

ANALISA EFISIENSI EXERGI *BOILER* DI PLTU UNIT 3 PT. INDONESIA POWER SEMARANG – JAWA TENGAH

*Musanta H. Ginting¹, MSK. Tony Suryo U.², Khoiri Rozi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: musanta_ginting90@yahoo.com

ABSTRACT

In this paper, thermodynamic analysis in boiler which placed in Steam Power Plant (PLTU) Unit 3 UBP Semarang and has 200 MW capacities is presented. Thermodynamic analysis used in this paper is exergy analysis. Exergy analysis has function to identify the used of real energy or the quality result of the actual energy consumption and the real lost of energy as result from irreversible process. Exergy can have destruction from irreversible processes and the heat movement to environment. Boiler is the biggest source of exergy destruction in a Steam Power Plant's system, so there is a big opportunity to increase the efficiency in performance. Therefore the bigger efficiency in boiler's performance, the lower production cost for fuel consumption in industry. The average score of exergy efficiency and energy efficiency in boiler are each 71, 84% and 72, 40%. Research has resulted that heat exchanger gives the biggest contribution to the exergy destruction's rate, that is 12, 02 % and combustor also gives contribution to the exergy destruction's rate in the amount of 8,45 %. Therefore the total of exergy destruction's rate in boiler is 83,771 MW from the entry exergy which is 409, 3061 MW. Other important point is the air temperature. It has become factor which affects the score of exergy destruction rate and exergy efficiency in combustor, while steam mass flow rate and generator output power are factors which influence the score variation of efficiency of total exergy, efficiency of total energy, the rate of total destruction, efficiency of heat exchanger exergy and the destruction of heat exchanger exergy rate.

Keywords: boiler, exergy destruction, energy, exergy

1. PENDAHULUAN

Dalam dunia industri, sumber energi yang paling mendominasi untuk *power plant* adalah minyak bumi, gas alam, dan batu bara. Kebutuhan energi yang besar tersebut berdampak pada semakin berkurangnya cadangan sumber energi di dunia, sedangkan kebutuhan energi nasional dan dunia semakin meningkat. Akibatnya, terjadinya kenaikan harga energi yang akan berdampak terhadap peningkatan biaya produksi suatu industri.

Komponen – komponen utama yang terdapat di sistem *power plant* terdiri dari *boiler*, turbin, kondensator dan pompa. Namun, pada penelitian ini hanya mengkaji mengenai komponen *boiler*. *Boiler* atau ketel uap berbahan bakar fosil adalah bejana tertutup atau *vessel* yang berfungsi untuk mengkonversikan energi kimia dari bahan bakar fosil menjadi energi kalor atau panas. Untuk meningkatkan pemanfaatan energi secara lebih efisien dan menekan peningkatan biaya produksi terhadap konsumsi bahan bakar suatu industri maka kajian mengenai peningkatan performansi di *boiler* merupakan aspek penting karena berkontribusi terhadap penggunaan bahan bakar.

Kebanyakan dari pembelajaran mengenai peningkatan performansi *boiler* atau komponen lainnya di *power plant* dan rancangan dari mesin – mesin pembangkit saat ini berdasarkan berdasarkan hukum pertama termodinamika yaitu terkait dengan analisa energi [1]. Namun, penggunaan energi dan kehilangan

energi sebenarnya tidak dapat diidentifikasi menggunakan hukum pertama termodinamika karena analisa energi hanya memberikan hasil kuantitas terhadap konsumsi energi aktual. Untuk mengidentifikasi penggunaan energi sebenarnya atau hasil kualitas terhadap konsumsi energi aktual dan kehilangan energi sebenarnya digunakan hukum kedua termodinamika yang terkait dengan analisa exergi [1]. Exergi adalah potensi kerja maksimum teoritis yang mampu diperoleh saat sistem kombinasi berinteraksi dalam mencapai kesetimbangan [2], atau juga dapat diartikan sebagai potensial kerja atau kualitas dari berbagai bentuk energi dalam kaitannya dengan lingkungan tertentu [3].

Banyak pengkajian telah dilakukan mengenai analisis exergi pada mesin-mesin kalor, pada khususnya yaitu *boiler*. Pertama, penelitian mengenai ilustrasi energi dan exergi di PLTU dilakukan oleh Rosen dan Scott [4]. Hasil yang diperoleh adalah efisiensi energi lebih besar dibandingkan dengan efisiensi exergi pada *boiler*, yang mana masing-masing bernilai 95% dan 50% sehingga dapat ditunjukkan bahwa masih adanya kesempatan untuk meningkatkan efisiensi exergi dengan mengurangi sumber exergi dari sumber daya yang disediakan (mencocokkan penyediaan exergi sesuai permintaan), menggunakan alat untuk meningkatkan efisiensi exergi,

meningkatkan temperatur produk panas terkirim, dan pemanfaatan limbah panas untuk kebutuhan proses.

Kedua, penelitian yang bertujuan untuk menganalisa komponen-komponen sistem secara terpisah agar diperoleh lokasi dari kehilangan energi dan exergi terbesar, dilakukan oleh Aljundi [5]. Hasil yang diperoleh adalah destruksi exergi terbesar (77%) terjadi di bagian *combustion chamber* di *boiler* pada saat efisiensi exerginya 43.8%. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Rasad & Maihy [6], dimana analisis energi dan exergi dilakukan pada muatan yang berbeda (100%, 75% dan 50%). Hasil yang diperoleh adalah kehilangan energi terbesar terjadi di kondensor, destruksi exergi yang paling mendominasi dari keseluruhan terjadi di turbin, dan efisiensi exergi keseluruhan sistem berkisar 45% - 49% untuk muatan yang berbeda. Penelitian yang dilakukan Saidur dkk. [7] menyimpulkan hal yang sama dengan kesimpulan Aljundi [5], dimana *combustion chamber* dan *heat exchanger* merupakan kontributor utama yang menyebabkan destruksi exergi terbesar sehingga menyebabkan kehilangan energi terbesar.

Penelitian yang dilakukan Regulagadda [8] didasarkan pada kondisi operasi yang berbeda-beda, termasuk tekanan operasi yang berbeda, temperatur dan laju aliran, sehingga diperoleh parameter-parameter yang memaksimalkan performansi. Kesimpulan yang dihasilkan adalah efisiensi energi dan exergi pada *power plant* masing-masing adalah 30.12% dan 25.38%, dan exergi destruksi terbesar terjadi di *boiler*. Reddy dkk. [9] melakukan penelitian yang menjelaskan prosedur analisis pada pembangkit termal dengan *exegetical approach*. hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa metode optimisasi exergi merupakan solusi yang logis untuk memperbaiki produksi tenaga pada pembangkit termal.

Ehsan & Yilmazoglu [10] melakukan penelitian mengenai analisis exergi pada pembangkit termal, pemeriksaan efek dari temperatur ambient terhadap efisiensi exergi dan perhitungan emisi CO₂ pada macam-macam tipe *lignite*. Hasil yang diperoleh adalah efisiensi energi dan exergi masing-masing adalah 37.1% dan 34.84%. Selain itu, sumber utama *destruction exergy* terjadi di *boiler*. Poin penting lainnya, konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ pembangkit termal mengalami peningkatan terhadap kenaikan temperatur ambient.

