

ANALISIS EKSERGI PADA PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DENGAN CYCLE TEMPO

MARLON HETHARIA
YOLANDA J. LEWERISSA

Jurusan Teknik Mesin
Program Study Diploma IV
Politeknik Saint Paul Sorong
Email : loanz345.rh@gmail.com; ruselloanz@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penelitian pada sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) guna menganalisis secara eksergi dengan menggunakan program Cycle Tempo. Data yang diambil adalah data kesetimbangan energi yang merupakan data penelitian sebelumnya, kemudian dilakukan analisis kesetimbangan eksergi. Kemudian Membuat pemodelan siklus uap (steam cycle) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan menggunakan program Cycle-Tempo untuk dapat mengetahui besarnya prestasi (eksergi).

Berdasarkan hasil perhitungan maka kerugian eksergi atau eksergi destruksi terbesar terjadi pada boiler yaitu sebesar 56,86%, yang merupakan penyebab utamanya adalah reaksi pembakaran, perpindahan panas, dan gesekan. Ketiga penyebab utama tersebut terjadi pada ruang bakar, dimana reaksi kimia merupakan sumber kerugian eksergi yang paling signifikan, yang berhubungan dengan perpindahan panas dari aliran ke aliran. Hasil perhitungan serupa juga dinyatakan pada beberapa referensi yaitu (Ehsan dkk., 2011) dalam analisis eksergi pada PLTU 240 MW di Turki, menyatakan bahwa kerugian eksergi terbesar adalah pada boiler yaitu sebesar 83,29%, (Ganapathy dkk., 2009) dalam analisis eksergi pada PLTU 50 MWe di India, menyatakan bahwa kerugian eksergi terbesar adalah pada boiler yaitu sebesar 42,73%, dan (Yong Li dkk., 2012) dalam analisis eksergi pada PLTU 300 MW, menyatakan bahwa kerugian eksergi terbesar adalah pada boiler dengan beban 100% sebesar 85,34%, beban 75% sebesar 85,77,2% , beban 50% sebesar 85,73% dan beban 30% sebesar 85,60%.

Kata Kunci : Eksergi, PLTU, Efisiensi

ABSTRACT

This study aims to conduct research on the steam power plant (PLTU) system to analyse exergy using the Cycle Tempo program. The data taken is energy balance data which is previous research data, then exergy equilibrium analysis is carried out. Then modelling the steam cycle for the Steam Power Plant (PLTU) using the Cycle-Tempo program to determine the amount of performance (exergy).

Based on the calculation results, the largest exergy loss or exergy destruction occurs in the boiler which is 56.86%, which is the main cause is the combustion reaction, heat transfer, and friction. The three main causes occur in the combustion chamber, where chemical reactions are the most significant source of exergy losses, which are related to heat transfer from flow to flow. Similar calculation results are also stated in several references, namely (Ehsan et al., 2011) in the analysis of exergy in a 240 MW PLTU in Turkey, stating that the largest exergy loss is in the boiler which is 83.29%, (Ganapathy et al., 2009) in the analysis of exergy in a 240 MW PLTU in Turkey, 2009) in the exergy analysis of the 50 MWe PLTU in India, stated that the largest exergy loss was in the boiler which was 42.73%, and (Yong Li et al., 2012) in the exergy analysis of the 300 MW PLTU, stated that the largest exergy loss was in the boiler with 100% load of 85.34%, 75% load of 85.77.2%, 50% load of 85.73% and 30% load of 85.60%.

Keywords: Exergy, Power Plant, Efficiency

PENDAHULUAN

Pertumbuhan beban pada sistem kelistrikan wilayah Papua khususnya sistem kelistrikan mengalami peningkatan yang cukup besar, sehingga kebutuhan daya telah melampaui kemampuan pembangkit yang ada. Melihat kebutuhan tenaga listrik di Papua Barat khususnya di kota Sorong dan pada tahun 2016 telah sangat tinggi, sedangkan kemampuan PLN saat ini masih sangat terbatas. Pembangkit milik PLN yang ada hampir semua dalam kondisi yang kurang baik, ada beberapa yang sudah rusak, semua itu karena mesin sudah tua. Mengingat akan hal ini, maka PT PLN (Persero) sebagai perusahaan negara yang bertugas menyediakan kebutuhan listrik mencanangkan Program Percepatan Pembangunan Pembangkit Listrik.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah Generator yang di hubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering. Dalam PLTU, energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), atau gas. Ada kalanya PLTU menggunakan kombinasi beberapa macam bahan bakar. Konversi energi tingkat pertama yang berlangsung dalam PLTU adalah konversi energi primer menjadi energi panas (kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam pipa ketel untuk menghasilkan uap yang dikumpulkan dalam drum dari ketel. Uap dari drum ketel dialirkan ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator, dan akhirnya energi mekanik dari turbin uap ini dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator.

