

Analisis Eksergi pada Sistem Pembangkit Daya Tenaga Uap (PLTU) Palu

Khairil Anwar, Muhammad Hasan Basri, Ikmal Tobe

Teknik Mesin, Universitas Tadulako
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu, 94118
E-mail : kh41ril@yahoo.com

Abstrak

Metode analisis eksergi ditujukan untuk mengatasi keterbatasan hukum pertama termodinamika dalam penyelesaian analisis kesetimbangan energi, di mana konsep eksergi didasarkan pada hukum pertama dan kedua termodinamika. Analisis Eksergi jelas dapat menunjukkan lokasi degradasi energi dalam proses yang dapat menyebabkan peningkatan operasi atau teknologi dari sebuah sistem pembangkit daya.

Penelitian ini berkaitan dengan performa dari sistem Pembangkit Daya Tenaga Uap (PLTU) Palu, dengan menggunakan pendekatan analisis eksergi berdasarkan hukum pertama dan kedua termodinamika. Studi ini dilakukan untuk mengetahui eksergi destruksi dan efisiensi eksergi dari setiap komponen, serta mengidentifikasi komponen dengan eksergi destruksi terbesar yang terjadi pada sistem pembangkit uap. Hasil yang diperoleh menunjukkan kerugian utama terjadi pada boiler dengan eksergi destruksi sebesar 11,44 MW (50,67%), kemudian berturut-turut diikuti turbin uap sebesar 4,14 MW (18,34%), kondensor sebesar 3,62 MW (16,06%), dan 3,77MW (14,93%) dari komponen lainnya seperti *fan*, *preaheter*, FWH, *condensate pump*, CFWP dan *deaerator*. Sedangkan persentase efisiensi eksergi dari boiler sebesar 53,07 %, turbin uap sebesar 68,9 % dan kondensor sebesar 47,2%. Hasil ini menunjukkan bahwa proses pembakaran di dalam boiler masih merupakan sumber *irreversibilitas* yang sangat signifikan terhadap eksergi destruksi pada sistem pembangkit uap di PLTU Palu. Reaksi kimia bahan bakar merupakan sumber yang paling signifikan dari eksergi destruksi dalam sistem boiler yang dapat dikurangi dengan pemanasan awal udara pembakaran. Di sisi lain, analisis exergi yang dilakukan pada sistem pembangkit daya uap menunjukkan bahwa energi yang hilang dalam kondensor secara termodinamika tidak signifikan karena kualitas yang rendah.

Keywords: Termodinamika, Pembangkit Uap, Analisis Eksergi, Eksergi Destruksi, Efisiensi

Pendahuluan

Kajian tentang analisis energi dan eksergi pada sistem pembangkit daya merupakan studi ilmiah yang cukup menarik dan penting karena berkaitan dengan pemanfaatan sumber daya energi yang efisien. Dalam beberapa dekade terakhir, analisis eksergi telah banyak digunakan sebagai alat yang berguna dalam desain, evaluasi, optimasi dan perbaikan sistem energi (Szargut 1988).

Menentukan efisiensi eksergi untuk sistem secara keseluruhan ataupun setiap komponen yang membentuk sebuah sistem merupakan bagian utama dari analisis eksergi. Suatu analisis yang komprehensif dari sistem termodinamika mencakup analisis energi dan eksergi untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang kondisi darisistem .

Untuk membantu dalam meningkatkan efisiensi pembangkit daya, karakteristik termodinamika dan prestasi harus ditentukan terlebih dahulu. Pembangkit

daya biasanya diuji dengan menggunakan analisis energi, akan tetapi pemahaman yang lebih baik dapat diperoleh ketika pandangan termodinamika yang lebih lengkap digunakan, dengan menggunakan hukum kedua termodinamika dalam hubungannya dengan analisis energi melalui metode eksergi. Penggunaan analisis eksergi tampaknya menjadi alat yang lebih kuat dibandingkan analisis energi khususnya untuk analisis siklus tenaga karena fakta bahwa analisis eksergi membantu peningkatan sistem secara keseluruhan atau komponen dengan menentukan besarnya kerugian yang sesungguhnya, penyebab serta lokasinya.