Berdasarkan penjelasan diatas mengenai peningkatan performansi dengan analisa exergi, maka penelitian ini bertujuan untuk menentukan efisiensi exergi total, efisiensi energi total dan laju destruksi exergi total *boiler*. Kemudian membandingkan antara efisiensi exergi total dengan efisiensi energi total, menentukan efisiensi exergi dan mengevaluasi laju destruksi exergi di *combustor* dan *heat exchanger*. Apabila nilai exergi dan laju destruksi exergi total *boiler* dan kedua komponen diketahui, maka aliran exergi total *boiler* dapat dideskripsikan dengan menggunakan diagram Grassman.

2. METODE PENELITIAN

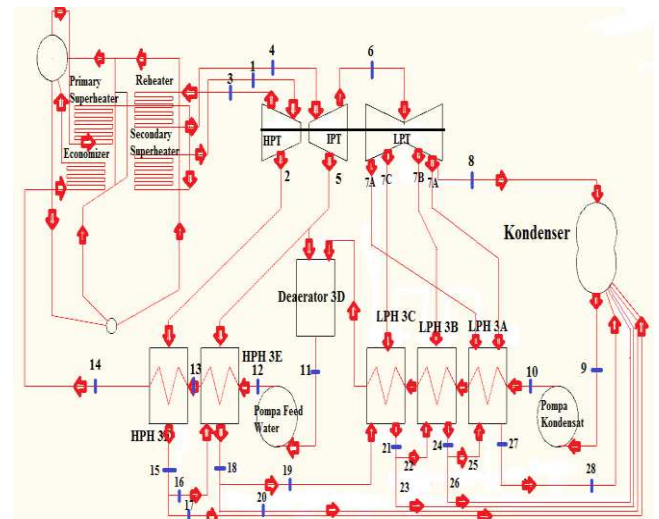
2.1 Deskripsi Pembangkit

Boiler yang digunakan sebagai objek penelitian adalah *boiler* dari PLTU Unit ketiga berkapasitas 200 MW yang terdapat di PT. Indonesia Power UBP Semarang, Jawa Tengah. Data spesifikasi *boiler* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Spesifikasi *Boiler* [11]

Data Spesifikasi <i>Boiler</i>	
Pabrik Pembuat	MITSUI – RILEY
<i>Superheater Outlet Flow</i>	636 T/H
<i>Reheater Outlet Flow</i>	549 T/H
<i>Superheater Outlet Pressure</i>	131.5 kg/ cm ² g
<i>Reheater Outlet Pressure</i>	31.4 kg/ cm ² g
<i>SuperheaterOutlet Temperature</i>	540 °C
<i>Reheater Outlet Temperature</i>	540 °C
<i>Excess Air</i>	10 %
<i>Burner Inlet Air Temperature</i>	221 °C
<i>Design Pressure</i>	157.4 kg/ cm ² g
Jumlah <i>Burner</i> & Kapasitas	16 <i>Burner</i> (3410 kg/ hour)
Bahan Bakar Utama	MFO (Residu) atau Gas
Bahan Bakar Penyalaan Awal	HSD (Solar)
<i>Inlet Oil Temperature</i>	15 °C
<i>Outlet Oil Temperature</i>	105 °C

Skema diagram siklus *feedwater* PLTU Unit ketiga PT. Indonesia Power UBP Semarang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema diagram siklus *feedwater* PLTU Unit ketiga PT. Indonesia Power UBP Semarang [12].

Diagram T – s siklus Rankine ideal pada siklus PLTU Unit ketiga PT. Indonesia Power UBP Semarang dapat dilihat pada Gambar 3.

2.2 Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam proses perhitungan diperoleh dari catatan rekaman data yang terdapat di ruang kontrol PLTU Unit 3. Data – data yang diperlukan adalah tekanan (p), temperatur (T), laju

aliran massa (\dot{m}), fraksi massa MFO, nilai pembakaran terendah (LHV) MFO, daya yang dihasilkan generator, proses dan siklus di PLTU dan boiler.

2.3 Bahan Bakar Boiler

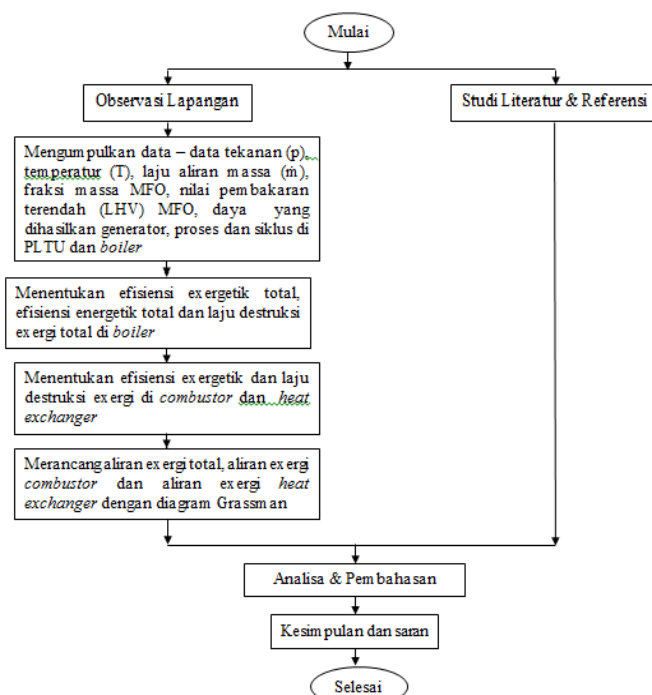
Bahan bakar boiler pada PLTU Unit 3 menggunakan MFO (*Marine Fuel Oil*). MFO termasuk dalam kategori HFO (*Heavy Fuel Oil*). Karakteristik MFO memiliki viskositas yang tinggi sehingga memerlukan pemanasan awal. Panjang rantai karbon MFO dalam rentang $C_{20} - C_{50}$ [13], namun tidak memiliki nilai karbon yang pasti karena tergantung dari praktek kilang dan campuran. Dalam proses perhitungan, nilai rantai karbon yang digunakan adalah C_{20} . Spesifikasi MFO yang diperoleh dari laboratorium dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Spesifikasi Boiler [14]

NO.	TEST	HASIL PEMERIKASAAN	SATUAN
1	HHV	18,739.97	BTU/lb
2	LHV	17,797.16	BTU/lb
3	Density	938.4	Kg/m ³
Fraksi Massa			
1	Carbon (C)	82.309	% wt
2	Hydrogen (H)	9.088	% wt
3	Oksigen (O)	6.771	% wt
4	Nitrogen (N)	0.417	% wt
5	Sulphur (S)	1.415	% wt

2.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

2.5 Formulasi Exergi Boiler

Batasan – batasan masalah pada penelitian ini adalah energi kinetik dan energi potensial di dalam sistem diabaikan, tekanan dan temperatur lingkungan diasumsikan konstan pada $p_0 = 1$ bar dan $T_0 = 25$ °C (295.15K), nilai laju aliran steam dan feedwater dianggap steady state, jumlah feedwater yang terbuang di sistem blowdown dianggap nol, proses pembakaran di boiler dioperasikan secara adiabatik dan udara, flue gas dan heat product dimodelkan sebagai gas ideal dan juga data yang digunakan dalam kurun waktu dua puluh empat jam.