Analisis dan perancangan sistem siklus uap (Steam Cycle) untuk PLTU dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika siklus sistem dengan metode volume kendali tetap (fixed control volume method) melalui penggunaan kode komputer Cycle Tempo. Cycle Tempo adalah program untuk pemodelan termodinamika dan optimalisasi sistem untuk produksi listrik, panas dan pendinginan. Sistem tersebut terdiri dari beberapa komponen yang saling berhubungan dengan pipa sehingga

membentuk hubungan antara massa dan energi. Tujuan utama dari Cycle Tempo adalah untuk menghitung ukuran massa yang relevan dan aliran energi dalam sistem. Jumlah jenis komponen dan cara penyusunan sehingga saling berhubungan berbeda dari kasus ke kasus, oleh karena itu sistem harus diatur susunan komponen sesuai dengan kebutuhan. Program ini berisi sejumlah besar model untuk komponen dan pipa yang mana kita dapat membuat model sistem sesuai yang diinginkan.

Perangkat lunak ini sangat ideal untuk perancangan konseptual dari suatu sistem pembangkit daya (power plant). Cycle Tempo dapat digunakan untuk memodelkan sistem kogenerasi dengan baik. Dalam perjalanan pengembangan dan penyempurnaan, perangkat lunak ini telah digunakan dan divalidasi untuk optimasi sistem energi. Oleh karena itu Cycle Tempo cukup memadai untuk digunakan dalam pengembangan dan optimasi desain konseptual PLTU.

Sebuah analisis yang lengkap terhadap desain dan analisis mesin termal adalah selain perhitungan energi pada penelitian sebelumnya, maka perlu dilakukan analisis eksergi yang merupakan kerja berguna teoritis minimum yang diperlukan untuk membentuk suatu kuantitas materi dari substansi yang ada di lingkungan.

Dengan dasar pemikiran dan pandangan diatas maka penulis bermaksud melakukan penelitian pada sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) guna menganalisis secara eksergi dengan menggunakan program Cycle Tempo.

KAJIAN PUSTAKA

Konsep Dasar Termodinamika

Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Hukum ini memperkenalkan konsep energi dalam dan menghasilkan prinsip kekekalan energi atau juga dikenal dengan istilah konservasi energi.

Perbandingan Analisa Energi dan Eksergi

Eksergi adalah kerja berguna teoritis maksimum (kerja poros atau listrik) yang diperoleh sebagai interaksi sistem terhadap kesetimbangan perpindahan panas yang terjadi dengan lingkungan. Atau, eksergi adalah kerja berguna teoritis minimum yang diperlukan untuk

membentuk suatu kuantitas materi dari substansi yang ada di lingkungan.

Tabel 1. Perbandingan analisis energi dan eksergi.

Energi	Eksergi
1. Tergantung hanya pada sifat-sifat aliran materi atau energi dan tidak tergantung pada sifat ; lingkungan.	1. Tergantung pada sifat-sifat aliran materi atau energi dan lingkungan.
2. Memiliki nilai yang tidak sama dengan nol jika berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan (termasuk yang sama dengan mc^2 sesuai dengan hukum Einstein)	2. Sama dengan nol dalam keadaan ketika dalam kesetimbangan dengan lingkungan.
3. Dikonservasikan untuk semua proses, berdasarkan Hukum Pertama Termodinamika.	3. Dikonservasikan untuk proses reversibel dan tidak untuk proses nyata (dimana sebagian atau semuanya dimusnahkan karena irreversibilitas), berdasarkan Hukum Kedua Termodinamika.
4. Tidak dapat dimusnahkan ataupun diproduksi	4. Tidak dapat dimusnahkan atau dihasilkan dalam proses reversibel, tetapi selalu dimusnahkan (digunakan) dalam proses irreversibel.
5. Muncul dalam berbagai bentuk (misalnya energi kinetik, energi potensial, kerja, panas) dan diukur dalam bentuk tersebut.	5. Muncul dalam berbagai bentuk misalnya eksergi kinetik, eksergi potensial, kerja, eksergi panas, dan diukur berdasarkan kerja atau kemampuan untuk menghasilkan kerja.

