Analisis Eksergi Pada Boiler PLTU

Muhamad Difa Dharmakusuma^{1*}, Belyamin¹, dan Widiyatmoko¹

¹ Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A Siwabessy, Kampus Baru UI Depok 16425

Abstrak

Boiler merupakan komponen utama pada PLTU yang berkontribusi paling banyak pada kerusakan eksergi pada sistem PLTU, sehingga peluang untuk meningkatkan efisiensi pada performa boiler menjadi besar. Analisis eksergi memiliki fungsi untuk mengidentifikasi penggunaan energi aktual yaitu energi yang terpakai dan energi yang terbuang secara aktual sebagaimana hasil dari proses ireversibel pada proses operasinya boiler. Pada penelitian ini, properti termodinamika dari aliran fluida ditentukan lalu peneliti menghitung efisiensi energi, efisiensi eksergi, dan kerusakan eksergi pada boiler dan komponennya, yaitu combustor dan heat exchanger. Efisiensi energi dan efisiensi eksergi boiler telah dihitung yaitu bernilai 96,88% dan 34,62%. Combustor dan heat exchanger memiliki kontribusi besar pada kerusakan eksergi / kerja yang hilang yang terjadi di sistem yaitu sebanyak 86,87 MW dan 31,56 MW. Boiler memiliki efisiensi yang tinggi dan kerusakan eksergi yang kecil ketika dioperasikan pada beban penuh.

Kata-kata kunci: Eksergi; Kerusakan Eksergi; Boiler

Abstract

Coal-fired boiler is the main component of coal-fired power plant which tremendously contributed on exergy destruction in coal-fired power plant system, then the opportunity to increase the efficiency of coal-fired boiler's performance is considerable. Exergy analysis can identify the real energy used that energy used and energy wasted actually as the result of irreversible processes on coal-fired boiler's operation. In this research, thermodynamic property of fluids is determined then researcher calculated energy efficiency, exergy efficiency, and exergy destruction of coal-fired boiler and its components, they are combustor and heat exchanger. It is calculated that the energy efficiency and exergy efficiency of boiler are found to be 96,88% and 34,62%. Combustor and heat exchanger are the major contributor on exergy destruction / wasted work of the system which contributed 86,87 MW and 31,56 MW. The potential to increase the efficiency of boiler can be done by decreasing the loses occuring in heat loss and flue gas. Boiler had high efficiency and low exergy destruction when it had been operated on full load.

Keywords: Exergy; Exergy Destruction, Boiler

1. PENDAHULUAN

Efisiensi boiler memiliki pengaruh besar terhadap penghematan energi. Efisiensi boiler dapat ditingkatkan dengan cara memaksimalkan perpindahan panas dan meminimalisir *heat loss* pada boiler. Untuk mengoptimalkan pengoperasian boiler, perlu dilakukan pengidentifikasian lokasi terjadinya *losses* pada

* Corresponding author E-mail address: di_fa016@yahoo.co.id

komponen *boiler* [1]. Analisis eksergi telah banyak dilakukan oleh para peneliti demi mengetahui penyebab dan terjadinya *loses* pada sistem [2]. Efisiensi *boiler* yang dilakukan mengacu pada *ASME Standard: PTC 4-1 Performance Test Code for Steam Generating Unit*.

Menurut jurnal penelitian Gurturk, pada *boiler* PLTU *cogeneration plant* yang menggunakan batu bara dan biomass dengan nilai kalor 5195 kcal/kg dan 2877 kcal/kg memiliki efisiensi energi 84,65%, efisiensi eksergi 29,43%, dan kerusakan eksergi 21789,4 kW [3]. Menurut jurnal penelitian Regulgadda, pada *boiler* PLTU 32 MW dengan nilai GCV batu bara 5253 kcal/kg didapatkan hasil efisiensi eksergi 25,4% dan kerusakan eksergi sebesar 73 kW [2]. Menurut jurnal penelitian Eskin, pada *boiler* PLTU tipe FBCC dengan nilai LHV batu bara 3726 didapatkan hasil efisiensi energi 49,4%, efisiensi eksergi 36,2% dan kerusakan eksergi sebesar 3639 kW [4].