Untuk proses steady state ($dm_{cv} = 0$), keseimbangan massa untuk sistem volume atur adalah [2]

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e \quad (1)$$

Neraca exergi untuk sistem volume atur adalah [1]

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) d\dot{Q}_j - (\dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt}) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}D \quad (2)$$

Total exergi spesifik dari suatu sistem E adalah [1]

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (3)$$

dimana $\dot{E} = \dot{m}e$ dan $e^{KN} = e^{PT} = 0$, maka laju perpindahan exergi suatu aliran adalah [1]

$$\dot{E} = \dot{m}(e^{PH} + e^{CH}) \quad (4)$$

Mengacu dari Persamaan (2), laju destruksi exergi pada sistem volume atur adalah

$$\dot{E}D = \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e \quad (5)$$

Pada Persamaan (4), nilai exergi fisika dan exergi kimia berbeda – beda tergantung dari jenis alirannya. Exergi fisika pada steam, water, liquid fuels dan solid fuels adalah [1]

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m}e^{PH} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (6)$$

Exergi fisika pada air adalah [1]

$$\dot{E}_a^{PH} = \dot{m}_a e^{PH} = \dot{m}_a [(h_a - h_0) - T_0(s_a(T, p) - s_0(T_0, p_0) - \frac{R}{M} \ln \frac{p_a}{p_0})] \quad (7)$$

Exergi fisika pada flue gas adalah [1]

$$\dot{E}_{fg}^{PH} = \dot{m}_{fg} e_{fg}^{PH} = \dot{m}_{fg} \frac{[(h_{fg} - h_0) - T_0(s_{fg} - s_0)]}{M_{fg}} \quad (8)$$

Exergi kimia pada steam dan feedwater [1]

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \bar{e}^{CH} / M \quad (9)$$

Exergi kimia pada *air* bernilai nol karena tidak terjadinya pertukaran *substance* terhadap lingkungan [1] atau komposisi udara yang digunakan menyerupai komposisi udara pada lingkungan referensi [10]

$$\dot{E}_a^{CH} = 0 \quad (10)$$

Exergi kimia pada *flue gas* [1]

$$\dot{E}_{fg}^{CH} = \dot{m}_{fg} \bar{e}_{fg}^{CH} / M_{fg} \quad (11)$$

Exergi kimia pada *liquid fuel* [15]

$$\dot{E}_f^{CH} = \dot{m} \left\{ [1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{S}{C} (1 - 2.0628 \frac{H}{C})] LHV \right\} \quad (12)$$

Efisiensi exergi merupakan rasio atau perbandingan antara *product exergy* dan *fuel exergy*, sehingga dapat dirumuskan sesuai Persamaan (13) [1].

$$\varepsilon = (\dot{E}_p / \dot{E}_f) \times 100\% \quad (13)$$

Efisiensi energi *boiler* adalah perbandingan antara energi yang keluar dengan energi yang masuk yang dapat dilihat pada Persamaan (14) [2].

$$E = (\dot{E}_e / \dot{E}_i) \times 100\% \quad (14)$$

Produk panas hasil pembakaran yang terjadi di *combustor* berada pada kondisi campuran dimana produk panas yang dihasilkan berasal dari reaksi pembakaran antara bahan bakar dengan udara. Nilai temperatur pembakaran produk panas diperoleh melalui persamaan kesetimbangan energi untuk sistem reaktif berdasarkan basis per mol bahan bakar pada kondisi pembakaran sempurna dengan jumlah udara teoritis. Persamaan kesetimbangan energi untuk sistem reaktif berdasarkan basis per mol bahan bakar adalah

$$\frac{Q_{cv}}{n_f} - \frac{W_{cv}}{n_f} = \bar{h}_p - \bar{h}_R \quad (15)$$

dimana nilai entalpi spesifik produk dan entalpi reaktan adalah

$$\bar{h}_p - \bar{h}_R = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i \quad (16)$$

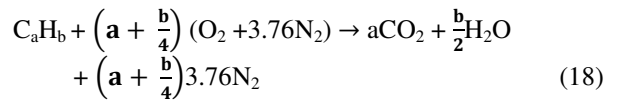
diketahui nilai entalpi spesifik suatu senyawa pada kondisi selain kondisi standard adalah

$$\bar{h} = \bar{h}_f^o + \Delta \bar{h} \quad (17)$$

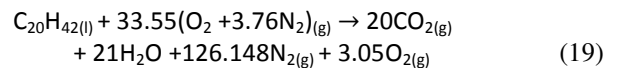
Diagram Grassman merupakan diagram yang berfungsi untuk menggambarkan aliran exergi dan destruksi exergi yang di adaptasi dari diagram Sankey yang merupakan digram yang berfungsi untuk menggambarkan perpindahan energi di sistem pembangkit [15].

2.6 Perhitungan Pembakaran

Untuk volume atur dengan kondisi tunak, persamaan bahan bakar hidrokarbon yang mengalami pembakaran sempurna dengan jumlah udara teoritis adalah [2]



Asumsikan panjang rantai karbon *Marine Fuel Oil* adalah C_{20} dan *excess air* bernilai 10% [16], sehingga reaksi pembakaran sempurna adalah



Excess air diperlukan pada seluruh praktek pembakaran untuk menjamin pembakaran yang sempurna dan menjamin kondisi *vent stack* sesuai yang memuaskan [17].

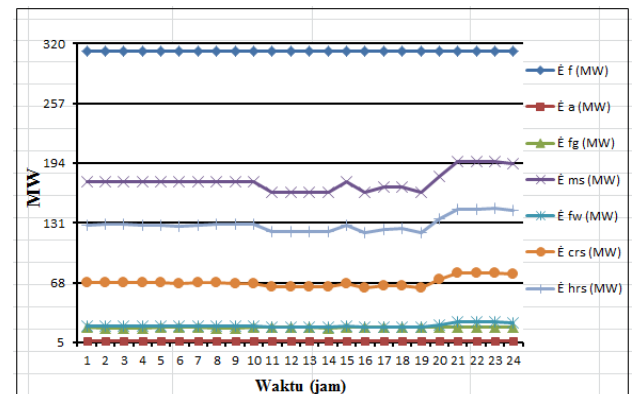
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Exergi Total Boiler

Hasil perhitungan exergi total dari *fuel*, *air*, *flue gas*, *main steam*, *feedwater*, *cold reheated steam* dan *hot reheated steam* yang telah dilakukan selama dua puluh empat jam dapat dilihat pada Gambar 3.

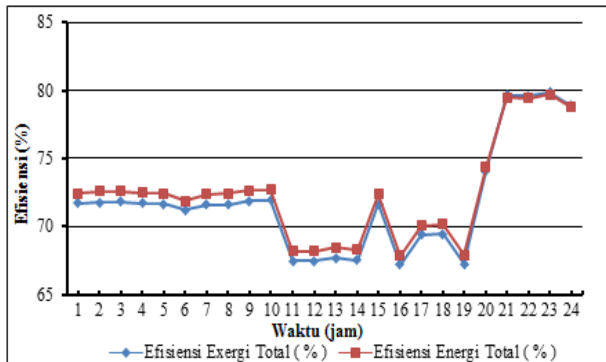
Dari Gambar 3. dapat dilihat bahwa nilai exergi total terbesar di *boiler* terdapat pada *fuel*. Nilai exergi total *boiler* yang besar pada *fuel* dikarenakan *fuel* memiliki exergi kimia yang besar, meskipun exergi fisika dianggap nol. Nilai exergi total *fuel* mempunyai nilai yang sama karena data fraksi mol dari komposisi MFO, data LHV dan data laju aliran massa *fuel* mempunyai nilai yang sama selama satu hari.