Sumber: [Ibrahim Dincer and Marc A. Rosen; EXERGY, ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, Elsevier, June 2007.]

Analisis Eksergi

Hukum kedua termodinamika memperlihatkan arah perubahan alami distribusi energi dan memperkenalkan prinsip peningkatan entropi. Entropi yang dihasilkan selama proses ini disebut entropi generasi dan dilambangkan oleh S_{gen} . (Bejan, Tsatsaronis and Moran 1996):

$$\Delta S_{sys} = \Delta S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen} \quad (1)$$

Total eksergi fisik yang ditransfer berhubungan dengan aliran zat berdasarkan unit massa dinyatakan dengan (Bejan et al., 1996):

$$e^{PH} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (2)$$

Eksergi fisik berhubungan dengan tekanan dan temperatur aliran zat.

Penyelesaian untuk eksergi kimia bahan bakar adalah (Bejan, Tsatsaronis and Moran 1996):

$$\begin{aligned} \bar{e}_F^{CH} = & \overline{HHV}(T_o, P_o) - T_o \\ & \left[\bar{S}_F + \left(a + \frac{1}{4}b \right) \bar{S}_{O_2} - a\bar{S}_{CO_2} - \frac{1}{2}b\bar{S}_{H_2O} \right] \\ & (T_o, P_o) + \left\{ \begin{array}{l} a\bar{e}_{CO_2}^{CH} + \frac{b}{2}\bar{e}_{H_2O}^{CH} - \\ \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{e}_{O_2}^{CH} \end{array} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

Pada keadaan stedi, laju eksergi volume kontrol diberikan oleh persamaan (Bejan, Tsatsaronis and Moran 1996):

$$\dot{E}_D = \left(1 - \frac{T_o}{T_{ha}} \right) Q + \dot{m} \left[(h_i - h_e) - T_o(s_i - s_e) \right] \quad (4)$$

Dari kesetimbangan laju energi, $Q = m(h_e - h_i)$, maka laju pemusnahan eksergi menjadi (Bejan, Tsatsaronis and Moran 1996):

$$\dot{E}_D = T_o \dot{m} \left[(s_e - s_i) - \frac{h_e - h_i}{T_{ha}} \right] \quad (5)$$

Dimana T_{ha} adalah temperatur termodinamika rata-rata.

Laju pemusnahan eksergi adalah (Bejan, Tsatsaronis and Moran 1996):

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{F_{TOT}}} \quad (6)$$

$$y_D^* = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D_{TOT}}} \quad (7)$$

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{F_{TOT}}} \quad (8)$$

Kesetimbangan laju eksergi sistem tersebut adalah (Bejan, Tsatsaronis and Moran 1996):

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (9)$$

Efisiensi eksergeik (ϵ) adalah (Bejan, Tsatsaronis and Moran 1996):