Pada penelitian ini, metode perhitungan yang digunakan adalah metode perhitungan efisiensi *boiler* langsung (*direct method*) dan metode kerusakan eksergi. Pengambilan data dilakukan pada saat *boiler* beroperasi di beban penuh 28 MW menggunakan batu bara dengan nilai kalor 4054 kcal/kg.

2. METODE

Nomenklatur			
Ex	Eksergi (kJ/s)	Subskrip	
ex	Eksergi Spesifik (kJ/kg)	<i>in</i>	Sisi Masukan
$\dot{m}$	Aliran Massa (kg/s)	<i>out</i>	Sisi Keluaran
h	Entalpi (kJ/kg)	0	Referensi Lingkungan
T	Temperatur (K)	B	<i>Boiler</i>
s	Entropi (kJ/kgK)	C	<i>Combustor</i>
Cp	Spesific Heat Capacity (kJ/kgK)	HE	<i>Heat Exchanger</i>
GCV	<i>Gross Calorific Value</i> (kJ/kg)	A	<i>Air / udara</i>
LHV	<i>Low Heating Value</i> (kJ/kg)	F	<i>Fuel</i>
O	Fraksi Massa Oksigen (%)	p	<i>Hot Product</i>
M	Fraksi Massa <i>Moisture</i> (%)	S	<i>Steam</i>
A	Fraksi Massa <i>Ash</i> (%)	G	<i>Flue Gas</i>
n	Fraksi Massa Konstituen Kimia	i	Konstituen Kimia
η	Efisiensi Energi (%)		
ψ	Efisiensi Eksergi (%)		

Deskripsi Boiler

Boiler yang digunakan sebagai objek penelitian merupakan *boiler* PLTU unit kedua milik PLTU Makmur Sejahtera Wisesa 2 x 30 MW Kalimantan Selatan. Data spesifikasi *boiler* dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Spesifikasi Boiler

Data Spesifikasi Boiler	
Tekanan Uap Utama / Temperatur	86 Bar / 525 °C
Tekanan <i>Boiler Feed Water</i> / Temperatur	93 Bar / 160 °C
Bahan Bakar	Batu Bara Kalori Rendah
Kalori Batu Bara	3500 - 4200 kcal/kg
Konsumsi Batu Bara	26,3 Ton/h
Manufaktur	Bharat Heavy Electrical Ltd. (BHEL), India
Tipe Boiler	<i>Circulating Fluidized Bed Combustion, Water Tube Boiler</i>
Kapasitas	2 x 126 Ton/h
Tekanan Drum / Temperatur	91 Bar / 312 °C

Diagram alir *boiler* PLTU unit kedua milik PLTU Makmur Sejahtera Wisesa 2 x 30 MW Kalimantan Selatan dijelaskan pada Gambar 1.

Gambar 1 Skema Diagram *Combustor* dan *Heat Exchanger* Pada *Boiler*[5]

Pengambilan Data

Data yang digunakan untuk diolah merupakan data operasi PLTU MSW unit 1. Data yang dibutuhkan adalah tekanan (p), temperatur (T), aliran massa ($\dot{m}$), spesifikasi batu bara, dan proses di *boiler* PLTU.

Spesifikasi Batu Bara

Batu bara yang digunakan merupakan batu bara kalori rendah (*sub-bituminous*), spesifikasi batu bara didapat dari hasil uji laboratorium PT. Sucofindo yang dijelaskan pada tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Batu Bara

ULTYMATE ANALYSIS	%
Total Moisture	38.5
Moisture	15.4
Carbon	42.3
Hydrogen	3.4
Nitrogen	0.6
Oksigen	12.2
Sulfur	0.2
Ash	3.1
NILAI KALOR	kcal/kg
GCV	4054.0
HHV	4063.4
LHV	3801.6

Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian dijelaskan pada Gambar 2.

Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Eksergi Pada Aliran Massa

Eksergi yang mengalir pada aliran massa terdiri atas eksergi fisika, eksergi kinetik, eksergi potensial, dan eksergi kimia yang dijelaskan pada persamaan 1.