Nilai exergi total terkecil di *boiler* pada PLTU Unit 3 terdapat pada udara. Nilai temperatur udara memiliki perbedaan yang besar terhadap nilai temperatur referensi, tetapi nilai tekanan udara memiliki perbedaan yang sangat kecil terhadap nilai tekanan referensi, sehingga mempengaruhi rendahnya nilai exergi udara dan juga nilai exergi *flue gas*.



Gambar 3. Nilai exergi total boiler selama dua puluh empat jam.

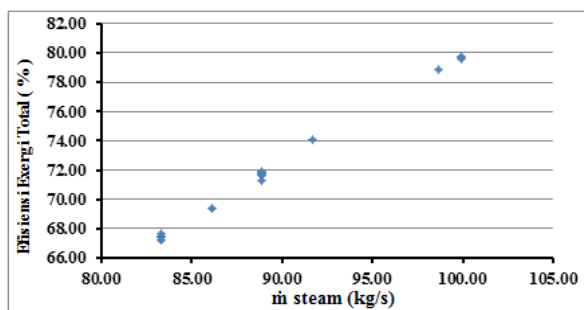
3.2 Perbandingan Efisiensi Exergi dengan Efisiensi Energi Total Boiler



Gambar 4. Grafik perbandingan antara efisiensi exergi total dan efisiensi energi total terhadap waktu.

Dari Gambar 4. dapat dilihat bahwa nilai efisiensi exergi total dan efisiensi energi total di boiler terbesar pada jam ke 23 yaitu masing - masing sebesar 79.86 % dan 79.71 %. Penurunan nilai efisiensi exergi total dan nilai efisiensi energi total yang signifikan terjadi pada jam ke 11 hingga ke 14 dan jam ke 16 hingga ke 19, sedangkan efisiensi exergi terendah dan efisiensi energi terendah terjadi pada jam ke 16 yaitu masing – masing sebesar 67.17 % dan 68.22 %. Berdasarkan data – data di lapangan yang digunakan untuk perhitungan, tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi dan nilai efisiensi energi lebih dipengaruhi oleh laju aliran massa steam, sedangkan perubahan temperatur dan tekanan tidak memberikan perubahan yang signifikan.

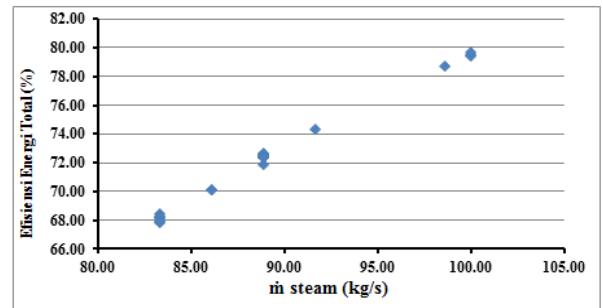
Efisiensi exergi dan efisiensi energi tertinggi terjadi pada saat laju aliran massa steam berada pada nilai 100 kg/s sedangkan efisiensi exergi dan efisiensi energi terendah terjadi pada saat laju aliran massa steam berada pada nilai 83.33 kg/s. Pengaruh laju aliran massa steam terhadap efisiensi exergi total boiler dapat dilihat pada Gambar 5. Sedangkan, pengaruh laju aliran massa steam terhadap efisiensi energi total boiler dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5. Grafik pengaruh laju aliran massa steam terhadap efisiensi exergi total boiler.

Gambar 4. menunjukkan bahwa nilai efisiensi energi total untuk jam ke 1 hingga 20 lebih besar dibandingkan dengan nilai efisiensi exergi total. Sedangkan, terjadi penyimpangan untuk jam ke 21

hingga ke 24, dimana efisiensi exergi total lebih besar dibandingkan efisiensi energi total.



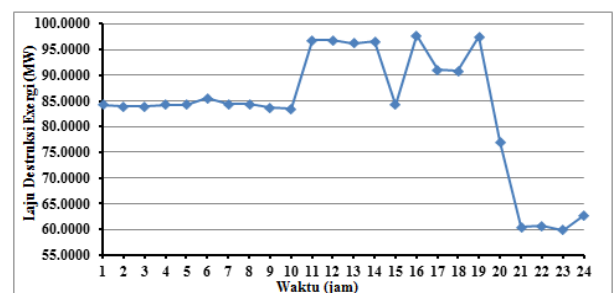
Gambar 6. Grafik pengaruh laju aliran massa steam terhadap efisiensi energi total boiler.

Secara teori nilai efisiensi exergi bernilai lebih kecil dibandingkan efisiensi energi karena efisiensi exergi juga memperhitungkan produksi entropi yang timbul akibat dari faktor irreversibilitas sistem yang dianggap sebagai kerugian mendamping perpindahan kalor. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan potensial kerja atau kualitas energi yang terpakai dalam proses di boiler. Sedangkan efisiensi energi hanya memperhitungkan jumlah energi yang masuk dan energi yang terpakai sehingga dapat diketahui seberapa besar jumlah energi yang hilang.

Selisih yang terjadi antara efisiensi exergi total dan efisiensi energi total begitu kecil. Hal tersebut dikarenakan perhitungan efisiensi exergi total tidak hanya memperhitungkan entalpi dan entropi saja tetapi juga memperhitungkan exergi kimia sehingga menyebabkan nilai efisiensi exergi bernilai besar. Sedangkan perhitungan efisiensi energi total hanya memperhitungkan entalpi saja. Hal tersebut juga merupakan faktor yang menyebabkan terjadinya penyimpangan nilai untuk jam ke 21 hingga ke 24.

3.3 Laju Destruksi Exergi Total Boiler

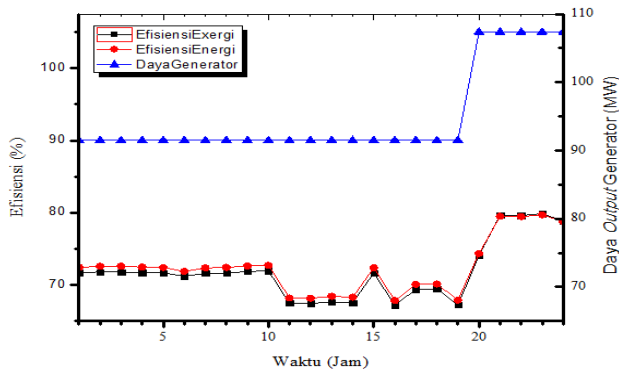
Gambar 7. menunjukkan bahwa bahwa laju destruksi exergi total terkecil terdapat pada jam ke 23 yaitu 59.8505 MW, dimana untuk jam ke 23 mempunyai efisiensi exergi total tertinggi sebesar 79.86 %. Sedangkan laju destruksi exergi total terbesar terdapat pada jam ke 16 sebesar 97.6702 MW, dimana mempunyai efisiensi exergi total terendah sebesar 67.17 %.



