ANALISIS *EXERGOECONOMIC BOILER* PPSDM MIGAS DENGAN TIPE *FIRE TUBE* DAN KAPASITAS 6 TON/JAM

Rahmat Widodo[1], Fanny Leestiana[1]

[1] Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi

ABSTRAK

Analisis sistem termal secara konservatif sering kali menggunakan prinsip-prinsip termodinamika yang menerapkan prinsip keseimbangan energi. Pada Hukum Kedua Termodinamika dikenal istilah *exergy*, yaitu potensi kerja yang dihasilkan ketika sistem tersebut berubah menjadi kondisi sesuai dengan lingkungan. *Exergy* dapat menunjukan inefisiensi melalui *exergy destruction* di dalam suatu sistem dan kerugian *exergy* yang ke luar sistem. Evaluasi suatu instalasi sistem termal yang menggabungkan nilai *exergy* dengan faktor keekonomian disebut dengan *exergoeconomic*. Penelitian ini, melakukan analisa *exergoeconomic* pada *boiler* di PPSDM Migas. Asumsi yang digunakan pada perhitungan teknis adalah komponen *exergy* potensial dan kinetik diabaikan, hanya menggunakan komponen *exergy* fisik yang berasal dari air, uap dan *blow down*, serta komponen *exergy* kimia yang bersumber dari udara, bahan bakar dan gas buang. Perhitungan dilakukan pada temperatur lingkungan lokasi *boiler* yaitu 23-36˚C. Sedangkan perhitungan keekonomian hanya dilakukan pada komponen bahan bakar, *investment cost* dan uap. Dengan asumsi tersebut diperoleh nilai efisiensi *exergy* tertinggi pada boiler PPSDM Migas pada temperature 23˚C yaitu 86,64% dengan nilai *exergy destruction* sebesar 237.120,32 kJ/jam. Sedangkan nilai efisiensi terendah didapatkan saat boiler beroperasi pada temperatur tertinggi yaitu 36 ˚C dengan nilai *exergy destruction* sebesar 441.904,06 kJ/jam. Dan nilai *exergy cost flow rate* uap yang didapatkan dari hasil perhitungan adalah 65,82 $/jam, hal ini memiliki arti bahwa untuk produksi *boiler* selama satu jam membutuhkan biaya $ 65,82.

Kata kunci: Boiler, Efisiensi, *Exergy*, *Exergoeconomic*

rahmat.widodo@esdm.go.id

1. Pendahuluan

Analisis perhitungan sebuah sistem termal secara konservatif pada umumnya menggunakan prinsip dari Hukum Pertama Termodinamika, dimana pada analisis tersebut diterapkan prinsip keseimbangan energi. Prinsip tersebut mempertimbangkan perhitungan dari laju aliran kalor, energi serta kerja mekanis. Prinsip analisis efisiensi pada metode ini adalah dengan memperhitungkan pemanfaatan energi keluar dan masuk yang berasal dari luar sistem. Hal ini menyebabkan metode ini tidak dapat menunjukan apakah energi yang masuk dalam sistem dimanfaatkan secara efisien di dalam sistem dan tidak menunjukan juga ada tidaknya kerugian secara internal [1].

Selain menggunakan prinsip Hukum Pertama Termodinamika, sebuah analisis sistem termal juga dapat menggunakan prinsip dari Hukum Kedua Termodinamika. Prinsip ini memperhatikan interaksi antara sebuah sistem dengan lingkungannya. Dimana jika sebuah sistem dan lingkungan memiliki tingkat kondisi termodinamika yang berbeda, maka sistem dan lingkungan akan mencapai kondisi kesetimbangan. Hukum Kedua Termodinami-

ka mengenalkan metode analisis sistem termal menggunakan *exergy*. Dengan *exergy* dapat menunjukan inefisiensi melalui *exergy destruction* di dalam suatu sistem dan kerugian *exergy* yang ke luar sistem.

