

Exergy and Energy Analysis of a Steam Power Plant Unit 3 at Tanjung Jati B with a Capacity of 660 MW

M.S.K. Tony Suryo Utomo^{1*}, Eflita Yohana¹, Ignatius Apryando M.²

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

²Program Studi Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin, Universitas Diponegoro

*Corresponding author: msktonysu@yahoo.co.id

Abstract. Steam Power Plant (PLTU) Unit 3 Tanjung Jati B generation has an electricity capacity of 660MW. The purpose of this study was to analyze the exergy and energy of each component in Tanjung Jati B Unit 3 Steam Power Plant (PLTU) in ideal and actual conditions using the Cycle Tempo software. If the efficiency of the power plant is good, it can reduce the use of coal which can protect the environment from natural damage. From the results of the study, the greatest exergy destruction in the boiler for the ideal conditions is 875.69 MW with an exergy efficiency of 50.20%, while for the actual conditions 879.94 MW with an exergy efficiency of 49.83%. The smallest exergy destruction in LPH 3 for ideal and actual conditions is 0.6 MW with an exergy efficiency of 91.62%. The largest value of energy losses in the boiler for ideal conditions is 228.37 MW with energy efficiency of 87.19%, while for the actual conditions is 228.89 MW with energy efficiency of 87.17%. The smallest energy loss value at HPH 6, for ideal conditions is 0.65 MW with energy efficiency of 99.33%, while for the actual conditions 0.74 MW with an energy efficiency of 99.24%.

Abstrak. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Pembangkitan Tanjung Jati B unit 3 memiliki kapasitas 660MW. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis eksergi dan energi tiap komponen pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B unit 3 pada kondisi ideal dan aktual menggunakan software Cycle Tempo. Jika efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) baik, hal ini dapat mengurangi penggunaan batu bara yang dapat menjaga lingkungan dari kerusakan alam. Dari hasil penelitian, destruksi eksergi terbesar pada boiler untuk kondisi ideal 875,69 MW dengan efisiensi eksergi 50,20%, sedangkan untuk kondisi aktual 879,94 MW dengan efisiensi eksergi 49,83%. Destruksi eksergi terkecil pada LPH 3 untuk kondisi ideal dan aktual 0,6 MW dengan efisiensi eksergi 91,62%. Nilai energi losses terbesar pada boiler untuk kondisi ideal 228,37 MW dengan efisiensi energi 87,19%, sedangkan untuk kondisi aktual 228,89 MW dengan efisiensi energi 87,17%. Nilai energi losses terkecil pada HPH 6 untuk kondisi ideal 0,65 MW dengan efisiensi energi 99,33% , sedangkan untuk kondisi aktual 0,74 MW dengan efisiensi energi 99,24%.

Kata kunci: *energy conversion, exergy conversion, PLTU, energy losses, destruksi eksergi, Cycle Tempo.*

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Badan Pusat Statistik (BPS) merilis total jumlah penduduk Indonesia tahun 2019 sebesar 268.074.565 jiwa. Indonesia menjadi negara dengan jumlah populasi terbesar keempat di dunia setelah Amerika. Kebutuhan manusia akan energi listrik akan terus meningkat terhadap pertumbuhan penduduk Indonesia yang setiap tahunnya juga terus meningkat. Hal ini menyebabkan pemerintah Indonesia mengupayakan menambah kapasitas listrik sebesar 7000 MW pertahun. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik terbanyak digunakan di Indonesia, karena efisiensinya yang baik. Dasar yang diperlukan untuk analisis termodinamika

pada sistem pembangkit listrik meliputi prinsip hukum kekekalan massa dan konservasi energi, hukum kedua termodinamika, dan data termodinamika [1]. Analisis energi pada pembangkit listrik telah dievaluasi oleh hukum pertama termodinamika dan analisis eksergi dari pembangkit listrik dipelajari oleh hukum kedua termodinamika [2]. Hukum termodinamika pertama secara konvensional digunakan untuk menganalisis pemanfaatan energi, tetapi tidak dapat memperhitungkan aspek kualitas energi. Hal ini yang membuat analisis eksergi menjadi relevan [3]. Penelitian ini menggunakan hukum kedua termodinamika untuk meningkatkan kinerja komponen pembangkit listrik [4]. Analisis energi

dan eksergi dari pembangkit listrik tergantung pada komponen utama seperti *boiler*, turbin, kondenser, dan pompa [5]. Kaushik et al. telah menjelaskan metode analisis energi dan eksergi, yang memberikan kesimpulan bahwa *boiler* adalah komponen utama penghancuran eksergi [6].