$$\epsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (10)$$

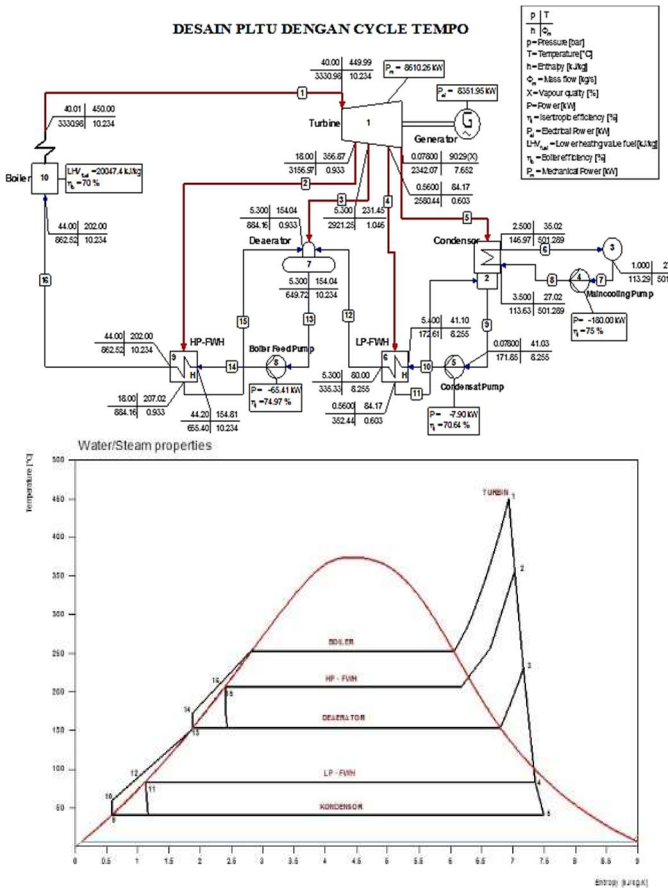
METODOLOGI PENELITIAN

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan data-data teknis (variable desain) berupa data kesetimbangan energi yang merupakan data penelitian sebelumnya, kemudian dilakukan analisis eksergi. Kemudian Membuat pemodelan siklus uap (steam cycle) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan menggunakan program Cycle-Tempo untuk dapat mengetahui besarnya prestasi (eksergi) yang dihasilkan oleh siklus Uap (steam cycle) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) pada berbagai kondisi dengan menggunakan program Cycle-Tempo. Perhitungan laju kesetimbangan eksergi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

PEMBAHASAN

Dari Gambar 1 memperlihatkan data-data awal/data termodinamika dan juga data bahan bakar dimana PLTU menggunakan bahan bakar batubara kalori rendah dengan nilai LHV = 20047,43 kJ/kg.



Gambar 1. Skema PLTU dan Diagram T-s

Data Awal

Tabel 2 memperlihatkan hasil perhitungan kesetimbangan energi untuk setiap komponen PLTU Merauke. Hasil perhitungan ini adalah hasil penelitian sebelumnya, dan dipakai sebagai data awal untuk perhitungan kesetimbangan eksergi. (Hetharia and Lewerissa 2018)

Tabel 2. Data perhitungan kesetimbangan energi

No Pipa	\dot{m} (kg/s)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	E (MW)
1	10,234	40,011	450,00	3330,98	34,0892
		40,000	449,99		
2	0,93342	18,000	356,87	3156,97	2,9468
3	1,0461	5,299	231,45	2921,25	3,0559
4	0,60288	0,560	84,17	2580,44	1,5557
5	7,6516	0,078	41,03	2342,07	17,9206
6	501,29	2,500	35,02	146,97	73,6746
7	501,29	1,000	27,00	113,29	56,7911
8	501,29	3,500	27,02	113,63	56,9616
9	8,2545	0,078	41,03	171,85	1,4185
10	8,2545	5,400	41,10	172,61	1,4248
11	0,60288	0,560	84,17	352,44	0,2125
		0,078	41,03		
12	8,2545	5,300	80,00	335,33	2,7680
13	10,234	5,299	154,04	649,72	6,6492
14	10,234	44,200	154,81	655,4	6,7074
15	0,93342	18,000	207,02	884,16	0,8253
		5,300	154,04		

No Pipa	\dot{m} (kg/s)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	E (MW)
16	10,234	44,000	202,00	862,52	8,8270

sumber data (Hetharia and Lewerissa 2018)

Analisis Eksergi

Berdasarkan data perhitungan kesetimbangan energi (lihat Tabel 2), maka diperoleh kesetimbangan eksergi dari hasil perhitungan pada setiap kondisi aliran (keadaan). Adapun setiap kondisi aliran (keadaan) dapat dilihat pada Tabel 3, berdasarkan nomor pipa dan nilai laju aliran massa \dot{m} (kg/s), tekanan P (bar), temperatur T (°C) serta entalpi h (kJ/kg).