Gambar 7. Laju destruksi exergi total boiler selama dua puluh empat jam.

3.4 Daya Output Generator, Efisiensi Exergi Total dan Efisiensi Energi Total

Gambar 8. menunjukkan bahwa daya *output* generator bernilai konstan sebesar 90 MW untuk jam ke 0 hingga ke 19 dan mengalami kenaikan sebesar 105 MW untuk jam ke 20 hingga ke 24 karena kebutuhan listrik di malam hari lebih besar dibandingkan pagi hari dan siang hari. Nilai daya *output* generator bernilai konstan pada jam ke 0 hingga ke 19 dikarenakan operator hanya merekam nilai daya berdasarkan kontrak perjanjian sehingga tidak mencatat berdasarkan daya *output* generator yang sebenarnya.



Gambar 8. Grafik daya *output* generator, efisiensi exergi total dan efisiensi energi total *boile* terhadap waktu.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dapat dijelaskan bahwa setiap kenaikan daya yang dihasilkan generator diikuti dengan kenaikan efisiensi exergi dan efisiensi energi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengoperasian pembangkit dengan kapasitas yang mendekati kapasitas maksimalnya lebih ekonomis daripada pengoperasian pada kapasitas sebagian [8].

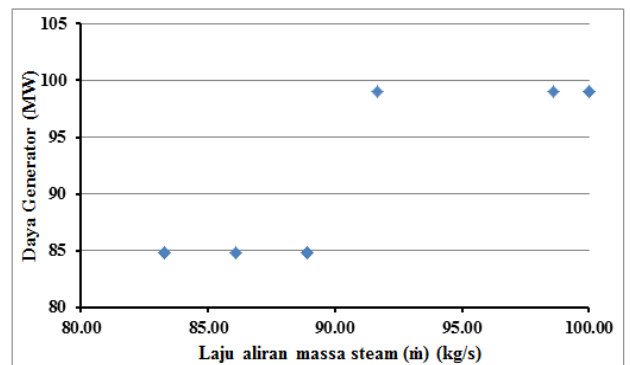
Gambar 8. menunjukkan bahwa terjadi peningkatan daya *output* generator yang diikuti dengan peningkatan efisiensi exergi dan efisiensi energi pada jam ke 20 hingga ke 24. Untuk jam ke 1 hingga ke 19 nilai daya generator yang tercatat bernilai konstan, namun terjadi penyimpangan nilai efisiensi exergi dan efisiensi energi pada jam ke 11 hingga ke 14 dan ke 16 hingga ke 20. Penyimpangan yang terjadi yaitu ketika nilai efisiensi mengalami penurunan sedangkan daya yang dihasilkan generator bernilai konstan.

Faktor – faktor yang mempengaruhi nilai daya *output* generator adalah laju aliran massa *steam* maupun nilai temperatur dan tekanan *steam* masuk dan keluar turbin. Disamping itu, nilai daya *output* generator juga dipengaruhi oleh tekanan kondenser. Peningkatan nilai tekanan kondenser menyebabkan daya *output* generator menurun, dimana nilai efisiensi exergi dan efisiensi energi juga menurun akibat daya *output* generator menurun. Disisi lain, penurunan nilai tekanan kondenser menyebabkan daya *output* generator meningkat, dimana nilai efisiensi exergi dan efisiensi energi juga meningkat akibat daya *output* generator meningkat [8].

3.5 Pengaruh Laju Aliran Massa *Steam* Terhadap Daya Output Generator

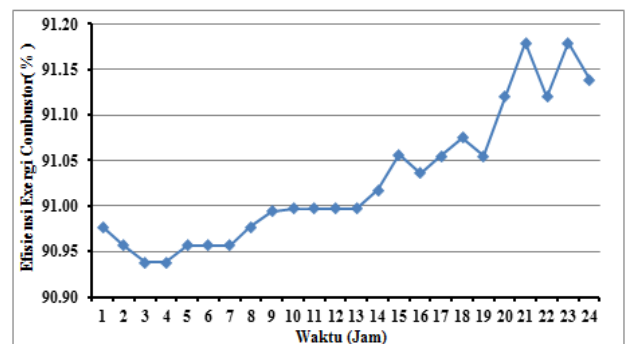
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran massa *steam* sebanding dengan peningkatan daya *output* generator dan juga sebaliknya. Hubungan tersebut berguna untuk menentukan persyaratan dari kebutuhan aliran *steam* untuk kondisi muatan tertentu [8].

Namun untuk data aktual yang diperoleh dari penelitian di PLTU PT. Indonesia Power menunjukkan terjadinya penyimpangan pada saat laju aliran *steam* sebesar 83.33 kg/s, 86.11 kg/s, 88.89 kg/s, 91.67 kg/s dan 98.61 kg/s. Penyimpangan yang terjadi adalah ketika nilai laju aliran *steam* berbeda namun menghasilkan daya yang sama. Grafik pengaruh laju aliran massa *steam* terhadap daya *output* generator selama satu hari dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik pengaruh laju aliran massa *steam* terhadap daya yang dihasilkan generator selama satu hari.

3.6 Efisiensi Exergi *Combustor*

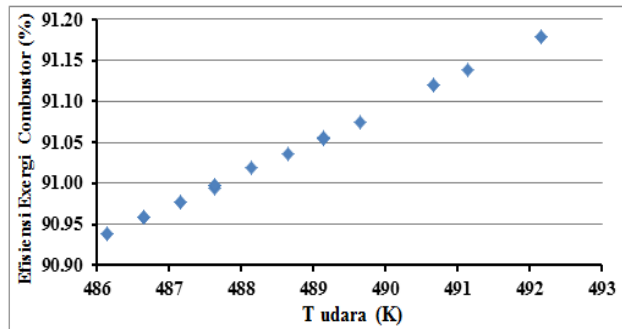


Gambar 10. Hasil perhitungan efisiensi exergi *combustor* selama dua puluh empat jam.

Gambar 10. menunjukkan bahwa efisiensi exergi *combustor* tertinggi terdapat pada jam ke 21 dan 23 yaitu sebesar 91.18 %. Sedangkan, efisiensi exergi *combustor* terendah terdapat pada jam ke 3 dan 4 yaitu sebesar 90.94 %.

Berdasarkan data – data di lapangan yang digunakan untuk perhitungan, faktor utama yang menentukan tinggi rendahnya efisiensi exergi di *combustor* adalah temperatur udara yang digunakan

untuk pembakaran dimana dapat dilihat pada Gambar 11.. Semakin tinggi temperatur udara maka efisiensi exergi *combustor* mengalami kenaikan. Semakin rendah temperatur udara maka efisiensi exergi *combustor* mengalami penurunan. Untuk meningkatkan efisiensi termis sebesar 1 %, temperatur udara untuk pembakaran harus dinaikkan sebesar 20 °C [17].