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa analisis energi dan eksergi dapat memberikan deskripsi lengkap tentang karakteristik sistem pembangkit listrik [7-9]. Dalam literatur, ada sejumlah penelitian mengenai efisiensi energetik dan efisiensi eksergetik pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Misalnya, Naterer et al [10] melakukan analisis Pusat Listrik tenaga Uap (PLTU) dengan mengukur kerugian pada *boiler* dan turbin. Oktay [9] mempresentasikan destruksi eksergi dan mengusulkan metode peningkatan performa untuk pembangkit listrik di Turki.

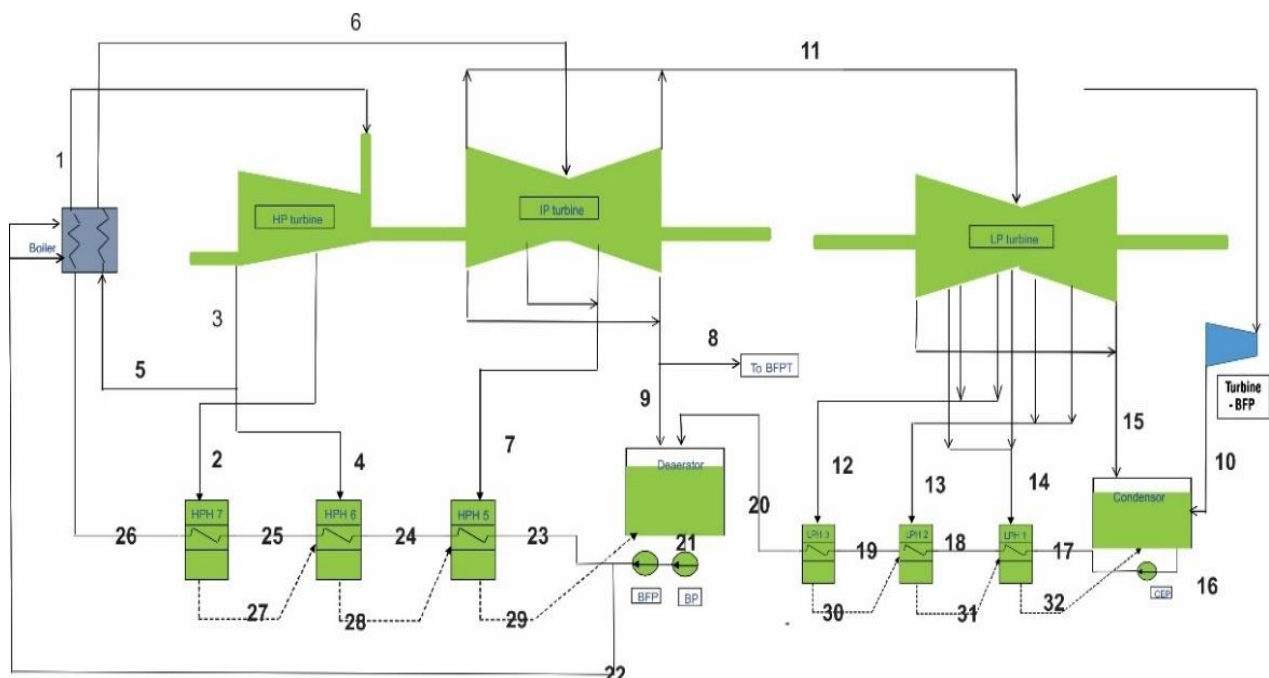
Aljundi [11] menentukan kinerja pusat listrik dengan melakukan estimasi komponen dengan pemodelan komponen efektif secara rinci dari kerugian energi dan eksergi untuk pembangkit listrik tenaga uap di Yordania. Rosen [12] mempresentasikan perbandingan analisis energi

dan eksergi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Verkhivker dan Kosoy [13] melakukan analisis eksergi pada pembangkit listrik.