Tabel 3. Data perhitungan kesetimbangan eksergi

No Pipa	E (MW)	Exergy Rates		
		\dot{E}^{PH} (MW)	\dot{E}^{CH} (MW)	\dot{E} (kW)
1	34,0892	12,966	4,9060	17,8716
		12,965		17,8712
2	2,9468	0,9929	0,4475	1,4404
3	3,0559	0,8248	0,5015	1,3263
4	1,5557	0,2355	0,2890	0,5245
5	17,9206	0,8599	3,6680	4,5279
6	73,6746	0,4234	1,2522	1,6756
7	56,7911	0,0104	1,2522	1,2626
8	56,9616	0,1360	1,2522	1,3882
9	1,4185	0,0135	0,0206	0,0341
10	1,4248	0,1804	0,0206	0,0387
11	0,2125	0,1308	0,0015	0,0146
		0,0065		0,0080
12	2,7680	0,1597	0,0206	0,1803
13	6,6492	0,9507	0,0256	0,9762
14	6,7074	0,9987	0,0256	1,0243
15	0,8253	0,1625	0,0023	0,1648
		0,1528		0,1551
16	8,8270	0,1719	0,0256	1,7434

Laju Pemusnahan Eksergi (exergy Destruction Rate) dan Laju Kerugian Eksergi.

Besarnya laju eksergi destruksi sebuah komponen sebanding dengan besarnya aliran masuk komponen (eksergi bahan bakar, $\dot{E}_{F,k}$) dikurangi eksergi aliran keluar komponen (eksergi produk, $\dot{E}_{P,k}$) dan banyaknya kerugian eksergi komponen ($\dot{E}_{L,k}$), dengan menganggap laju kerugian eksergi

Tabel 4. Perhitungan laju eksergi destruksi ($\dot{E}_{D,k}$)

Komponen	Perhitungan
Boiler	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_{16})$ $\dot{E}_{P,k} = (17,872 MW - 1,743 MW)$ $= 16,129 MW$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_{fuel} + \dot{E}_{air}) - (\dot{E}_{ftuegas} + \dot{E}_{ash})$ $\dot{E}_{F,k} = (38,6204 MW + 0,0949 MW) - (0,637 MW + 0,01205)$

Komponen	Perhitungan
	$\dot{E}_{F,k} = 38,078 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (38,078 \text{ MW} - 16,129 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 21,959 \text{ MW}$
Turbin	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{W}_T)$ $\dot{E}_{P,k} = 8,610 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_3 - \dot{E}_4 - \dot{E}_5)$ $\dot{E}_{F,k} = (17,871 \text{ MW} - 1,440 \text{ MW}$ $\quad - 1,326 \text{ MW}$ $\quad - 0,525 \text{ MW}$ $\quad - 4,528 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 10,052 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (10,052 \text{ MW} - 8,610 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 1,442 \text{ MW}$
Kondensor	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_9 + \dot{E}_6)$ $\dot{E}_{P,k} = (0,034 \text{ MW} + 1,676 \text{ MW})$ $\dot{E}_{P,k} = 1,710 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_5 + \dot{E}_{11} + \dot{E}_8)$ $\dot{E}_{F,k} = (4,528 \text{ MW} + 0,008 \text{ MW}$ $\quad + 1,388 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 5,924 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (5,924 \text{ MW} - 1,710 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 4,214 \text{ MW}$
Maincooling Pump	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_8)$ $\dot{E}_{P,k} = 1,388 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_7 - \dot{W}_{MP})$ $\dot{E}_{F,k} = (1,263 \text{ MW} + 0,180 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 1,443 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (1,443 \text{ MW} - 1,388 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 0,055 \text{ MW}$
Condensat Pump	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_{10})$ $\dot{E}_{P,k} = 0,039 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_9 - \dot{W}_{CP})$ $\dot{E}_{F,k} = (0,034 \text{ MW} + 0,0079 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 0,0419 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (0,0419 \text{ MW} - 0,039 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 0,0029 \text{ MW}$
Low Pressure – Feed Water Heater (LP-FWH)	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_{12} - \dot{E}_{10})$ $\dot{E}_{P,k} = (0,180 \text{ MW} - 0,039 \text{ MW})$ $\dot{E}_{P,k} = 0,141 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_4 - \dot{E}_{11})$ $\dot{E}_{F,k} = (0,525 \text{ MW} - 0,015 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 0,510 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (0,510 \text{ MW} - 0,141 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 0,369 \text{ MW}$
Deaerator	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_{13})$ $\dot{E}_{P,k} = 0,976 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_3 + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{15})$ $\dot{E}_{F,k} = (1,326 \text{ MW} + 0,180 \text{ MW}$ $\quad + 0,155 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 1,661 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (1,661 \text{ MW} - 0,976 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 0,685 \text{ MW}$
Boiler Feed Pump (BFP)	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_{14})$ $\dot{E}_{P,k} = 1,024 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_{13} - \dot{W}_{BFP})$ $\dot{E}_{F,k} = (0,976 \text{ MW} + 0,06541 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 1,041 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (1,041 \text{ MW} - 1,024 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 0,017 \text{ MW}$
High Pressure – Feed Water Heater (HP-FWH)	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_{16} - \dot{E}_{14})$ $\dot{E}_{P,k} = (1,743 \text{ MW} - 1,024 \text{ MW})$ $\dot{E}_{P,k} = 0,719 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_2 - \dot{E}_{15})$