Penggunaan analisis energi dan eksergi untuk mengevaluasi performa pembangkit daya tenaga uap antara lain oleh Aljundi (2009) menyajikan analisis efisiensi energi dan eksergi dari sistem *power plant* di Yordania, untuk memperoleh variasi efisiensi energi dan eksergi untuk masing-masing pembangkit listrik. Secara keseluruhan efisiensi energi dan eksergi untuk seluruh sub-sektor yang ditemukan berada di kisaran

31,95-35,99%. Hasilnya, untuk tahun 2000, dibandingkan dengan efisiensi eksergi dan exergetik pada beberapa negara seperti, Turki dan Arab Saudi, kekuatan sub-sektor di Yordania lebih efisien, tetapi berlawanan dengan beberapa negara lainnya, misalnya Norwegia dan Malaysia. Perbedaan tersebut disebabkan karena struktur berbeda dari sektor utilitas di negara tersebut. Sehingga dengan hasil tersebut akan sangat membantu dalam mengembangkan perencanaan yang tepat dan produktif bagi kebijakan energi masa depan.

Rashad dan Maihy (2009), menyajikan analisis energi dan eksergi dari pembangkit listrik Shobra El - Khima di Kairo Mesir, dengan menganalisis komponen sistem terpisah dan juga untuk mengidentifikasi serta mengukur posisi yang memiliki kerugian energi dan eksergi terbesar pada beban yang berbeda – beda yakni beban 50%, 75% dan beban maksimum. Di mana diperoleh kerugian energi terutama terjadi pada kondensor yang hilang ke lingkungan. Sementara persentase rasio eksergi destruksi terhadap total eksergi destruksi ditemukan maksimum dalam sistem turbin diikuti oleh kondensor, sedangkan pada beban 50% diperoleh pemanas air umpan menunjukkan eksergi destruksi lebih dibandingkan kondensor.

Ehsan (2011) merancang pembangkit daya termal 240 MWel untuk dioperasikan dengan sepuluh jenis lignit Turki termasuk penentuan dan perbandingan kinerja untuk setiap jenis lignit. Selain itu, evaluasi pengaruh temperatur lingkungan pada efisiensi eksergi pembangkit daya uap dan perhitungan emisi CO₂ dari setiap jenis lignit dilakukan. Eksergi destruksi setiap komponen diselidiki dengan menggunakan prinsip kekekalan massa, kekekalan energi dan eksergi destruksi pada sistem terbuka dengan kondisi *steady state*. Hasil analisis studi kasus diperoleh bahwa boiler menjadi sumber utama kehancuran eksergi dengan 299,10 MW dan 83,29% dari total kerusakan eksergi pembangkit keseluruhan. Hal lain bahwa konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ dari sistem meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur lingkungan. Dengan perbandingan antara kinerja dan data emisi dari pembangkit listrik akan memberikan data yang berguna untuk masa depan penggunaan batubara pada investasi pembangkit daya termal di Turki.

S.C. Kaushik dkk (2010) *mereview* secara mendalam penggunaan analisis energi dan eksergi sistem *thermal powerplant*, untuk memahami kinerja sistem dengan penggunaan batubara dan menyimpulkan bahwa kerugian energi utama terjadi dalam boiler, hal ini terjadi secara ireversibilitas dikarenakan bahan bakar batubara dalam ruang pembakaran telah dikombinasikan sesuai siklus. Pada studinya juga menjelaskan metode eksergi berguna untuk

meningkatkan efisiensi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU).

Berdasarkan uraian di atas, dan dengan prinsip yang sama, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pembangkit daya uap (PLTU) yang terletak di Palu, Sulawesi tengah dari perspektif analisis eksergi. Hal ini karena sampai saat ini belum pernah dilakukan analisis tentang eksergi baik komponen maupun sistem keseluruhan sebelumnya, sehingga performansi pembangkit belum diketahui secara jelas.