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

Pada penelitian ini, kondisi aliran dianggap tunak (*steady state condition*) sehingga eksergi potensial dan kinetik diabaikan. Persamaan eksergi untuk aliran massa dapat disederhanakan menjadi persamaan 2 dan persamaan 3[6].

$$Ex = Ex^{ph} + Ex^{ch} \quad (2)$$

$$Ex = \dot{m}(ex) = \dot{m}(ex^{ph} + ex^{ch}) \quad (3)$$

Eksergi Fisika

Eksergi fisika merupakan jumlah maksimal kerja yang dapat diperoleh ketika aliran massa suatu zat mengalir dari keadaan awal ke keadaan lingkungan oleh proses fisika terkait interaksi termal dengan lingkungan. Persamaan eksergi spesifik fisika dijelaskan pada persamaan 4[7].

$$ex^{ph} = h - T_0 s \quad (4)$$

Eksergi spesifik fisika gas ideal dijelaskan pada persamaan 5.

$$ex^{ph} = cp(T - T_0) - T_0 \left(cp \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (5)$$

Eksergi Kimia

Eksergi kimia merupakan jumlah maksimal kerja yang dapat diperoleh ketika suatu zat mengalir dari keadaan referensi lingkungan ke keadaan mati (*dead state*) oleh proses perpindahan panas dan perubahan zat.

Eksergi Spesifik Kimia Udara, air, dan steam

Persamaan eksergi kimia udara pada kondisi lingkungan dijelaskan pada persamaan 6.

$$ex^{ch} = \frac{\sum(n_i ex_i^{ch})}{Mr_i} \quad (6)$$

Nilai eksergi kimia zat - zat di atas berdasarkan tabel standar eksergi kimia[8].

Eksergi Spesifik Kimia Batu Bara

Persamaan eksergi kimia batu bara dijelaskan pada persamaan 7[9].

$$ex^{ch} = \left[1,009 + \frac{1,031O_{ar} + 0,116M_{ar}}{100 - (A_{ar} + M_{ar})} \right] LHV \quad (7)$$

Eksergi Spesifik Flue Gas

Persamaan eksergi dijelaskan pada persamaan 8.

$$ex_{FG} = c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] \quad (8)$$

Nilai spesifik panas *flue gas* (cp) menggunakan metode C. Coskun[10].

Persamaan Kerusakan Eksergi

Persamaan kerusakan eksergi (*exergy destruction*) dijelaskan pada persamaan 9.

$$E_D = \sum Ex_{in} - \sum Ex_{out} \quad (9)$$

Persamaan Efisiensi Energi Boiler

Persamaan efisiensi energi *boiler* metode langsung (*direct method*) mengacu pada standar *ASME Standard: PTC 4-1 Performance Test Code for Steam Generating Unit* dijelaskan pada persamaan 10.

$$\eta_B = \frac{m_w (h_s - h_w)}{m_F \cdot GCV} \quad (10)$$

Persamaan Efisiensi Eksergi Boiler

Persamaan efisiensi eksergi *boiler* dijelaskan pada persamaan 11.

$$\Psi_B = \frac{Ex_s - Ex_w}{Ex_F + Ex_A} \quad (11)$$

Model Persamaan Efisiensi Eksergi Boiler dan Komponennya

Model persamaan efisiensi eksergi *boiler* dan komponennya dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3 Pemodelan Efisiensi Eksergi *Boiler*

KOMPONEN	PERSAMAAN
COMBUSTOR	$\psi_C = E_{x,p} / E_{x,F}$
HEAT EXCHANGER	$\psi_{HE} = E_{x,S} - E_{x,W} / E_{x,P}$
BOILER	$\psi_B = E_{x,S} - E_{x,W} / E_{x,F} + E_{x,A}$

Model Persamaan Kerusakan Eksergi *Boiler* dan Komponennya

Model persamaan kerusakan eksergi *boiler* dan komponennya dijelaskan pada Tabel 4.