Komponen	Perhitungan
	$\dot{E}_{F,k} = (1,440 \text{ MW} - 0,165 \text{ MW})$ $\dot{E}_{F,k} = 1,275 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (1,275 \text{ MW} - 0,719 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 0,556 \text{ MW}$
Menara pendingin	$\dot{E}_{P,k} = (\dot{E}_7)$ $\dot{E}_{P,k} = 1,263 \text{ MW}$ $\dot{E}_{F,k} = (\dot{E}_6)$ $\dot{E}_{F,k} = 1,676 \text{ MW}$ $\dot{E}_{D,k} = (1,676 \text{ MW} - 1,263 \text{ MW})$ $\dot{E}_{D,k} = 0,413 \text{ MW}$

Rasio Eksergi Destruksi

Rasio eksergi destruksi didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$y_D^* = \frac{\text{Rate (MW)}}{\text{Overall Plant Rate}} \times 100\%$$

Dimana *Rate* merupakan nilai dari eksergi destruksi dari setiap komponen ($\dot{E}_{D,k}$) dan *Overall Plant Rate* adalah jumlah keseluruhan eksergi destruksi dari setiap komponen,

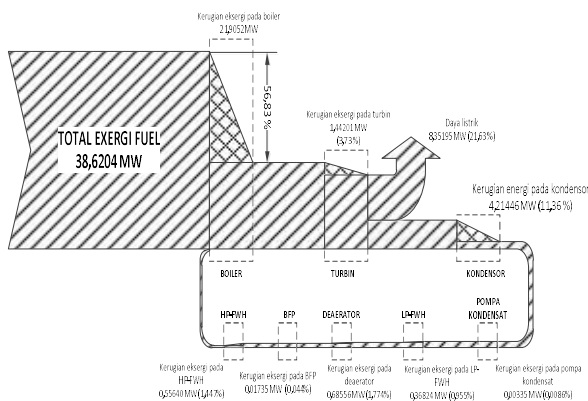
$$y_D = \frac{\text{Rate (MW)}}{\dot{E}_{fuel}} \times 100\%$$

Dimana \dot{E}_{Fuel} adalah laju bahan bakar yang diperuntukan bagi seluruh sistem.

Dimana \dot{E}_{Fuel} adalah 38,6204 MW.

Tabel 5. Perhitungan eksergi destruksi pada komponen utama

No	Komponen	Eksergi Destruksi		
		Rate (MW)	y_D^*	y_D
1	Boiler	21,959	73,904	56,859
2	Turbin	1,442	4,853	3,734
3	Kondensor	4,214	14,182	10,911
4	maincooling pump	0,055	0,185	0,142
5	Condensate pump	0,003	0,010	0,008
6	Low Pressure – Feed Water Heater (LP-FWH)	0,369	1,242	0,955
8	Deaerator	0,685	2,305	1,774
9	Boiler Feed Pump (BFP)	0,017	0,057	0,044
10	High Pressure – Feed Water Heater (HP-FWH)	0,559	1,881	1,447
12	Menara pendingin	0,413	1,390	1,069
Overall Plant		29,716	100	76,944



Gambar 2. Diagram Grassman kesetimbangan eksergi

Kerugian eksergi atau eksergi destruksi terbesar terjadi pada boiler yaitu sebesar 56,86%, yang merupakan penyebab utamanya adalah reaksi pembakaran, perpindahan panas, dan gesekan. Hasil perhitungan serupa juga dinyatakan pada beberapa referensi yaitu (Ehsan and Yilmazoglu 2011) dalam analisis eksergi pada PLTU 240 MW di Turki, menyatakan bahwa kerugian eksergi terbesar adalah pada boiler yaitu sebesar 83,29%, (Ganapathy, et al. 2009) dalam analisis eksergi pada PLTU 50 MWe di India, menyatakan bahwa kerugian eksergi terbesar adalah pada boiler yaitu sebesar 42,73%, dan (Li and Liu (2012)) dalam analisis eksergi pada PLTU 300 MW, menyatakan bahwa kerugian eksergi terbesar adalah pada boiler dengan beban 100% sebesar 85,34%, beban 75% sebesar 85,77,2% , beban 50% sebesar 85,73% dan beban 30% sebesar 85,60%.