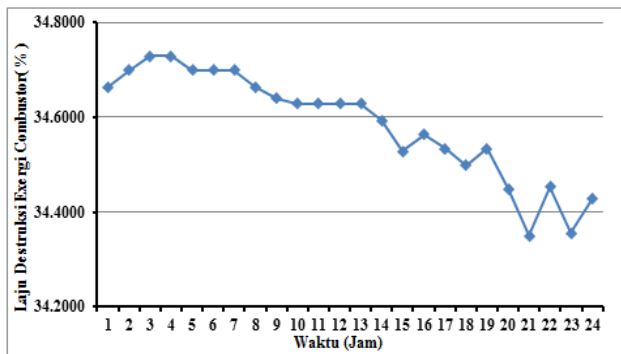


Gambar 11. Grafik pengaruh temperatur udara terhadap efisiensi exergi *combustor*.

3.7 Laju Destruksi Exergi Combustor

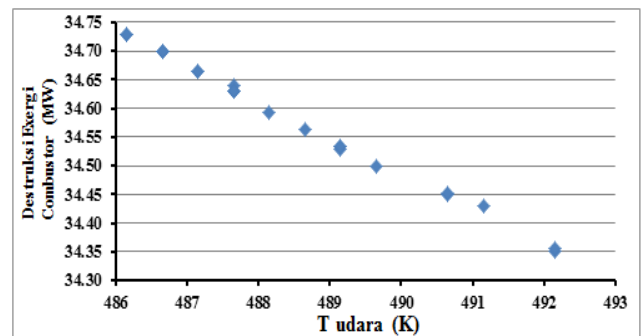
Gambar 12. menunjukkan bahwa laju destruksi exergi terkecil di *combustor* terdapat pada jam ke 21 sebesar 34.3503 MW. Sedangkan laju destruksi exergi terbesar di *combustor* terdapat pada jam ke 3 dan 4 sebesar 34.7288 MW.

Sama halnya dengan efisiensi exergi *combustor*, nilai laju destruksi exergi di *combustor* juga dipengaruhi oleh temperatur udara yang digunakan untuk pembakaran dimana dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 12. Laju destruksi exergi di *combustor* selama dua puluh empat jam.

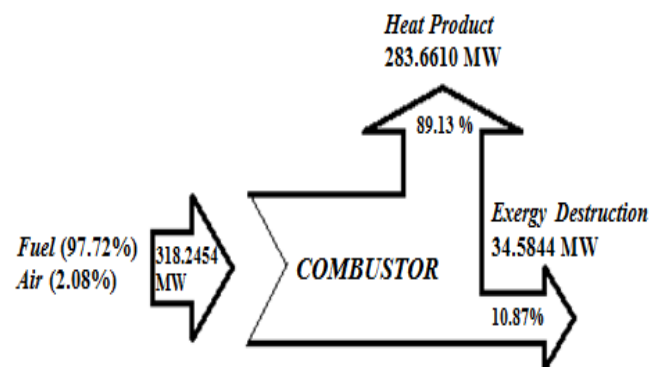
Semakin tinggi temperatur udara maka laju destruksi exergi *combustor* mengalami penurunan. Semakin rendah temperatur udara maka laju destruksi exergi *combustor* mengalami peningkatan. Temperatur udara pembakaran yang tinggi menghasilkan nilai entalpi yang lebih tinggi sehingga kemungkinan udara mengalami destruksi exergi menjadi semakin rendah. Temperatur udara pembakaran yang rendah menghasilkan nilai entalpi yang lebih rendah sehingga kemungkinan udara mengalami destruksi exergi menjadi semakin tinggi.



Gambar 13. Pengaruh temperatur udara terhadap laju destruksi exergi *combustor*.

3.8 Diagram Grassman Aliran Exergi Combustor

Diagram Grassman *combustor* dapat dilihat pada Gambar 14. Gambar 14 menjelaskan bahwa jumlah exergi rata – rata yang masuk *combustor* yaitu sebesar 318.2454 MW dimana exergi dari *fuel* sebesar 97.72% dan exergi dari *air* sebesar 2.08%. Exergi rata - rata yang terpakai menjadi *heat product* yaitu sebesar 283.6610 MW atau sebesar 89.13% dari exergi rata – rata yang masuk *combustor*. Laju destruksi exergi rata – rata *combustor* adalah sebesar 34.5844 MW atau sebesar 10.87% dari total exergi rata – rata yang masuk *combustor*.



Gambar 14. Diagram Grassman aliran exergi di *combustor* selama satu hari.

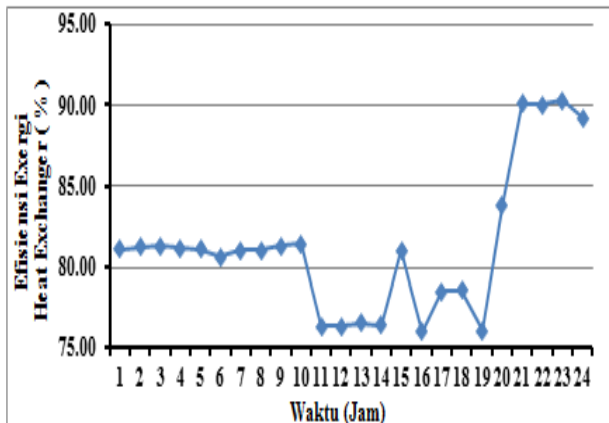
Destruksi exergi di *combustor* disebabkan oleh satu – satunya faktor yaitu disebabkan karena *excess air* sebesar 10%. Dalam proses perhitungan exergi *heat product*, temperatur *heat product* yang digunakan merupakan temperatur dalam keadaan adiabatik. Reaksi kimia bahan bakar dengan udara diasumsikan dalam keadaan pembakaran sempurna. Kelebihan udara menyebabkan produk panas ikut terbuang ke *vent stack* sebagai *flue gas*. Udara berlebih diperlukan pada seluruh praktek pembakaran untuk menjamin pembakaran yang sempurna dan menjamin kondisi *vent stack* sesuai yang memuaskan [17].

Laju destruksi exergi aktual yang terjadi di *combustor* pasti bernilai lebih besar karena secara aktual pembakaran yang terjadi tidak mungkin sempurna dan sistem di *combustor* tidak sepenuhnya adiabatik. Selain itu juga kemungkinan *excess air* aktual bisa lebih besar atau lebih kecil dari 10% karena tidak adanya alat yang mencatat penggunaan udara

untuk pembakaran. Apabila laju destruksi exergi aktual *combustor* lebih besar dari 10.87% maka efisiensi exergi aktual *combustor* bernilai lebih rendah dan efisiensi exergi total *boiler* bernilai lebih rendah.

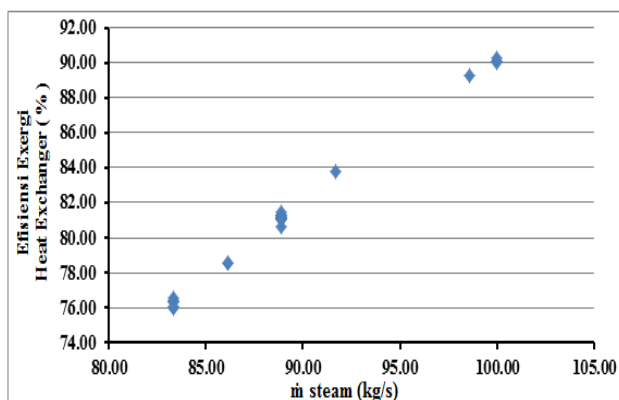
3.9 Efisiensi Exergi Heat Exchanger

Hasil perhitungan efisiensi exergi *heat exchanger* selama dua puluh empat jam dapat dilihat pada Gambar 15. Dari hasil perhitungan, efisiensi exergi *heat exchanger* tertinggi terdapat pada jam ke 23 sebesar 90.30%. Efisiensi exergi *heat exchanger* terendah terdapat pada jam ke 16 yaitu sebesar 76.00%.