Tabel 4 Model Persamaan Kerusakan Eksergi *Boiler* dan Komponennya

KOMPONEN	PERSAMAAN
COMBUSTOR	$E_{D,C} = E_{x,A} + E_{x,F} - E_{x,p}$
HEAT EXCHANGER	$E_{D, HE} = E_{x,p} + E_{x,W} - E_{x,S}$
BOILER	$E_{D, B} = E_{D, C} + E_{D, HE}$

3. PEMBAHASAN

Berikut merupakan asumsi - asumsi yang diterapkan pada penelitian ini:

- Tekanan dan temperatur lingkungan (P_0 , T_0) yaitu 25°C dan 1 bar
- η_C dianggap 100% sehingga berlaku $m_F \cdot h_F + m_A \cdot h_A = m_P + h_P$
- Udara lingkungan dan udara pembakaran dianggap gas ideal
- Entropi batu bara dianggap 1 kJ/kgK[11]

Data operasi *boiler* dijelaskan pada Tabel 5.

Tabel 5 Data Operasi *Boiler*

DATA OPERASI BOILER	Parameter			Entalpi	Entropi
	m (kg/s)	p (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
<i>Feed Water</i>	30,74	95	153	650,64	1,86
<i>Hot Product</i>	39,30	-	860	2265,35	2,00
<i>Steam (Outlet)</i>	30,74	86	524	3452,00	6,76
<i>Exhaust Flue Gas</i>	39,30	-	150	194,05	2,13
<i>Air Combustion</i>	34,44	1.11	208	598,73	4,31
<i>Coal Flow</i>	5,22	-	-	17026,80	1,00

Kerusakan Eksergi Pada Komponen *Boiler*

Berikut adalah hasil perhitungan dari pemodelan persamaan pada tabel 3.

Gambar 3 Aliran Eksergi Pada *Combustor*

Pada gambar 3, sumber eksergi yaitu udara dan bahan bakar memiliki nilai eksergi sebesar 174,31 MW. Eksergi tersebut yang berhasil dikonversi menjadi *hot product* sebanyak 87,44 MW yang nantinya digunakan untuk proses perpindahan panas dan sisanya sebanyak 86,87 MW. Rugi-rugi eksergi yang disebabkan proses ireversibilitas pada pembakaran, ketidaksempurnaan pembakaran, dan proses yang tidak seluruhnya adiabatik. Pada penelitian ini *hot product* dianggap hasil dari pembakaran yang sempurna, sementara pada aktualnya pembakaran yang tidak sempurna dapat terjadi di *boiler* yang sehingga kerusakan eksergi yang terjadi secara aktual lebih besar dari pada yang ditampilkan pada perhitungan ini.

Gambar 4 Aliran Eksergi Pada *Heat Exchanger*

Pada gambar 4, sumber eksergi yaitu *hot product* dan *feed water* sebesar 91,89 MW. Distribusi eksergi yang terjadi adalah sebanyak 60,35 MW digunakan untuk proses perpindahan panas untuk *steam*, sebanyak 6,12 MW terbuang ke *flue gas*, dan sebanyak 25,42 MW rugi-rugi eksergi. Rugi-rugi akibat *heat loss* dapat disebabkan oleh *slagging* atau *fouling*. Rugi-rugi pada *flue gas* dapat disebabkan oleh temperatur yang terlalu tinggi ketika dibuang melalui *chimney*.

Pengaruh *Flow Steam* Terhadap Efisiensi Eksergi *Boiler*

Berdasarkan gambar 5, tinggi atau rendahnya efisiensi eksergi dapat dipengaruhi oleh aliran *steam*. Pada *flow* 18,4 kg/s efisiensi eksergi *boiler* bernilai 27,29%, pada *flow* 28,131 kg/s efisiensi eksergi *boiler* bernilai 31,7%, pada *flow* 29,63 kg/s efisiensi eksergi *boiler* bernilai 33,39%, dan pada *flow* 30,29 kg/s efisiensi eksergi *boiler* bernilai 34,62%. Rendahnya *flow steam* dapat terjadi karena pola pembebanan PLTU yang berganti-ganti pada operasinya. Pola pembebanan yang berganti-ganti dapat menyebabkan efisiensi eksergi *boiler* berkurang. Sebaiknya PLTU dioperasikan selalu pada beban penuh.