Efisiensi eksergetik

Besarnya efisiensi eksergetik sebuah komponen menunjukkan prosentase eksergi input yang diberikan ke sistem ($\dot{E}_{F,k}$), untuk menghasilkan eksergi produk ($\dot{E}_{P,k}$).

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \times 100\%$$

Tabel 6. Perhitungan efisiensi eksergetik komponen utama

No	Komponen	Laju eksergi produk, ($\dot{E}_{P,k}$) (MW)	Laju eksergi bahan bakar, ($\dot{E}_{F,k}$) (MW)	Efisiensi eksergetik, (ε) (%)
1	Boiler	16,129	38,078	42,358
2	Turbin	8,610	10,052	85,655

No	Komponen	Laju eksergi produk, ($\dot{E}_{P,k}$) (MW)	Laju eksergi bahan bakar, ($\dot{E}_{F,k}$) (MW)	Efisiensi eksergetik, (ε) (%)
3	Kondensor	1,710	5,924	28,866
4	maincooling pump	1,388	1,443	96,188
5	Condensate pump	0,039	0,042	93,079
6	Low Pressure – Feed Water Heater (LP-FWH)	0,195	0,564	34,522
7	Deaerator	0,976	1,661	58,760
8	Boiler Feed Pump (BFP)	1,024	1,041	98,367
9	High Pressure – Feed Water Heater (HP-FWH)	1,908	2,464	77,435
10	Menara Pendingin	1,263	1,676	75,358

Efisiensi Siklus

Efisiensi siklus secara hukum termodinamika kedua dihitung sebagai berikut:

$$\text{Gross Thermal Efficiency} = \frac{\text{Total Produced Electric/Mechanical Power}}{\text{Total Exergy Input}}$$

$$\text{Gross Thermal Efficiency} = \frac{8351,95 \text{ kW}}{38620,4 \text{ kW}} = 0,2163 = 21,63 \%$$

$$\text{Net Thermal Efficiency} = \frac{\text{Total Produced Electric} - \text{Total Own Consumption}}{\text{Total Exergy Input}}$$

$$\text{Net Thermal Efficiency} = \frac{8351,95 \text{ kW} - 253,32 \text{ kW}}{38620,4 \text{ kW}} = 0,2097 = 20,97 \%$$

PENUTUP

Berdasarkan hasil perhitungan maka kerugian eksergi atau eksergi destruksi terbesar terjadi pada boiler yaitu sebesar 56,86%, yang merupakan penyebab utamanya adalah reaksi pembakaran, perpindahan panas, dan gesekan. Ketiga penyebab utama tersebut terjadi pada ruang bakar, dimana reaksi kimia merupakan sumber kerugian eksergi yang paling signifikan, yang berhubungan dengan perpindahan panas dari aliran ke aliran.

DAFTAR PUSTAKA

Bejan, Adrian, George Tsatsaronis, dan Michael J. Moran. *Thermal Design and Optimization*. New York: A Wiley-Interscience Publication., 1996.

Ehsan, Amirabedin, dan Zeki Yilmazoglu. “Design and Exergy Analysis of a Thermal Power Plant Using Different Types of Turkish Lignite.” *International*

- Journal of Thermodynamics (IJOT) Vol. 14 (No. 3), 2011: pp. 125-133.*
- Ganapathy, T., N. Alagumurthi, R. P. Gakkhar, dan K. Murugesan. "Exergy Analysis of Operating Lignite Fired Thermal Power Plant." *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2 (1), 2009: 123-130.
- Hetharia, Marlon, dan Yolanda J. Lewerissa. "Analisis Energi Pada Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Dengan Cycle Tempo." *Jurnal Voering Vol. 3 No. 1*, 2018: 23-30.
- Li, Yong, dan Lei Liu. "Exergy Analysis of 300MW Coal-Fired Power Plant." *Elsevier, Energy Procedia 17*, (2012): 926 – 932.