Berdasarkan uraian dan studi literatur yang telah dijelaskan di atas, maka analisis energi dan eksergi berdasarkan hukum pertama dan kedua termodinamika digunakan untuk mengidentifikasi sumber ketidakefisienan, menentukan lokasi dan besarnya kerugian eksergi yang terjadi agar pusat listrik menjadi optimal. Pada penelitian ini, analisis eksergi dan energi dilakukan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Unit 3 PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan Tanjung Jati B guna meningkatkan optimasi pusat listrik tersebut dengan menggunakan *software Cycle Tempo*.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan perhitungan dan analisis menggunakan *software Cycle Tempo* untuk mendapatkan hasil yang disajikan dalam grafik. Skema PLTU Tanjung Jati B unit 3 seperti pada Gambar1.



Gambar 1. Skema overview penomoran heat balance diagram pada PLTU Tanjung Jati B unit 3.

Penelitian ini dilakukan dengan data-data teknis (variabel desain) berupa data aliran termodinamika Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B unit 3. Kemudian membuat pemodelan siklus uap (*steam cycle*) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan menggunakan *software Cycle Tempo* untuk dapat mengetahui efisiensi energi dan efisiensi eksergi dari pemodelan dan data.

Untuk metodologi penelitian ini, yang pertama kali dilakukan adalah melakukan observasi lapangan yang bertujuan untuk mengumpulkan data-data yang diperlukan. Dari data yang diperoleh selanjutnya dilakukan pemodelan dengan menggunakan *software Cycle Tempo*. Pada proses pemodelan ini dilakukan dengan dua kondisi operasi, yaitu kondisi operasi ideal dan aktual dengan variasi tekanan dan temperatur pada *main steam*. Dari pemodelan tersebut diperoleh hasil dari analisa efisiensi energi dan efisiensi eksergi pada tiap komponen untuk kondisi aktual dan kondisi ideal.

Formula Matematika. Perhitungan energi dalam sebuah sistem aliran yang terbuka, terdapat tiga jenis transfer energi di seluruh kontrol permukaan yaitu, transfer kerja, transfer panas dan energi yang dikaitkan dengan transfer massa. Hukum pertama diterapkan proses *steady flow* pada sistem terbuka. Dalam keadaan stedi, maka sifat-sifat fluida tidak bergantung oleh waktu sehingga $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$ dan $\frac{dE_{cv}}{dt} = 0$.

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

Untuk persamaan kekekalan energi pada volume atur adalah [1]:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum m_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) + \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_s \quad (2)$$

Untuk kekekalan eksergi pada volume atur dapat menggunakan persamaan berikut [1]:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt} + \sum_i \dot{m}_i e_{ti} - \sum_e \dot{m}_e e_{te} - \dot{E}_d \quad (3)$$

Asumsi-asumsi yang digunakan untuk analisis destruksi eksergi pada sistem volume atur untuk Persamaan (3) adalah:

- $\frac{dE_{cv}}{dt} = 0$, $\frac{dV_{cv}}{dt} = 0$, sistem volume atur dalam keadaan tunak.
- Diasumsikan proses adiabatik, karena tidak ada perpindahan panas pada sistem
- $EP = EK = 0$, energi potensial dan energi kinetik diabaikan.

Persamaan efisiensi eksergetik menggunakan persamaan berikut [3].

$$\eta = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_F} \quad (4)$$

Keterangan:

$\frac{dE_{cv}}{dt}$ = Laju perubahan energi pada volume atur

$\frac{dE_{cv}}{dt}$ = Laju perubahan eksergi pada volume atur

Data Parameter Kerja. Data parameter kerja dalam analisis energi dan eksergi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Unit 3 PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan Tanjung Jati B ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Aliran Termodinamika pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B Unit 3.