Gambar 15. Hasil perhitungan efisiensi exergi *heat exchanger* selama dua puluh empat jam.

Berdasarkan data yang digunakan dalam perhitungan, tinggi atau rendahnya efisiensi exergi *heat exchanger* dipengaruhi oleh laju aliran *steam*, sedangkan data – data berupa temperatur dan tekanan tidak mengalami perbedaan yang signifikan. Grafik pengaruh laju aliran massa *steam* terhadap efisiensi exergi *heat exchanger* dapat dilihat pada Gambar 16.

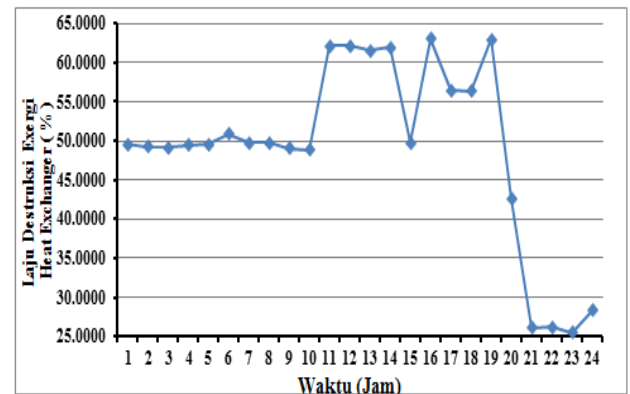


Gambar 16. Grafik pengaruh laju aliran massa *steam* terhadap efisiensi exergi *heat exchanger*.

3.10 Laju Destruksi Exergi Heat Exchanger

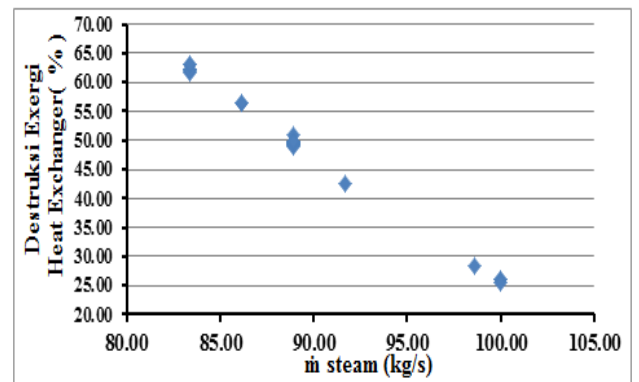
Hasil perhitungan laju destruksi exergi *heat exchanger* selama dua puluh empat jam dapat dilihat pada Gambar 17. Dari hasil perhitungan, laju destruksi exergi terkecil di *heat exchanger* terdapat pada jam ke 23 sebesar 25.4942 MW. Sedangkan laju destruksi

exergi terbesar di *heat exchanger* terdapat pada jam ke 16 sebesar 63.1063 MW.



Gambar 17. Grafik pengaruh laju aliran massa *steam* terhadap efisiensi exergi *heat exchanger*.

Sama halnya dengan efisiensi exergi *heat exchanger*, nilai laju destruksi exergi di *heat exchanger* juga dipengaruhi oleh laju aliran *steam*. Gambar 18 menunjukkan bahwa setiap peningkatan laju aliran massa *steam* menyebabkan penurunan laju destruksi exergi *heat exchanger* dan setiap penurunan laju aliran massa *steam* menyebabkan peningkatan laju destruksi exergi *heat exchanger*.



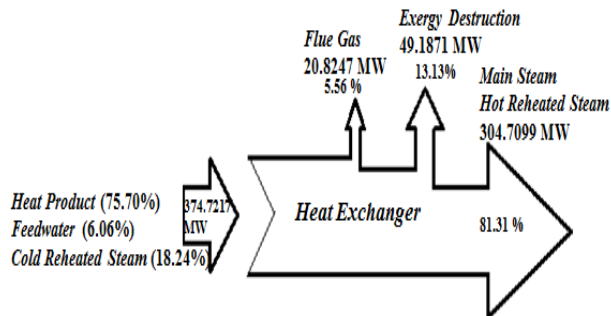
Gambar 18. Grafik pengaruh laju aliran massa *steam* terhadap laju destruksi exergi *heat exchanger*.

3.11 Diagram Grassman Exergi Heat Exchanger

Diagram Grassman *heat exchanger* pada Gambar 19 menjelaskan bahwa jumlah exergi rata – rata yang masuk *heat exchanger* yaitu sebesar 374.7217 MW dimana exergi dari *heat product* sebesar 75.70%, exergi dari *feedwater* sebesar 6.06% dan exergi dari *cold reheated steam* sebesar 18.24%.

Exergi rata - rata yang terpakai menjadi *main steam* dan *hot reheated steam* yaitu sebesar 304.7099 MW atau sebesar 81.31% dari exergi rata – rata yang masuk *heat exchanger*. Exergi yang terbuang ke *flue gas* sebesar 20.8247 MW atau sebesar 5.56% dari exergi rata – rata yang masuk *heat exchanger*. Pengurangan temperatur *flue gas* sebesar 20 °C akan memperbaiki efisiensi *boiler* sekitar 1%. Namun temperatur normal *flue gas* berada pada rentang 175 °C

sampai 260 °C [18] karena temperatur *flue gas* tidak boleh terlalu rendah karena dapat menyebabkan pengembunan gas buang dimana bisa menyebabkan korosi pada *vent stack* akibat kandungan sulfur [17]. Laju destruksi exergi rata – rata *heat exchanger* adalah sebesar 49.1871 MW atau sebesar 13.13% dari total exergi rata – rata yang masuk *heat exchanger*.



Gambar 19. Diagram Grassman aliran exergi di *heat exchanger* selama satu hari.

Untuk mengurangi laju destruksi exergi di *heat exchanger* dapat dilakukan dengan cara – cara berikut ini, antara lain :

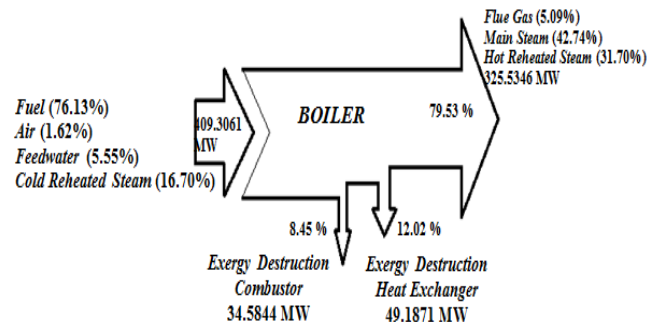
- 1) Mengurangi kehilangan panas radiasi dan konveksi pada dinding *boiler* dan pemipaan dengan memperbaiki atau pembesaran insulasi [17].
- 2) Menjaga kebersihan *tubes* dari deposit pada sisi luar *tubes* atau disebut juga *fouling* yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar minyak dan padat. Tebal *fouling* sebesar 0.8 mm (0.03 in) dapat mengurangi perpindahan panas sebesar 9.5% dan tebal sebesar 4.5 mm (0.18 in) dapat mengurangi perpindahan panas sebesar 69%. Pengaruh dari penurunan kemampuan perpindahan panas menyebabkan temperatur *flue gas* meningkat [18]. Pada *boiler* di PLTU Unit 3 ini sudah menerapkan sistem *soot blower* untuk mengurangi *fouling* pada permukaan *tubes*.
- 3) Menjaga kebersihan *tubes* dari deposit pada sisi dalam *tubes* atau disebut juga *scale* akibat dari kualitas *feedwater* yang buruk. *Scale* dapat menyebabkan aliran *feedwater* terhambat, mengurangi kemampuan perpindahan panas dan menyebabkan pecahnya *tubes* akibat panas yang berlebih pada *scale*. Tebal *scale* sebesar 1 mm dapat menyebabkan penambahan konsumsi *fuel* sebesar 2% [18].
4. Menggunakan sistem kontrol *blowdown* yang secara otomatis dapat mengurangi kehilangan panas di *boiler* [18].