Seperti yang sudah dijelaskan pada paragraf sebelumnya bahwa analisis sistem termal dengan menggunakan Hukum Kedua Termodinamika adalah dengan mempertimbangkan interaksi antara sebuah sistem dengan lingkungannya. Ketika suatu sistem memiliki tingkat kondisi termodinamika di atas kondisi lingkungan, akan mencapai kondisi yang sama dengan lingkungannya. Potensi kerja yang dihasilkan ketika sistem tersebut berubah menjadi kondisi sesuai dengan lingkungan yang disebut dengan *exergy*. *Exergy* dinyatakan sepenuhnya hancur apabila suatu sistem mencapai kesetimbangan secara spontan tanpa menghasilkan kerja sama sekali. Sehingga bisa disimpulkan bahwa *exergy destruction* adalah potensi *exergy* yang tidak menghasilkan kerja proses mencapai kesetimbangan.

Analisis *exergy* hampir sama dengan analisis kesetimbangan energi, dimana pada analisis ini menggabungkan antara kesetimbangan massa dan kalor [1]. Pada analisis, dipertingkatkan setiap nilai *exergy* yang masuk dan keluar sistem. Kemudian, untuk mengetahui nilai efisiensi *exergy,* dilakukan perbandingan antara nilai *exergy* yang dimanfaatkan dengan *exergy* yang masuk ke dalam sistem. Dari persamaan kesetimbangan *exergy* akan didapatkan nilai *exergy destruction* sehingga bisa diketahui seberapa besar nilai inefisiensi yang ada di dalam sistem tersebut.

Analisis *exergy* tidak hanya digunakan untuk analisis dari segi energi termal, tapi juga digunakan untuk analisis dari segi ekonomi. Metode analisis yang menggabungkan keekonomian dan *exergy* disebut dengan *exergoeconomic*. Analisis *exergoeconomic* adalah analisis yang mempertimbangkan nilai keekonomian dari setiap nilai *exergy* yang masuk dan keluar sistem, selain itu analisis ini juga mempertimbangkan komponen *capital investment*, biaya pengoperasian dan juga perawatan. Dari hasil analisis *exergoecomic* ini tidak hanya efisiensi dari segi energi termal suatu sistem termal, tetapi juga bisa didapatkan nilai keekonomian hasil proses sistem tersebut.

Analisis *exergoeconomic* sering digunakan untuk melakukan evaluasi sebuah sistem termal, salah satunya adalah *boiler*. Metode ini pernah digunakan pada suatu penelitian *power boiler* dengan dua kondisi berbeda yaitu pada kondisi *hybrid* (dengan *recovery boiler*) dan *singular* (tanpa *recovery boiler*), hasil penelitian menunjukan bahwa nilai *exergy destruction* meningkat untuk kedua kondisi ketika temperatur lingkungan meningkat [2]. Pada penelitian lain juga dilakukan analisis dari aspek energi, *exergy* dan lingkungan pada sistem *combined heat and power* (CHP) yang mencakup *steam generator*, *turbo generator* dan jaringan distribusi uap, hasil penelitian tersebut menunjukan bahwa nilai *exergy destruction* paling besar terjadi pada *boiler*, *steam pressure reduction stations* dan *turbo-generators* [3]. Penelitian lain juga melakukan analisis energi dan *exergy* pada *boiler* dengan hasilnya yang menunjukan bahwa tekanan desain yang meningkat, terutama pada unit super kritikal mengalami penurunan *exergy destruction* [4].