Analisis Eksergi

Eksergi sebuah aliran (*stream*) adalah sifat dari keadaan aliran dan keadaan lingkungan. Sekali suatu sistem berada dalam kesetimbangan dengan lingkungannya, maka sistem tersebut tidak mungkin lagi untuk menggunakan energi dalam sistem tersebut untuk menghasilkan kerja. Pada kondisi ini, eksergi dari suatu sistem telah dimusnahkan sepenuhnya. Sedangkan energi didefinisikan sebagai gerak atau kemampuan untuk menimbulkan gerakan dan selalu bersifat kekal didalam suatu proses (memenuhi Hukum I Termodinamika). Di sisi lain, eksergi didefinisikan sebagai kerja atau kemampuan untuk menimbulkan kerja dan selalu bersifat kekal dalam proses reversibel namun selalu berkurang dalam suatu proses irreversible (memenuhi Hukum II Termodinamika). Jika energi adalah ukuran kuantitas, maka eksergi merupakan ukuran kuantitas sekaligus kualitas. Sama halnya dengan energi, eksergi dapat berpindah melintasi batas sistem.

Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Energi tersedia dalam beberapa bentuk yang berbeda dan dapat dikonversikan dari suatu bentuk ke bentuk lainnya. Hukum II Termodinamika menyatakan bahwa pengkonversian energi hanya dimungkinkan jika total entropi bertambah. Dengan menerapkan analisis eksergi, energi dan entropi dapat dikaji secara simultan. Kualitas energi digambarkan dengan konsep entropi (entropi tinggi berarti kualitas energi akan rendah). Jadi bentuk dari energi yang berbeda mempunyai kualitas berbeda dan mengindikasikan secara teoritis dari jumlah energi yang dapat dikonversikan menjadi kerja. Batasan ini adalah suatu hukum alam yang mengimplikasikan bahwa kualitas energi selalu berkurang dalam setiap pengkonversian (Hukum Kedua Termodinamika).

Adapun sifat ekstensif pada sistem dibagi menjadi empat komponen: eksergi fisik E^{PH} , eksergi kinetik E^{KN} , eksergi potensial E^{PT} dan eksergi kimia E^{CH} . Jadi komponen eksergi adalah (Bejan 1995) :

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

Jumlah dari eksergi seperti kinetik, potensial, dan fisik adalah sebagai eksergitermo-mekanis. Untuk menentukan kerja yang lebih spesifik dari eksergi pada basis unit massa, dimana eksergi massa total (e) adalah:

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (2)$$

Eksergi Fisik (*Physical Eksergi*)

Untuk eksergi fisik sistem tertutup pada system ditentukan dengan persamaan:

$$E^{PH} = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (3)$$

Dimana U, V dan S menunjukkan sebagai energi dalam, volume, dan entropi pada sistem tertentu, sedangkan $U_0, V_0,$ dan S_0 adalah nilai sifat yang sama ketika sistem berada pada keadaan nol atau *dead state*. (Cengel 2006)

Eksergi fisik dapat juga diekspresikan dalam satuan basis massa atau molar sebagai berikut:

$$e^{PH} = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (4)$$

Sementara eksergi fisik pada gas-ideal dengan basis molar:

$$E^{PH} = \dot{m}RT_0 \cdot \ln(P/P_0) \quad (5)$$

$$\dot{m}_i = (C_p(T - T_0) - T_0 \ln(T/T_0)) \quad (6)$$

Dalam mengevaluasi eksergi fisik untuk gas-gas ideal, beberapa pertimbangan khusus harus diperhitungkan. Bila suatu campuran gas ideal yang mengandung $H_2O_{(g)}$ didinginkan pada tekanan konstan di bawah temperatur titik embun, pengkondensasian uap air akan terjadi. Misalkan bahwa suatu campuran gas ideal yang terdiri dari $N_2, O_2, CO_2,$ dan $H_2O_{(g)}$ dan fraksi molnya masing-masing adalah $x_{N_2}, x_{O_2}, x_{CO_2}, x_{H_2O_{(g)}}$. Pada kondisi atmosferik, campuran dapat terdiri dari $N_2, O_2,$ dan $CO_2,$ beserta uap air jenuh yang berada dalam kesetimbangan dengan cairan jenuh.

Kesetimbangan Eksergi

Tujuan dari kesetimbangan eksergi adalah untuk mengetahui keseimbangan eksergi pada sistem tertutup (*closed system exergy balance*), keseimbangan eksergi pada volume atur dan keseimbangan eksergi pada sistem *steady-state*. Adapun sifat massa, energi, dan entropi, kesetimbangan eksergi dapat ditulis dalam bentuk alternatif yang sesuai untuk aplikasi tertentu.