Stream Id	Aliran massa (kg/s)	Temperatur (°C)	Tekanan (bar)	Fasa fluida
1	607.26	529.80	166.92	Superheated Vapor
2	57.20	413.55	72.35	Superheated Vapor
3	550.06	328.27	40.31	Superheated Vapor
4	41.48	326.22	39.84	Superheated Vapor
5	508.58	328.27	40.31	Superheated Vapor
6	508.58	547.42	36.63	Superheated Vapor
7	33.16	467.41	19.98	Superheated Vapor
8	22.23	333.24	7.78	Superheated Vapor
9	58.53	333.24	7.78	Superheated Vapor

10	22.23	42.70	0.08	Saturated vapor
Lanjutan Tabel 1				
11	394.66	333.24	7.78	Superheated Vapor
12	16.67	199.00	1.11	Saturated Vapor
13	23.89	102.00	1.09	Saturated Vapor
14	10.15	63.10	0.23	Saturated Vapor
15	343.95	56.80		Saturated Vapor
16	416.89	41.62	0.07	Saturated Liquid
17	416.89	42.60	20.46	Compressed Liquid
18	416.89	59.70	0.20	Saturated Liquid
19	416.89	96.00	0.88	Saturated Liquid
20	416.89	119.60	7.41	Saturated Liquid
21	607.26	169.09	7.63	Compressed Liquid
22	5.70	173.24	204.87	Compressed Liquid
23	601.56	173.24	204.87	Compressed Liquid
24	601.56	214.52	20.86	Saturated Liquid
25	601.56	248.40	38.70	Saturated Liquid
26	601.56	286.99	188.06	Saturated Liquid
27	57.20	255.68	43.72	Saturated Liquid
28	98.67	219.27	22.87	Saturated Liquid
29	131.84	178.33	9.65	Saturated Liquid
30	16.67	102.10	1.09	Saturated Liquid
31	40.56	64.80	0.25	Saturated Liquid
32	50.71	47.20	0.11	Saturated Liquid

Dengan data hasil analisis batubara ditunjukkan pada Tabel 2, dengan nilai *High Heating Value* (HHV) sebesar 24306.98 kJ/kg.

Tabel 2. Analisis Batubara Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B Unit 3 .

Parameter	Presentasi parameter (%)
Carbon (ar)	60.08
Hydrogen (ar)	4.92
Nitrogen (ar)	1.11
Sulfur (ar)	0.55
Oxygen (ar)	11.82

Panas spesifik, laju aliran massa, dan temperatur pada gas buang dan pasokan udara ke boiler dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Panas Spesifik , Laju Aliran Massa, dan Temperatur pada Gas Buang dan Pasokan Udara ke Boiler.

Parameter	Panas spesifik (kJ/kg)	Temperatur (°C)	Aliran massa (kg/s)
Gas buang	1.32	148.15	563.06
Pasokan udara ke boiler	1.01	351	563.06