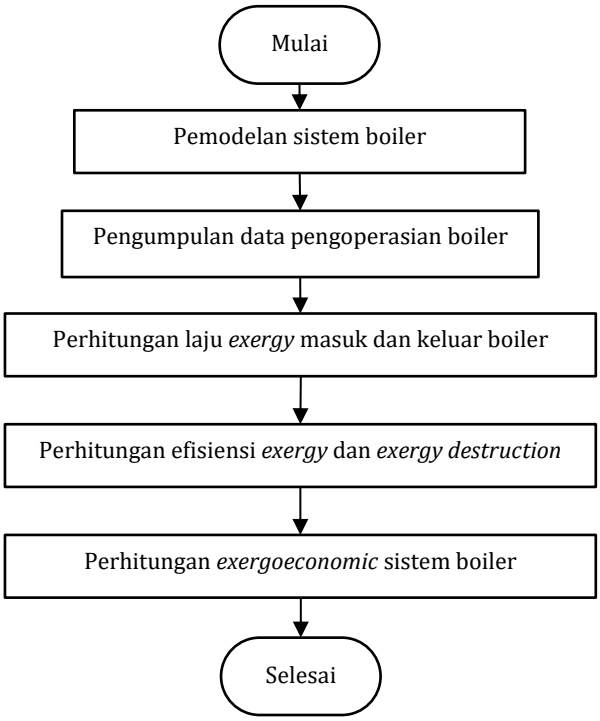
Pada penelitian ini dilakukan analisis *exergoeconomic* pada peralatan *boiler* PPSDM Migas. *Boiler* PPSDM Migas adalah *boiler* dengan jenis *fire tube* [5]. *Boiler* ini berfungsi untuk mendukung proses pengolahan minyak di kilang PPSDM Migas. Uap yang dihasilkan *boiler* ini berfungsi untuk proses pengolahan dan pengangkutan produk hasil pengolahan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis *exergoeconomic* pada pengoperasian *boiler* dalam rentang temperatur lingkungan yang bervariasi di lokasi *boiler* tersebut. Sehingga dari analisa tersebut nantinya akan didapatkan perbandingan *exergy destruction* dan nilai ekonomi dari uap yang dihasilkan dengan variasi temperatur lingkungan *boiler* tersebut.

2. Metode

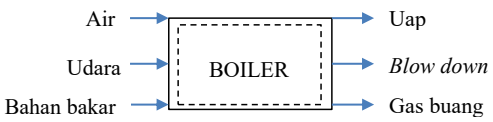
Metode pada penelitan ini adalah studi pustaka dan simulasi perhitungan sistem. Secara

garis besar tahapan metode penelitian yang dilakukan terdapat pada Gambar 1. tentang tahapan penelitian. Pada tahapan pertama dilakukan pemodelan sistem secara termodinamika pada *boiler*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui variabel masukan dan keluaran pada *boiler*. Kemudian langkah selanjutnya adalah pengumpulan data pengoperasian *boiler*. Tahapan ketiga adalah perhitungan laju *exergy* pada masing-masing variabel masukan dan keluaran pada *boiler*. Setelah itu dilakukan perhitungan nilai efisiensi dan *exergy destruction*. Kemudian pada tahapan akhir dilakukan perhitungan nilai *exergo-economic* pada sistem *boiler*.

Boiler dimodelkan sebagai sebuah sistem termodinamika yang memiliki 3 variabel masukan dan 3 variabel keluaran seperti pada Gambar 2 tentang pemodelan boiler. Variabel masukan pertama yaitu air yang berfungsi sebagai bahan baku yang diubah menjadi uap. Selain air, terdapat dua lagi variabel masukan, yaitu udara dan bahan bakar yang digunakan untuk reaksi pembakaran. Kemudian variabel keluarannya adalah uap yang dihasilkan, *blowdown* dan terakhir adalah gas buang hasil pembakaran.



Gambar 1. Tahapan Penyelesaian



Gambar 2 Pemodelan Boiler

Penelitian ini menggunakan *Boiler* PPSDM Migas sebagai objek studi kasus dalam perhitungan analisis *exergy*. Oleh karena itu, untuk melakukan tahapan analisis maka dilakukan pengumpulan data operasi pada *boiler* tersebut. Sehingga didapatkan data operasi input seperti pada Tabel 1 data input *boiler*. Sedangkan data output boiler terdapat pada Tabel 2.