Closed system exergy balance adalah hasil dari pengembangan dengan *combining energy* dan *entropi balance*. Dimana *heat transfer energy* pada sistem adalah sebagai *exergy transfer*:

$$(E_2 - E_1) = \int_1^2 (1 - T_0/T_b) \delta Q - [w - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_{gen} \quad (7)$$

Eksergi kimia (Chemical Exergy)

Eksergi kimia adalah eksergi yang terkait dengan perbedaan komposisi kimia dari sistem dengan

lingkungannya. Dari beberapa sifat yang digunakan pada eksergi kimia seperti standar eksergi kimia, standar eksergi kimia pencampuran gas ideal, dan standar eksergi kimia bahan bakar (kotas 1985). Standar eksergi kimia didasarkan pada nilai standar dari T_0 suhu lingkungan dengan tekanan P_0 pada 1 atm. Untuk kontribusi phase cair pada kondisi atmosferik, persamaan dipergunakan:

$$e_{H_2O(I)}^{-CH} = \bar{R} \cdot T_0 \cdot \ln \frac{P_{sat} T_0}{x_{O_{H_2}} O \cdot P_0} \quad (8)$$

Untuk campuran gas ideal didasarkan pada phase gas dengan komposisi seperti $N_2, CO_2, H_2O_{(g)}$. Pada temperatur phasa gas k sama dengan nilai standar dari suhu lingkungan T_0 dan tekanan phasa gas $P_k^e = x_k^e P_0$ persamaan dapat dipergunakan:

$$e_{gas}^{-CH} = \sum x'_k \bar{e}_k^{CH} + \bar{R} T_0 \cdot \sum x'_k \cdot \ln x'_k \quad (9)$$

Dalam hal bila pertimbangan kondensasi di atas harus diperhitungkan fraksi mol pada phasa gas untuk mendapatkan kontribusi phasa gas eksergi kimia. Maka total eksergi kimia dapat dituliskan pada komponen:

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \bar{e}^{CH} \quad (10)$$

Pada prinsipnya, standar kimia bahan bakar mempertimbangkan suatu zat dengan zat lain pada kondisi ideal yang tidak tercampur. Untuk bahan bakar hidrocarbon murni $C_a H_b$ pada temperatur T_0 tekanan p_0 dalam sistem bereaksi dengan oksigen untuk membentuk karbon dioksida dan air.

Eksergi kimia bahan bakar gas hidrocarbon dapat juga diperoleh dari hubungan sebagai berikut:

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} e_F^{-CH} \quad (11)$$

Eksergi Destruksi (exergy destruction)

Seperti telah diungkapkan pada bagian awal, bahwa eksergi tidaklah kekal tapi dapat dihancurkan (eksergi destruksi) secara irreversibilitas didalam sistem. Irreversibilitas ini dapat digolongkan sebagai irreversibilitas internal dan irreversibilitas eksternal. Penyebab utama irreversibilitas internal adalah karena dipengaruhi oleh gesekan, ekspansi tak terkendali, pencampuran dan reaksi kimia, sedangkan irreversibilitas eksternal adalah akibat terjadinya perpindahan panas karena adanya perbedaan temperatur (Bejan 1996).

Rasio eksergi destruksi ke sistem adalah perbandingan antara laju eksergi destruksi pada komponen sistem dengan laju eksergi bahan bakar yang diberikan ke dalam sistem secara keseluruhan $\dot{E}_{F,tot}$, yaitu :

$$y_D = \dot{E}_D / \dot{E}_{F,tot} \quad (12)$$

Laju eksergi destruksi komponen dapat dibandingkan dengan total laju eksergi destruksi di dalam sistem $\dot{E}_{D,tot}$, memberikan rasio :

$$y_{D^*} = \dot{E}_D / \dot{E}_{D,tot} \quad (13)$$

Rasio kerugian eksergi didefinisikan dengan cara yang

sama dengan membandingkan kerugian eksergi dengan eksergi bahan bakar yang diberikan ke dalam sistem keseluruhan, yaitu:

$$\eta_L = \dot{E}_L / \dot{E}_{F, \text{tot}} \quad (14)$$

Efisiensi eksergi (*Exergetic Efficiency*)

Dalam mendefinisikan efisiensi eksergetik perlu untuk mengidentifikasi baik produk dan bahan bakar untuk sistem termodinamika yang dianalisis. Produk ini menggambarkan perolehan yang dihasilkan oleh sistem. Dengan demikian, definisi hasil juga harus konsisten dengan tujuan penggunaan sistem. Bahan bakar merupakan sumber daya yang harus dikeluarkan untuk menghasilkan produk. Baik produk maupun bahan bakar dinyatakan sebagai eksergi.