Gambar 5 Grafik Pengaruh *Flow Steam* Terhadap Efisiensi Eksergi

Pengaruh *Flow Steam* Terhadap Kerusakan Eksergi

Berdasarkan gambar 6, tinggi atau rendahnya kerusakan eksergi dapat dipengaruhi oleh aliran *steam*. Pada *flow* 18,4 kg/s kerusakan eksergi *boiler* bernilai 135,66 MW, pada *flow* 28,131 kg/s kerusakan eksergi *boiler* bernilai 120,9 MW, pada *flow* 29,63 kg/s kerusakan eksergi *boiler* bernilai 114,791 MW, dan pada *flow* 30,29 kg/s kerusakan eksergi *boiler* bernilai 112,29 MW. Rendahnya *flow steam* dapat terjadi karena pola pembebanan PLTU yang berganti-ganti pada operasinya. Pola pembebanan yang berganti-ganti dapat menyebabkan efisiensi eksergi *boiler* berkurang. Sebaiknya PLTU dioperasikan selalu pada beban penuh agar kerusakan eksergi yang terjadi pada *boiler* dapat dikurangi.

Gambar 6 Grafik Pengaruh *Flow Steam* Terhadap Kerusakan Eksergi

Efisiensi Energi dan Eksergi *Boiler*

Efisiensi energi pada *boiler* PLTU memiliki nilai 96,88 % dan efisiensi eksergi menunjukkan angka 34,62% yang dijelaskan pada gambar 5. Efisiensi eksergi bernilai lebih kecil dibandingkan dengan efisiensi energi dikarenakan efisiensi eksergi menggunakan referensi lingkungan dalam perhitungannya sedangkan efisiensi energi tidak.

Gambar 7 Grafik Efisiensi Energi dan Eksergi *Boiler* PLTU

4. KESIMPULAN

1. *Boiler* PLTU memiliki nilai efisiensi energi dan eksergi masing - masing 96,88% dan 34,62%.
2. Efisiensi eksergi bernilai lebih kecil dibandingkan efisiensi energi dikarenakan efisiensi eksergi memasukkan faktor lingkungan dalam perhitungannya sedangkan efisiensi energi tidak.
3. *Combustor* dan *heat exhcanger* memiliki kontribusi kerusakan eksergi yang besar yaitu masing - masing 86,87 MW dan 31,56 MW. Hal ini terjadi dikarenakan proses ireversibilitas pada pembakaran batu bara.
4. Eksergi yang terbuang pada *flue gas* sebesar 6,12 MW dikarenakan temperatur *flue gas* yang keluar masih besar.
5. Semakin besar *flow steam* yang mengalir pada *boiler* maka efisiensi eksergi dan kerusakan eksergi *boiler* akan berkurang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Makmur Sejahtera Wisesa (MSW) atas dukungannya pada penelitian ini.

REFERENSI

1. L. Pattanayak dan S. Kumar, *Use of Energy and Exergy Analysis in Coal Fired Boiler*, *International Journal of Multidisciplinary Science and Engineering* (2014).
2. P. Regulgadda, I. Dincer, dan G.F. Naterer, *Exergy Analysis of A Thermal Power Plant With Measured Boiler and Turbine Losses*, *Applied Thermal Engineering* (2010).
3. M. Gurturk dan H. F. Oztop, *Exergy Analysis of A Circulating Fluidized Bed Boiler Cogeneration Power Plant*, *Energy Conversion and Management* (2016).
4. N. Eskin, A. Gungor, dan K. Ozdemir, *Thermodynamic Analysis of A FBCC Steam Power Plant*, *Energy Conversion and Management* (2009).
5. R. Saidur, *Energy, Exergy, and Economic Analysis of Industrial Boiler*, *Energy Policy* (2009).
6. I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier, Waltham (2013).
7. T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Anchor Brendon, Essex: (1985).
8. I. S. Ertesvag, *Sensitivity of Chemical Exergy For Atmospheric Gases and Gaseous Fuels to Variations in Ambient Conditions*, *Energy Conversion and Management* (2007).
9. Q. Zhang, *Energy-Exergy Analysis and Energy Efficiency Improvement of Coal-Fired Industrial Boilers Based On Thermal Test Data*, *Applied Thermal Engineering* (2018).
10. C. Coskun, *A New Approach For Simplifying The Calculation of Flue Gas Specific Heat And Specific Exergy Value Depending On Fuel Composition*, *Energy* (2009).
11. S. Ikumi, *A Method of Estimating Entropies of Coals and Coal Liquids*, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* (1982).