Tabel 1 Data Input *Boiler* [6]

INPUT					
Air		**Udara**		**Bahan bakar**	
Temperatur	75 ˚C	*Mass flow*	3260,4 kg/jam	HHV	10579,6 kcal/kg
Tekanan	6 bar			*Mass flow*	169,4 kg/jam
Mass flow	3381 kg/jam				

Tabel 2 Data Output *Boiler* [6]

OUTPUT					
Uap		***Blowdown***		**Gas Buang**	
Temperatur	155 ˚C	Temperatur	90 ˚C	Temperatur	90 ˚C
Tekanan	4 bar	Tekanan	4 bar	*Mass flow*	3429,8 kg/jam
Mass flow	2537 kg/jam	*Mass flow*	844 kg/jam		

Exergy terdiri dari komponen potensial, kinetik, fisik dan kimia [7]. Seperti pada persamaan di bawah ini:

$$E_x = E_X^{PH} + E_X^{KN} + E_X^{PT} + E_X^{CH} \quad (1)$$

Simbol E_X^{PH} menunjukan nilai *exergy* fisik, E_X^{KN} menunjukan nilai *exergy* kinetik, E_X^{PT} menunjukan nilai *exergy* potensial dan E_X^{CH} menunjukan nilai *exergy* kimia. Pada analisis kali ini, komponen *exergy* potensial dan kinetik diabaikan karena untuk komponen potensial dan kinetik diasumsikan sama pada masukan dan keluaran. Sehingga yang dipertimbangkan untuk analisis kali ini adalah komponen *exergy* fisik yang berasal dari air, uap dan *blow down*. Sedangkan untuk komponen *exergy* kimia yang digunakan bersumber dari udara, bahan bakar dan gas buang.

Untuk *exergy* fisik yang dibawa oleh air, uap dan *blow down* dihitung menggunakan persamaan *exergy* berikut ini [1]:

$$\dot{E}_x = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (2)$$

Nilai enthalpy (h) dan enttropi (s) ditentukan berdasarkan tingkat kondisi termodinamika laju aliran yang masuk dan keluar sistem *boiler*. Sedangkan variabel dengan subskrip 0 ditentukan berdasarkan tingkat kondisi yang sama dengan kondisi lingkungan. *Exergy* kimia yang masuk ke dalam sistem *boiler* salah satunya adalah bahan bakar. Cara menentukan nilai *exergy* kimia yang dibawa oleh bahan bakar ditentukan menggunakan persamaan semi empirik di bawah ini [8]:

$$\dot{E}_x = \dot{m}.e_x \quad (3)$$

Dan persamaan berikut ini

$$e_x^{CH} = LHV(1{,}0401 + 0{,}1728\frac{x_H}{x_C} + 0{,}0432\frac{x_O}{x_C} + 0{,}2169\frac{x_S}{x_C}(1 - 2{,}0628\frac{x_H}{x_C}) \quad (4)$$

Variabel x menyatakan nilai fraksi kandungan pada bahan bakar tersebut. Untuk mengetahui kandungan pada bahan bakar tersebut dapat dilihat pada Tabel 3 tentang kandungan bahan bakar. Sehingga dapat dilakukan perhitungan nilai *exergy* bahan bakar. *Exergy* kimia yang dibawa oleh udara masuk ke dalam sistem *boiler* dapat ditentukan dengan menggunakan tabel referensi pada Tabel 4 tentang fraksi mol dan *exergy* kimia udara. Udara pada kondisi tersebut diasumsikan pada kondisi standard dengan tempetarur 293,15 K dan tekanan 1013 mbar sebagai kondisi referensi.