Untuk sistem pada kondisi stedi, dalam *term* eksergi, laju di mana bahan bakar disuplai dan produk yang dihasilkan yaitu \dot{E}_F dan \dot{E}_P , maka kesetimbangan eksergi pada bahan bakar yang diberikan pada sistem (Bejan 1996):

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (15)$$

Sementara efisiensi eksergi adalah perbandingan antara produk dan bahan bakar, yaitu :

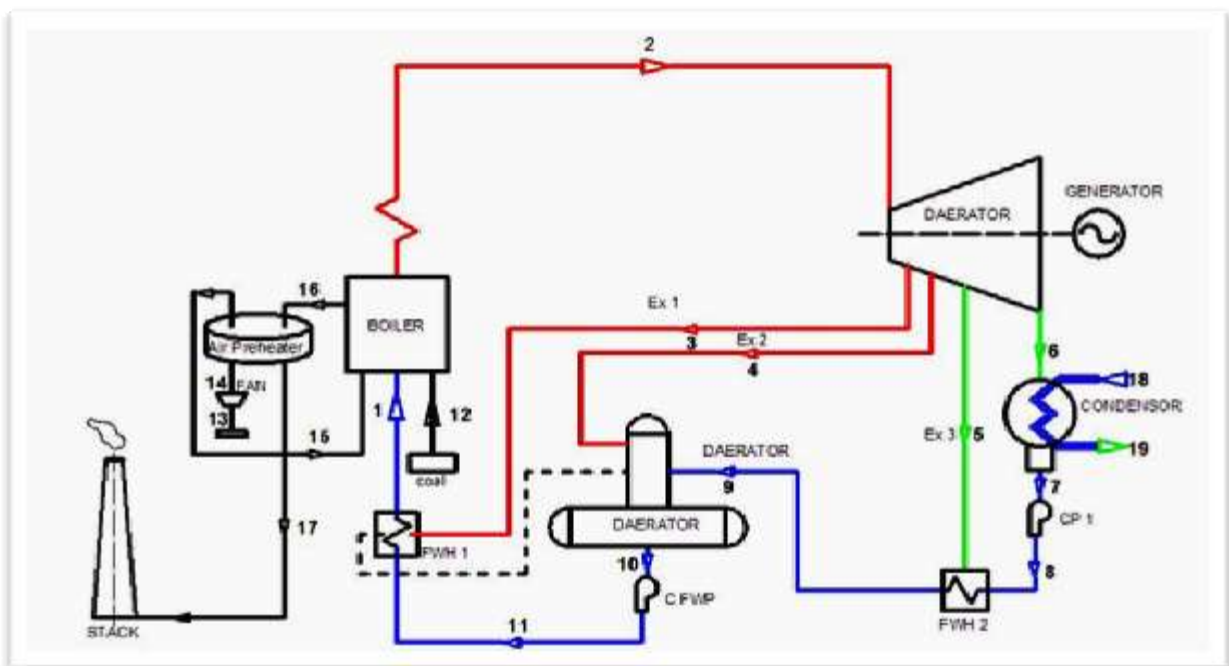
$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (16)$$

Kegunaan penting dari efisiensi eksergi ini adalah untuk menilai kinerja dari sebuah komponen, sistem atau industri yang dapat dibandingkan dengan peralatan serupa lainnya.

Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT. Pusaka Jaya Palu Power tepatnya di kec. Palu Timur (Tawaeli). Sebuah perusahaan yang bergerak di bidang Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) sebagai pemasok kebutuhan listrik di Palu dan sekitarnya. Sistem pembangkit daya Uap atau peralatan yang dijadikan obyek penelitian adalah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap unit 1 Tawaeli.

Diagram Skematis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap Palu serta titik pengambilan data dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar. 1. Diagram Skematis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap Palu

Prosedur penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

- Tahapan identifikasi masalah
- Identifikasi masalah sebagai bahan acuan untuk menganalisis sistem.

