (9th ed.). McGraw Hill Education.
- Chatib, O. C., Budiastira, I. W., Solahudin, M., Purwanto, Y. A., & Nelwan, L. O. (2023). Analisis Eksergoekonomi Sistem Penggilingan Padi Terintegrasi dengan Gasifier Exergoeconomic Analysis of Integrated Rice Mill Systems with Gasifiers. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 11(2), 128–137.
- Dharmakusuma, M. D. B. W. (2020). *Jurnal Mekanik Terapan Analisis Eksergi Pada Boiler PLTU. Jurnal Teknik Terapan*, 01(01), 45–53.
- Dila Aprilia. Hardjono. (2021). Penentuan efisiensi boiler dengan menggunakan metode langsung di pt x lumajang. *Jurnal Teknologi Separasi*, 7(9), 421–426.
- Elwardany, M. (2024). Enhancing steam boiler efficiency through comprehensive energy and exergy analysis: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 184(October 2023), 1222–1250.
- Fadilah, A. N., Aksioma, D. F., & Haryono. (2018). Optimasi Penentuan Waktu Optimum Pemeliharaan (Preventive Maintenance) Mesin. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 7(2), 40–45.
- Gumelar, G. P. A., Dewi, M. N., Miftah, A., Endranaka, W., & Eka, B. A. F. (2022). Analisis Efisiensi Boiler Berbahan Bakar Gas di PT XYZ Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung. *Technology of Renewable Energy and Development*, 2(1), 22–28.
- Hasudungan Baringbing, M., & Nazaruddin Sinaga, I. (2023). Analisis efisiensi *Water Tube Boiler* Menggunakan Metode Langsung di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk Porsea-Sumatera Utara. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 11(2), 49–68.
- Heroza, N., & Pratoto, A. (2022). Analisis Eksergi Pada Pembangkit Listrik yang Memanfaatkan Panas Buangan di PT Semen Padang. *Jurnal Teknik Undip*, 43(2), 131–139.
- Ika santiatma. (2017). *Pemodelan dan Analisa Boiler Menggunakan Kesetimbangan Massa dan Energi*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kurniawati, M. R. D. S. D. M. (2018). Analisis Efisiensi Energi, Efisiensi Eksergi dan Laju Kerusakan Eksergi pada Komponen Mesin PLTU Muara Jawa dengan Variasi Pembebanan. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, 22(1), 1–12.
- Lin, K. W., & Wu, H. W. (2023). Emissions and energy/exergy efficiency in an industrial boiler with biodiesel and other fuels. *Case Studies in Thermal Engineering*, 50(August), 103474.
- Megawati, E., Gantri Pirri, M., Ketut Warsa, I., Studi, P., Minyak, P., Gas, D., Tinggi, S., & Migas, T. (2023). Optimasi Flowrate dan Beban Generator Terhadap Efisiensi Turbin C60-8.883/535 di PLTU PT. XYZ Unit 3 Kapasitas 1x60 MW. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(2), 4502–4506.
- MSK Tony Suryo; Eko Siswanto. (2015). Analisa Efisiensi Exergi Boiler Wanson III Pada Unit Kilang di Pusat Pendidikan dan Pelatihan Minyak dan Gas Bumi (Pusdiklat Cepu). *Jurnal Teknik Mesin*, 3(2), 127–137.
- Nugroho, P. A., Fajar, B., & Yohana, E. (2023). Analisa Eksergi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap XYZ Kapasitas 1070 MW Menggunakan Pemodelan Cycle Tempo. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 11(3), 273–278.
- Pamungkas, I., Irawan, H. T., & Pandria, T. . A. (2021). Implementasi Preventive Maintenance Untuk Meningkatkan Keandalan Pada Komponen Kritis Boiler Di Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 2(2), 73–78.
- Pradipta Ahluriza; Berkah Fajar Tamtomo Kiono; MSK Tony Suryo. (2023). Analisis Energi dan Eksergi pada Siklus Rankine Organik Terintergerasi untuk Pemulihan Panas Limbah dari Sistem AC. *Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi & Teknik Elektronika*, 11(3), 567–580.
- Priyanto, P., & Wilastari, S. (2022). Faktor-Faktor Penyebab Menurunnya Kinerja Boiler Di PT Papertech Indonesia. *Majalah Ilmiah Gema Maritim*, 24(1), 60–66.
- Rahardja, I. B., Abinanda, E., & Siregar, A. L. (2022). *Water Tube Boiler* Pabrik Kelapa Sawit Kapasitas 45 Ton/Jam. *Jurnal Citra Widya Edukasi*, 14(1), 39–54.
- Regulagadda, P., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2010). Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses. *Applied Thermal Engineering*, 30(8–9), 970–976.
- Rozi, M. H. G. M. T. S. K. (2014). Analisa Efisiensi Exergi Boiler di PLTU Unit 3 PT. Indonesia Power Semarang - Jawa Tengah. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(1), 16–25.
- Saleh abdurrahman. (2017). *Outlook Energi Indonesia 2017*.

- Santoso, N. B. (2014). Pemanfaatan LNG Sebagai Sumber Energi di Indonesia. *Jurnal Rekayasa Proses*, 8(1), 33–39.
- Sarah, M. R. (2020). Analisis Eksergi dan Optimisasi Termoekonomi Pada Sistem Refrigerasi di Data Center Menggunakan Metode Algoritma Genetika. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2).
- Sati, A. L., Anugrah, R., & Safaruddin, S. (2022). Analisis Energi Dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln Rkc-2 Pt. Semen Baturaja. *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 1(04), 523–537.
- Setiawan, R., Fahriani, V. P., & Riyadi, S. (2021). Optimasi Umur Pakai dan Efektivitas Boiler Akibat Korosi Menggunakan Algoritma Particle Swarm. *Serambi Engineering*, VI(1), 1647–1654.
- Syalsabila, J., Hendradinata, Putri, F., Safe'i, Siproni, & HB, I. (2023). Analisis Efisiensi Thermal Boiler Tipe Circulation Fluidized BED Di PLTU 3x10MW. *Machinery Jurnal Teknologi Terapan*, 4(3), 159–166. <https://doi.org/doi.org/10.5281/zenodo.10122406>
- Tjoteng, A. A., Kamal, D. M., Belyamin, D., Terapan, M., Manufaktur, R. T., Mesin, J. T., & Jakarta, N. (2023). Analisis Eksergi Turbin Gas Setelah Overhaul Combustor Blok 4 Di PT. X. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, December 2022, 859–867. <http://prosiding.pnj.ac.id>
- Tony Suryo Utomo, M., Yohana, E., & Apriyanto, I. M. (2019). Exergy and Energy Analysis of a Steam Power Plant Unit 3 at Tanjung Jati B with a Capacity of 660 MW. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XVIII*, 9, 2.
- Wulandari, S., & Basri, H. (2022). Analisa Energi dan Eksergi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Buletin Poltanesa*, 23(1), 254–265.
- Yulia, F., Sinaga, G., Daris, M., Ra, K., Dzar, Z., & Tegar, I. (2022). Peningkatan Efisiensi Boiler Dalam Penghematan Energi dan Pengurangan Emisi Gas Buang : Teknikal Review. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XX*, 2015, 36–44.