Tabel 3 Kandungan Bahan Bakar *Boiler*

Komposisi	Persentase
Karbon (C)	86,2
Hidrogen (H_2)	12,39
Sulfur (S)	0,39
Oksigen (O_2)	0,37
Nitrogen (N_2)	0,12
Air (H_2O)	0,43
Ash	0,1

Tabel 4 Fraksi Mol dan *Exergy* Kimia Udara [7]

Komponen	N_2	O_2	CO_2	H_2O
Fraksi mol (%)	77,48	20,59	0,03	1,9
Exergy Kimia (J/mol)	720	3970	19480	9500

Nilai *exergy* kimia yang di bawa gas buang dapat ditentukan dengan persamaan seperti berikut ini [9]:

$$e_x = c_p[(T - T_0) - T_0 ln\frac{T}{T_0}] \quad (5)$$

Pada persamaan tersebut nilai T merupakan nilai temperatur gas buang dan T_0 adalah nilai temperatur lingkungan. Sedangkan untuk nilai c_p atau nilai kalor spesifik dapat ditentukan dengan menggunakan metode Rosario-Messina melalui persamaan berikut ini [10] :

$$c_p(T) = \sum_{i=0}^{5} a_i \, (lnT^*)^i \text{ [J/(mol.K)]} \quad (6)$$

Dengan nilai $T^* = T/T_0$.

Setelah didapatkan nilai dari masing-masing exergy masuk dan keluar boiler, maka dapat dilakukan analisis exergy pada sistem boiler dengan menggunakan persamaan sebagai berikut ini [11]:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} e_{in} - \sum \dot{m}_{out} e_{out} - \dot{E}_D = 0 \quad (7)$$

Pada persamaan (7) akan didapatkan nilai *exergy destrucion* pada sistem *boiler*. Nilai tersebut menunjukan inefisiensi / kerugian yang terjadi secara internal dalam sistem tersebut.

Kemudian untuk mengetahui bagaimana nilai efisiensi *exergy* pada boiler dapat membandingkan nilai *exergy* output dengan nilai input seperti pada persamaan berikut ini [12]:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} \, x \, 100\% \quad (8)$$

Sedangkan untuk melakukan analisis *exergoeconomic* perlu ditambahkan aspek keekonomian dalam perhitungan sehingga tidak hanya menggunakan persamaan (7). Persamaan yang digunakan untuk melakukan analisis exergoeconomic adalah sebagai berikut [1]:

$$\dot{C}_S + \dot{C}_g = \dot{C}_f + \dot{C}_a + \dot{C}_{feedwater} + \dot{Z}_B \quad (9)$$

Subskrip $\dot{C}$ adalah *exergy cost flow rate*, dengan $\dot{C} = c.\dot{E}$, dengan c adalah *specific exergy cost*. $\dot{Z}_B$ adalah biaya modal serta operasi dan perawatan boiler. Untuk mendapatkan nilai $\dot{Z}_B$ pada penelitian kali ini dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut ini [1]:

$$\dot{Z}_B = Z_B CRF \frac{\varphi}{N3600} \text{ (\$/s)} \quad (10)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (11)$$

Subskrip i adalah interest rate dengan nilai 7% dan n adalah ekspektasi umur penggunaan boiler. Nilai Z_B adalah biaya pengadaan boiler dan N adalah jam pengoperasian

boiler setiap tahun. φ adalah nilai *maintenance factor* yaitu 1,06 dan CRF adalah *capital recovery factor*. Nilai Z_B dapat tentukan menggunakan persamaan berikut ini [1]:

$$Z_B = c_1(\dot{m}_b)^{c_2}\phi_p\phi_T\phi_\eta\phi_{SH/RH} \quad (12)$$

Dengan

$$\phi_p = exp\frac{p_s-\bar{p}_e}{c_3} \quad (13)$$

$$\phi_T = 1 + c_4 exp\frac{T_2-\bar{T}_e}{c_5} \quad (14)$$

$$\phi_\eta = 1 + (\frac{1-\bar{\eta}_B}{1-\eta_B})^{c_6} \quad (15)$$

$$\phi_\eta = 1 + \frac{T_S-T_{iSH}}{T_S} + \frac{\dot{m}_{RH}}{\dot{m}_b}\frac{T_{eRH}-T_{iRH}}{T_{eRH}} \quad (16)$$