- Tahap Pengambilan data
- Pengambilan data dilakukan dengan pengukuran/pengamatan langsung dilapangan secara aktual meliputi: Data primer berupa data operasi, meliputi laju aliran massa, tekanan, temperatur dan daya output-input pada setiap komponen dengan alat

ukur yang terukur langsung. Selain itu dibutuhkan juga data sekunder yang merupakan data tambahan yang terkait dengan obyek yang diteliti. Data ini diperoleh dari manual book peralatan, dokumen dan literatur-literatur perusahaan sebagai informasi yang menunjang penelitian ini. Data ini berupa: data bahan bakar yang digunakan, data spesifikasi komponen utama yang terpasang dilapangan. Data operasi utama yang dicatat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

Daya Output Turbin unit 1= 9.2 MW

Ekstraksi I = 14 bar
 Ekstraksi II = 8.5 bar
 Ekstraksi III = 4 bar
 Main Steam Pressure = 48.20 bar
 Main steam Temperatur = 471.38°C
 Main Steam Flow rate = 17.99 kg/s
 Flow rate bahan bakar (batubara) = 1.43 kg/s
 Tekanan Kondenser = 0.85 bar
 Temperatur lingkungan = 28°C
 Tekanan lingkungan = 1 atm

Metode Analisis

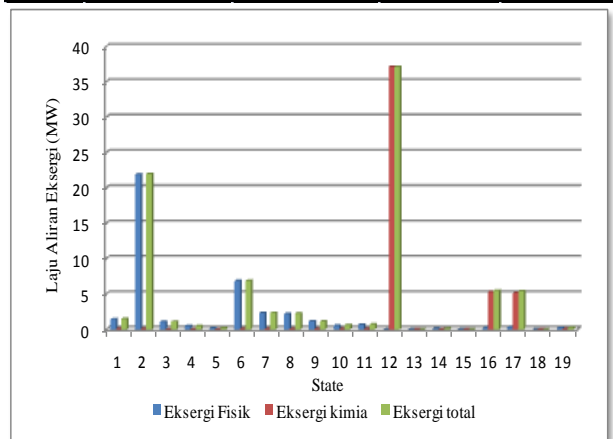
Analisis dimulai penentuan sifat termodinamika berdasarkan hasil pengambilan data, yang meliputi : jumlah kalori bahan bakar batubara, data tekanan udara masuk dan keluar boiler, temperatur udara masuk dan keluar boiler, laju aliran massa bahan bakar, debit bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar. Komponen akhir yang akan dianalisis adalah kinerja hasil pembakaran di ruang bakar, kinerja turbin dan boiler sesuai dengan metode pendekatan eksergi, untuk melihat seberapa besar efisiensi eksergi setiap komponen utama sistem. Kemudian dibandingkan dengan hasil pada awal pengoperasian unit 1 PLTU untuk mengetahui komponen mana yang mengalami penurunan efisiensi yang paling besar.

Hasil dan Pembahasan

Analisis eksergi dari pembangkit daya uap diperoleh dengan persamaan yang diberikan pada uraian sebelumnya. Sifat fisik, kimia dan jumlah laju aliran eksergi udara, gas pembakaran, bahan bakar, uap dan air di berbagai titik dihitung dan dirangkum dalam Tabel 1 dan gambar 2, dengan sumber eksergi utama dari bahan bakar, dalam hal ini adalah batu bara sebesar 37,09 MW.

Tabel 1. Hasil perhitungan eksergi sistem pembangkit daya uap (PLTU) Palu

NO	State	Laju Aliran Eksergi (MW)		
		EPH	ECH	E total
1	Water	1.44	0.0431	1.4783
2	Steam	21.91	0.0416	21.9533
3	Steam	1.08	0.0028	1.0869
4	Steam	0.47	0.0014	0.4679
5	Steam/Water	0.19	0.0007	0.1915
6	Steam/Water	6.83	0.0368	6.8653
7	Water	2.29	0.0368	2.3262
8	Water	2.18	0.0368	2.2190
9	Water	1.10	0.0375	1.1359
10	Water	0.53	0.0389	0.5682
11	Water	0.66	0.0431	0.6995
12	Fuel (Coal)	0	37.0944	37.0944
13	Air	0	0	0
14	Air	0.13	0	0.1275
15	Air	0.01	0	0.0086
16	Flue Gas	0.20	5.2655	5.4675
17	Flue Gas	0.27	5.1261	5.3970
18	Water	0	0	0
19	Water	0.1985	0.0416	0.2401



Gambar. 2. Diagram Skematis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap Palu

Diasumsi bahwa eksergi kimia udara pada titik-titik 13, 14 dan 15 adalah nol, karena komposisi udara pada titik tersebut menyerupai komposisi udara dari kondisi lingkungan (titik acuan). Hal yang sama untuk kondisi air pada titik 18. Tabel 2 memberikan daftar eksergi destruksi dan efisiensi exergetik untuk setiap komponen utama dari pembangkit daya uap PLTU Palu.