3.12 Diagram Grassman Exergi Heat Exchanger

Berdasarkan hasil perhitungan laju destruksi exergi tiap komponen, maka diagram Grassman aliran exergi total di *boiler* dapat dilihat pada Gambar 20. Dari Gambar 20 dapat dijelaskan bahwa laju destruksi exergi di *heat exchanger* lebih besar dari pada laju destruksi exergi di *combustor*. Total exergi rata –rata

yang masuk ke *boiler* adalah 409.3061 MW, dimana kontribusi dari exergi *fuel* sebesar 76.13%, exergi *air* sebesar 1.62%, exergi *feedwater* sebesar 5.55% dan exergi *cold reheated steam* sebesar 16.70%.

Total exergi rata – rata yang terpakai sebesar 79.53% dari total exergi rata – rata yang masuk yaitu sebesar 325.5346 MW. Sedangkan laju destruksi exergi rata – rata adalah sebesar 83.7715 MW atau sebesar 20.47 % dari total exergi rata – rata yang masuk, dimana kontribusi dari laju destruksi exergi *combustor* sebesar 8.45% dan laju destruksi exergi *heat exchanger* sebesar 12.02%.



Gambar 20. Diagram Grassman aliran exergi total di *boiler*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan analisa yang telah dilakukan dalam pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa :

- 1) Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi total, efisiensi energi total dan laju destruksi total dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam* dan daya *output generator*.
- 2) Nilai rata - rata efisiensi energi total lebih besar dibandingkan nilai rata - rata efisiensi exergi total dimana masing – masing bernilai 72.40% dan 71.84%.
- 3) Nilai efisiensi exergi dan laju destruksi exergi di *combustor* dan *heat exchanger* adalah
 - a. Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi dan laju destruksi exergi *combustor* dipengaruhi oleh temperatur udara pembakaran, *excess air*, sistem insulasi di *combustor* dan pencampuran bahan bakar dengan udara. Nilai laju destruksi exergi rata – rata teoretis *combustor* bernilai 34.5844 MW atau 10.87 % dari exergi yang masuk. Maka dari itu, laju destruksi exergi rata - rata aktual yang terjadi di *combustor* pasti bernilai lebih besar dari pada laju destruksi exergi teoretisnya.
 - b. Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi dan laju destruksi exergi *heat exchanger* dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam*, temperatur *flue gas*, sistem insulasi, kebersihan *tubes* dan jumlah *feedwater* yang terbuang di sistem *blowdown*.
- 4) Berdasarkan diagram Grassman aliran exergi total di *boiler* dapat disimpulkan sebagai berikut :

- a. Exergi total rata – rata yang masuk ke *boiler* adalah 409.3061 MW, dimana kontribusi dari exergi *fuel* sebesar 76.13 %, exergi udara sebesar 1.62 %, exergi *feedwater* sebesar 5.55 % dan exergi *cold reheated steam* sebesar 16.70%.
- b. Total exergi rata – rata yang terpakai sebesar 79.53% dari total exergi rata – rata yang masuk yaitu sebesar 325.5346 MW. Kontribusi dari *flue gas* sebesar 5.09%, *main steam* sebesar 42.74% dan *hot reheated steam* sebesar 31.70%.
- c. Laju destruksi exergi rata – rata adalah sebesar 83.7715 MW atau sebesar 20.47 % dari total exergi rata – rata yang masuk. Kontribusi dari laju destruksi exergi *combustor* sebesar 8.45% dan laju destruksi exergi *heat exchanger* sebesar 12.02%.

5. REFERENSI

- [1] Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., 1996. *Thermal Design & Optimization*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Moran, M. J. and Shapiro, H. N., 2006. *Fundamental Of Engineering Thermodynamics*, Ed. 5. England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Gorji, M. B.. *Exergy, The Potential Work*. Iran. Noshirvani University Of Technology.
- [4] Rosen, M. A. and Scott, D. S., 2002. *Entropy Production and Exergy Destruction: Part II- Illustrative Technologies*. Canada.
- [5] Aljundi, I. H., 2008. *Energy And Exergy Analysis Of A Steam Power Plant In Jordan*. Jordan.
- [6] Rashad, A. and Maihy, A. E., 2009. *Energy And Exergy Analysis Of A Steam Power Plant In Egypt*. Cairo.
- [7] Saidur, R., Ahamed, J. U. and Masjuki, H. H., 2009 *Energy, Exergy, And Economic Analysis Of Industrial Boilers*. Malaysia.
- [8] Regulagadda, P., Dincer, I. and Naterer, G. F., 2010. *Exergy Analysis Of A Thermal Power Plant With Measured Boiler And Turbine Losses*. Canada.
- [9] Reddy, Siva, V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K. and Panwar, N. L., 2010. *An Approach To Analyse Energy And Exergy Analysis Of Thermal Power Plants: A Review*. India.
- [10] Ehsan, A. and Yilmazoglu, M. Z., 2011. *Design And Exergy Analysis Of A Thermal Power Plant Using Different Types Of Turkish Lignite*. Turkey.
- [11] PT. Indonesia Power UBP Semarang. *SSPP Unit 3 Training For Steam Generator And Auxiliaries*. Riley – Mitsui, 1983.
- [12] PLTU Unit 3 PT. Indonesia Power UBP Semarang.
- [13] The American Petroleum Institute Petroleum HPV Testing Group. 2011. *Heavy Fuel Oils Category Analysis And Hazard Characterization*. Consortium Registration # 1100997.
- [14] CoreLab. *Analytical Report MFO*. Semarang, 2009.
- [15] Kotas, T. J., 1995. *The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis*. Florida: Krieger Publishing Company.
- [16] Ozkan, M., 1983. *Steam Boilers Thermal Calculations*. Gazi University Press, Ankara.
- [17] UNEP. 2008. "Boiler & Pemanas Fluida Thermis" United Nation Environment Program.
- [18] Dockrill, P., Friedrch, F., Federal Industrial Boiler Program, Natural Resources Canada, CANMET Energy Technology Centre, I Haanel Drive and Nepean ON KIA IMI. 2001. *Boilers & Heaters : Improving Energy Efficiency*. Canada. August.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkit Semarang karena telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan proses pengambilan data sehingga karya ilmiah ini dapat terselesaikan.