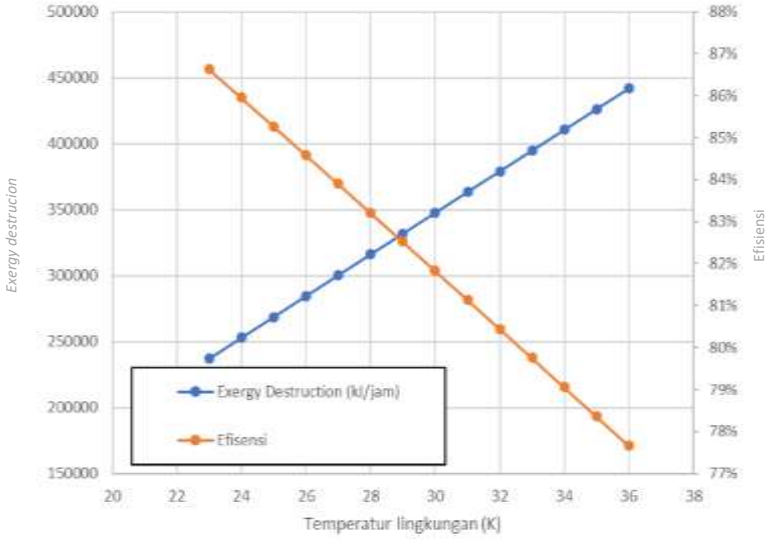
3. Hasil

Nilai perhitungan *exergy* dilakukan berdasarkan temperatur lingkungan pada lokasi *boiler*, dimana didapatkan bahwa temperatur lingkungan *boiler* berada pada rentang temperatur 23-36˚C. Sehingga didapatkan nilai *exergy* yang masuk dan keluar sesuai dengan Tabel 5 tentang perhitungan *exergy*. Berdasarkan data *exergy* di Tabel 5 kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (7) untuk nilai *exergy destruction* dan persamaan (8) untuk efisiensi *exergy* pada *boiler* dengan hasil seperti yang terlihat pada Gambar 3 tentang *exergy destruction* dan efisiensi *exergy*.

Dari hasil perhitungan data menggunakan persamaan (9) dan asumsi yang digunakan, maka didapatkan nilai *exergy cost flow rate* seperti yang tertera pada Tabel 6 tentang hasil perhitungan *exergy cost flow rate*.

Tabel 5 Hasil Perhitungan *Exergy*

T_O (K)	Udara (kJ/jam) (Persamaan 3 & Tabel 4)	Bahan Bakar (kJ/jam) (Persamaan 3 & 4)	Air (kJ/jam) (Persamaan 2)	Uap (kJ/jam) (Persamaan 2)	Blow Down (kJ/jam) (Persamaan 2)	Flue Gas (kJ/jam) (Persamaan 3 & 6)
23	177.786,42	1.910.137,61	58.338,48	1.859.431,10	23.507,76	26.203,33
24	177.786,42	1.910.137,61	56.078,28	1.842.868,89	22.794,16	25.379,68
25	177.786,42	1.910.137,61	53.778,86	1.826.277,26	22.070,77	24.570,79
26	177.786,42	1.910.137,61	51.607,92	1.809.782,02	21.379,45	23.776,58
27	177.786,42	1.910.137,61	49.531,65	1.793.357,83	20.711,76	22.996,96
28	177.786,42	1.910.137,61	47.448,28	1.776.928,30	20.042,30	22.231,83
29	177.786,42	1.910.137,61	45.356,79	1.760.492,69	19.370,81	21.481,11
30	177.786,42	1.910.137,61	43.358,62	1.744.127,10	18.722,62	20.744,73
31	177.786,42	1.910.137,61	41.453,76	1.727.831,53	18.097,72	20.022,58
32	177.786,42	1.910.137,61	39.539,10	1.711.528,60	17.470,38	19.314,59
33	177.786,42	1.910.137,61	37.717,08	1.695.295,19	16.866,16	18.620,67
34	177.786,42	1.910.137,61	35.917,72	1.679.078,77	16.267,59	17.940,75
35	177.786,42	1.910.137,61	34.176,50	1.662.905,99	15.683,55	17.274,74
36	177.786,42	1.910.137,61	32.422,78	1.646.723,82	15.096,37	16.622,55