Dari tabel 2 berikut diperoleh bahwa eksergi destruksi maksimum terjadi pada boiler sebesar 50.67 % dari total eksergi destruksi.

Tabel 2. Hasil perhitungan eksergi destruksi dan efisiensi eksergetik

Components	Exergy destruction			Percent Exergy (%)
	Rate (MW)	yD* (%)	yD (%)	
Air fan	0.1525	0.68	0.41	45.55
Air pre-heater	0.1895	0.84	0.51	59.27
Boiler	11.4404	50.67	30.84	53.07
Steam turbine	4.1417	18.34	11.17	68.96
Condenser	3.6252	16.06	9.77	47.20
FWH I	0.3082	1.36	0.83	82.75
FWH II	1.2745	5.64	3.44	47.12
Condense Pump	0.1872	0.83	0.50	92.22
CFWP	0.2237	0.99	0.60	75.77
Daerator	1.0356	4.59	2.79	35.43
Overall plant	22.5784	100.00	60.87	24.80

Dapat dilihat dengan jelas dari hasil perhitungan pada Tabel 2 bahwa irreversibilitas terkait dengan reaksi kimia masih merupakan sumber utama eksergi destruksi. Komponen penting lainnya dalam eksergi destruksi adalah turbin uap dan kondensor sebesar 18,34% dan 16,06%, dari total eksergi destruksi keseluruhan sistem pembangkit daya sebesar 22,58 MW. Dan sisanya terjadi pada komponen tambahan lainnya seperti fan, preheater, FWH, pump dan daerator sebesar 14,93%.

Hal yang berbeda jika menggunakan analisis hukum pertama yang biasanya akan memperlihatkan bahwa kehilangan energi terbesar justru terjadi pada kondensor (Szargut 1988). Sejumlah besar kerugian energi pada kondensor melalui kalor terbuang di dalam air pendingin. Meskipun demikian, kalor terbuang di kondensor pada temperatur yang cukup rendah sehingga kualitas energinya pun juga akan rendah.

Dari Tabel 2 juga dapat dilihat mengenai performa komponen dari sisi efisiensi eksergi, di mana hanya *condensate pump* yang memiliki efisiensi eksergi di atas 90% yaitu sebesar 92,22%. Sementara komponen lainnya di bawah 90% yaitu *Air fan*, *air pre-heater*, *boiler*, *steam turbine*, *condenser*, FWH 1, FWH2, CFWP dan *daerator* berturut – turut sebesar : 45,55%, 59,27%, 53,07%, 68,96%, 47,20%, 82,75%, 47,12%, 75,77% dan 35%. Dari hasil ini diperoleh bahwa terdapat komponen *auxiliary* yang memiliki performa yang kurang baik dan perlu mendapat perhatian utama oleh karena efisiensi eksergetik yang hanya bawah 50%. Hal ini tampaknya sesuai dengan kondisi yang diamati di lapangan di mana terdapat adanya kebocoran pada komponen – komponen tersebut selama proses pengambilan data. Secara keseluruhan efisiensi eksergetik dari pembangkit daya uap PLTU Palu sebesar 24,8%.

Dibandingkan dengan efisiensi termal berdasarkan hukum pertama dari *plant* sebesar 37,16 % , dapat

dilihat bahwa efisiensi eksergetik lebih kecil jika dari efisiensi energi , seperti yang ditunjukkan dalam bagian sebelumnya.

Eksergi destruksi pada komponen utama tersebut diakibatkan oleh tiga jenis *irreversibility* yaitu pada reaksi pembakaran, perpindahan kalor dan gesekan. Ketiga jenis *irreversibility* tersebut terjadi pada ruang bakar, dimana reaksi kimia merupakan sumber pemusnahan eksergi yang sangat signifikan dan berhubungan dengan perpindahan kalor, sedangkan pemusnahan eksergi pada turbin uap dan kondensor terutama diakibatkan oleh gesekan.