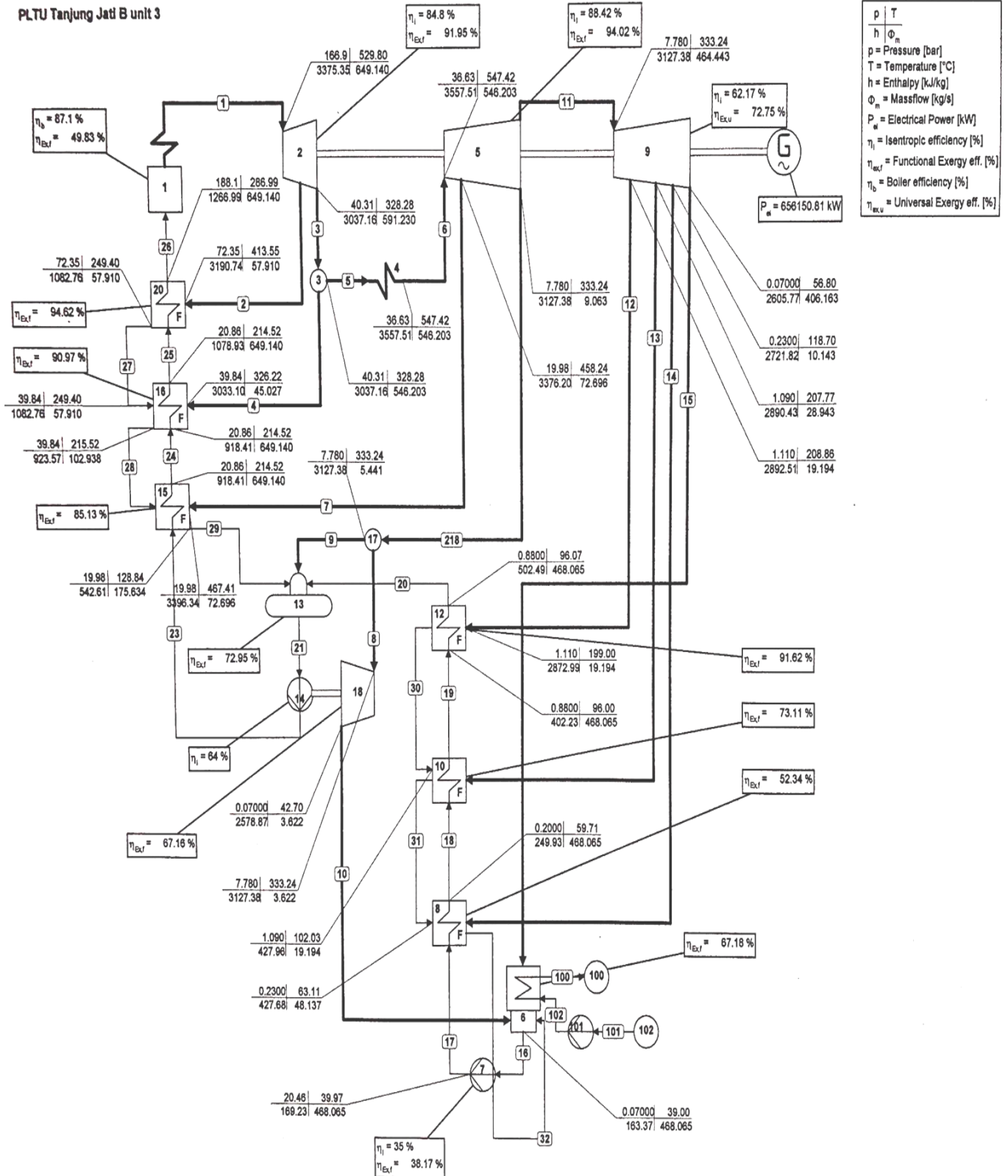
Di kondensor memiliki aliran air pendingin untuk menghitung *heat rejected*. Sifat dari aliran pendingin dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Sifat *Cooling Water*.

Densitas (kg/m ³)	Panas spesifik (kJ/kg)	Temperatur masuk (°C)	Temperatur keluar (°C)	Aliran massa (m ³ /min)
994	4.178	29.93	41.62	920