Gambar 3 *Exergy Destruction* dan Efisiensi *Exergy*

Tabel 6 Hasil Perhitungan *Exergy Cost Flow Rate*

Cost Investment ($/jam)	*Fuel* ($/jam)	Uap ($/jam)
6,33	59,49	65,82

4. Pembahasan

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada Tabel 5 tentang hasil perhitungan *exergy* menunjukan bahwa nilai *exergy* yang dihasilkan pada uap menurun ketika nilai temperatur ruangan meningkat. Meningkatnya nilai temperatur tersebut juga diikuti dengan menurunnya nilai efisiensi *exergy boiler* tersebut seperti yang ada pada Gambar 3. Penurunan nilai efisiensi tersebut dikarenakan semakin naiknya nilai *exergy destruction* ketika terjadi peningkatan temperatur lingkungan.

Nilai efisiensi pada boiler menurun seiring dengan peningkatan temperatur lingkungan boiler. Nilai efisiensi didapatkan ketika *boiler* beroperasi pada temperature yang paling rendah yaitu 23˚C. Gambar 3 menunjukan nilai efisiensi pada temperatur tersebut adalah 86,64% dengan nilai *exergy destruction* sebesar 237.120,32 kJ/jam. Sedangkan nilai efisiensi terendah didapatkan ketika *boiler* beroperasi pada temperatur tertinggi, yaitu 36 °C, dengan nilai *exergy destruction* sebesar 441.904,06 kJ/jam.

Salah satu cara meningkatkan efisiensi *exergy boiler* adalah dengan mengurangi jumlah *blowdown*. Pengurangan *blowdown* dapat dilakukan dengan cara menurunkan nilai *Total Dissolved Solid* (TDS) menggunakan peralatan seperti *Reverse Osmosis* dan perbaikan kinerja pada *softener* [13]. *Exergy destruction* menunjukkan nilai ketidakteraturan pada proses yang terjadi. Hasil perhitungan nilai *exergy destruction boiler* menunjukkan bahwa nilainya meningkat ketika nilai temperatur lingkungan *boiler* meningkat. Hal ini dapat diakibatkan karena tingginya temperatur *dead state*.

Hasil simulasi perhitungan nilai keekonomian *boiler* terdapat pada Tabel 6 tentang hasil perhitungan *exergy cost flow rate*. Hasil perhitungan menunjukan bahwa nilai *exergy cost flow rate* uap adalah 65,82 $/jam. Nilai tersebut memiliki arti bahwa dari segi keekonomian, untuk menghasilkan uap dalam waktu satu jam dibutuhkan biaya sebesar $ 65,82. Nilai ini tidak terpengaruh oleh temperatur karena yang menjadi komponen perhitungan hanya nilai konsumsi bahan bakar dan nilai *cost investment* yang tidak ter-

pengaruh oleh nilai temperatur lingkungan. Peningkatan ini menyebabkan semakin sedikitnya potensi kerja yang dapat dimanfaatkan.