Pada hakekatnya proses pembakaran dalam boiler merupakan sumber *irreversibility* yang sangat signifikan terhadap pemusnahan eksergi. Maka untuk mengurangi hal tersebut, perlu dilakukan pengecekan secara rutin pada sistem boiler serta perawatan berkala pada peralatan *air preheater*. Hal yang sama juga untuk komponen utama lainnya seperti turbin, kondensor, FWH dan *daerator* harus dilakukan pengecekan secara berkala agar tidak menyebabkan eksergi destruksi menjadi besar, sebagaimana yang diamati di lapangan di mana terdapat kebocoran pada beberapa tempat di sistem pembangkit daya uap.

Kesimpulan

Dari hasil analisis eksergi pada sistem pembangkit daya uap (PLTU) Palu, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini ditinjau saat beban output generator sebesar 9.2 MW dengan total keseluruhan eksergi destruksi sebesar 22.57 MW dengan efisiensi eksergetik 24.80 %.
2. Analisis eksergi menunjukkan bahwa eksergi destruksi utama terjadi didalam boiler sebesar 11.44 MW dengan efisiensi eksergetik 53.07 %, yang diakibatkan *irreversibility* terhadap reaksi kimia proses pembakaran.

Ucapan Terima kasih

Ucapan Terima kasih yang sebesar – besarnya kepada segenap manajemen dan staf PT. Pusaka Jaya Palu Power yang telah memberikan bantuan, masukan dan diskusi terkait dengan penelitian ini, terutama kemudahan akses untuk mendapatkan data yang diperlukan selama penelitian.

Nomenklatur

e	Specific exergy (MJ/kg)
E	Exergy rate (MW)
H	entalpi (kJ/kg)
\dot{m}	Laju aliran massa (kg/s)
S	entropi (kJ/kg.K)

<i>u</i>	<i>energy dalam (kJ/kg)</i>
<i>p</i>	<i>pressure (Nm⁻²)</i>
<i>T</i>	<i>Temperatur (°C or K)</i>
<i>x</i>	<i>Mole fraction</i>
<i>y</i>	<i>Exergy destruction ratio</i>

Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R." Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes". Hemisphere Publishing Corp., New York. (1988).

Greek letters

δ	<i>differential of nonproperty</i>
Δ	<i>difference</i>
ε	<i>exergetic efficiency (%)</i>
ρ	<i>density (kg/m³)</i>

Subscripts

<i>0</i>	<i>Keadaan lingkungan</i>
<i>D</i>	<i>Destruction</i>
<i>F</i>	<i>fuel</i>
<i>Gen</i>	<i>generation</i>
<i>k</i>	<i>mixture component</i>
<i>L</i>	<i>Loss</i>
<i>P</i>	<i>Product</i>
<i>sat</i>	<i>saturated</i>

Superscripts

<i>CH</i>	<i>Chemical</i>
<i>KN</i>	<i>Kinetik</i>
<i>PH</i>	<i>Physical</i>
<i>PT</i>	<i>Potential</i>

Referensi

- Aljundi Isam H. Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. Applied Thermal Engineering Vol:29: 324–328 (2009)
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M. Thermal Design and Optimization. New York: John Wiley & Sons. (1996)
- Cengel, Y.A., Boles, M.A. Thermodynamics: An Engineering Approach. fifth ed.McGraw-Hill, New York. (2006)
- Ehsan, Amirabedin., M.Zeki Yilmazoglu. Design and Exergy Analysis of a Thermal Power Plant Using Different Types of Turkish Lignite. International Journal of Thermodynamics (IJoT) Vol. 14 : 125 - 133 (2011)
- Kaushik S.C., V.Siva Reddy, S.K.Tyagi. Energy and exergy analysis of thermal power plant: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.15:1857-1872 (2011)
- Kotas TJ. The exergy method of thermal power analysis. London: Butterworths (1985)
- Rashad, A, and El Maihy. Energy and Exergy Analysis of a Steam Power Plant in Egypt.13th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY (ASAT- 13), Military Technical College, Kobry Elkobbah, Cairo, Egypt 13:1–12 (2009)