5. Kesimpulan

Simpulan dari hasil penelitian ini adalah nilai efisiensi *exergy* pada *boiler* PPSDM Migas memiliki nilai efisiensi tertinggi pada temperatur 23˚C yaitu 86,64% dengan nilai *exergy destruction* sebesar 237.120,32 kJ/jam. Sedangkan nilai efisiensi terendah didapatkan ketika *boiler* beroperasi pada temperatur tertinggi, yaitu 36 °C, dengan nilai *exergy destruction* sebesar 441.904,06 kJ/jam. Nilai *exergy cost flow rate* uap yang didapatkan dari hasil perhitungan adalah 65,82 $/jam, hal ini memiliki arti bahwa untuk produksi *boiler* selama satu jam membutuhkan biaya $ 65,82.

Daftar Pustaka

[1] D. Mitrovic, B. Stojanovic, J. Janevski, M. Ignjatovic, and G. Vuckovic, "Exergy and exergoeconomic analysis of a steam boiler," Thermal Science, vol. 22, no. Suppl. 5, pp. 1601–1612, 2018, doi: 10.2298/TSCI18S5601M.

[2] A. Abdelsamee, R. Ali, and H. Maghrabie, "Exergoeconomic Improvement of Power Boiler in Paper Industry at Different Operating Modes," SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications, vol. 3, no. 2, pp. 1–10, Dec. 2022, doi: 10.21608/svusrc.2022.138251.1051.

[3] G. Ahmadi, D. Toghraie, and O. Akbari, "Energy, exergy and environmental (3E) analysis of the existing CHP system in a petrochemical plant," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 99, pp. 234–242, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.10.009.

[4] M. Elwardany, "Enhancing steam boiler efficiency through comprehensive energy and exergy analysis: A review," Process Safety and Environmental Protection, vol. 184, pp. 1222–1250, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.01.102.

[5] A. Sugiharto, "Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api," Majalah Ilmiah Swara Patra, vol. 10, no. 2, pp. 51–57, Nov. 2020, doi: 10.37525/sp/2020-2/260.

[6] S. Winarto, "PERBANDINGAN EFISIENSI PADA BOILER II TWA PPSDM MIGAS MENGGUNAKAN METODE LANGSUNG DAN TIDAK LANGSUNG PERIODE BULAN MARET 2023," Jurnal Nasional Pengelolaan Energi MigasZoom, vol. 5, no. 2, pp. 167–174, Nov. 2023, doi: 10.37525/mz/2023-2/549.

[7] S. Sarıkoç, İ. Örs, and S. Ünalan, "An experimental study on energy-exergy analysis and sustainability index in a diesel engine with direct injection diesel-biodiesel-butanol fuel blends," Fuel, vol. 268, p. 117321, May 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117321.

[8] J. A. M. da Silva, V. Seifert, V. O. B. de Morais, A. Tsolakis, J. Herreros, and E. Torres, "Exergy evaluation and ORC use as an alternative for efficiency improvement in a CI-engine power plant," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 30, pp. 216–223, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.seta.2018.10.007.

[9] P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Exergy, exergoeconomic and environmental analyses and evolutionary algorithm based multi-objective optimization of combined cycle power plants," Energy, vol. 36, no. 10, pp. 5886–5898, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.08.034.

[10] L. Rosario and M. Michele, "Thermodynamic Property Models for Unburned Mixtures and Combustion Gases," International Journal of Thermodynamics, 2006.

[11] O. Özkaraca and A. Keçebaş, "Performance analysis and optimization for maximum exergy efficiency of a geothermal power plant using gravitational search algorithm," Energy Convers Manag, vol. 185, pp. 155–168, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.100.

[12] M. Hashemi, F. Pourfayaz, and M. Mehrpooya, "Energy, exergy, exergoeconomic and sensitivity analyses of modified Claus process in a gas refinery sulfur recovery unit," J Clean Prod, vol. 220, pp. 1071–1087, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.213.

[13] Soegianto, "Perhitungan Kalkulasi Blowdown Pada Boiler Pipa Api PPSDM MIGAS," Majalah Ilmiah Swara Patra, vol. 12, no. 1, Apr. 2022, doi: 10.37525/sp/2022-1/325.