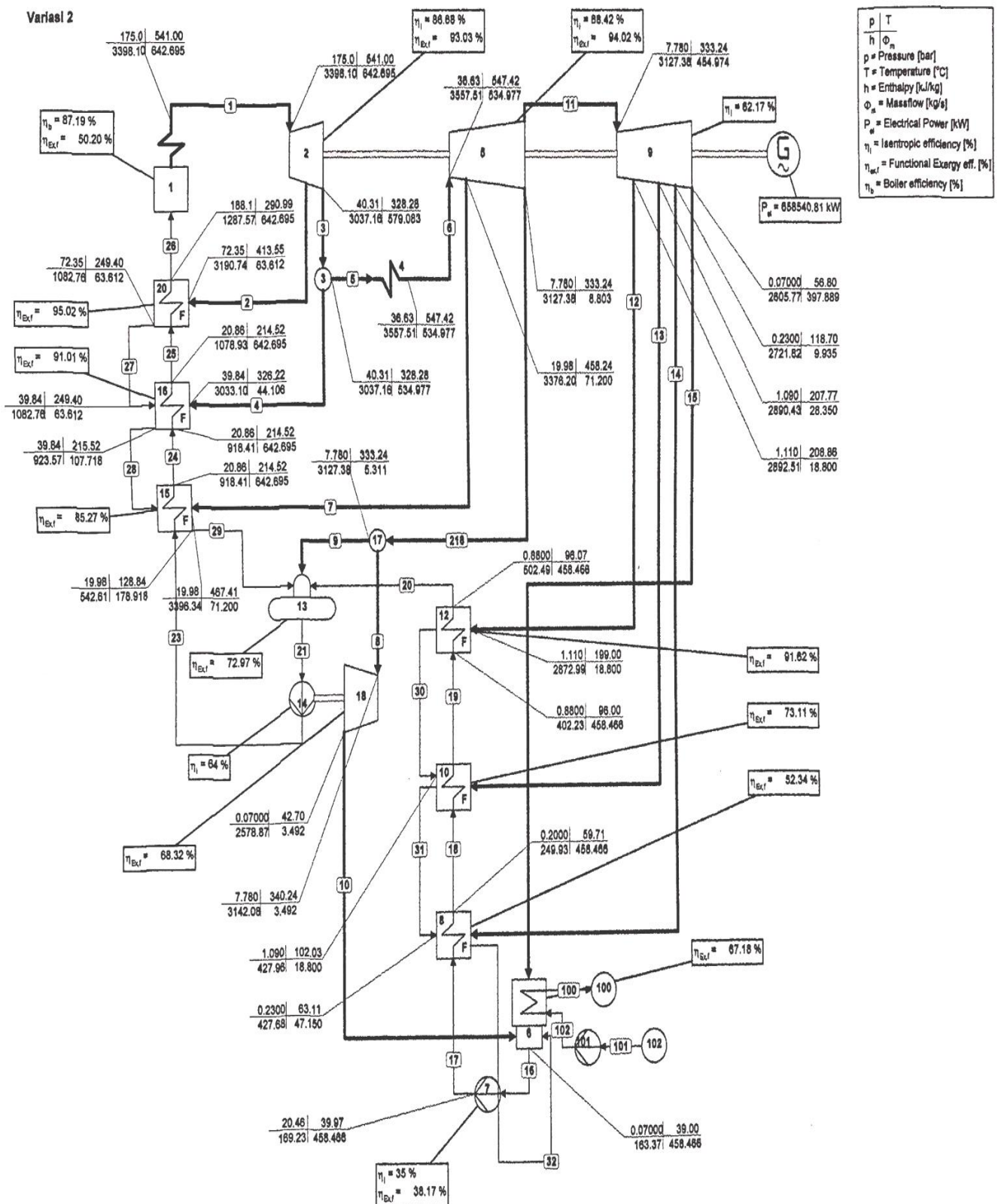
Analisis Energi dan Eksergi. Analisis energi dan eksergi dapat memberikan pemahaman yang lebih baik untuk menentukan ketersediaan dan pemanfaatan sumber energi. Eksergi adalah potensi kerja maksimum yang dapat diperoleh dari energi dan dikaitkan dengan transfer kerja dan irreversibilitas. Analisis energi memberikan kerugian energi kuantitatif yang terlibat dalam berbagai komponen sistem. Sedangkan analisis eksergi memberikan kerugian energi yang kualitatif. Analisis eksergi adalah metode yang menggunakan konservasi massa dan prinsip konservasi energi yang mengikuti hukum kedua termodinamika. Pemodelan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B unit 3 menggunakan *software Cycle Tempo* dari data aktual dapat dilihat pada Gambar 3.

PLTU Tanjung Jati B unit 3



Gambar 3. Skema Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tanjung Jati B Unit 3 menggunakan Cycle Tempo

Untuk pemodelan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B unit 3 pada kondisi operasi ideal dengan variasi tekanan dan temperatur pada *mainsteam*, dengan tekanan 175 bar dengan temperatur 541° C dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tanjung Jati B Unit 3 ideal menggunakan Cycle Tempo.

Hasil dan Pembahasan

Data diperoleh dari *performance test* Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B Unit 3. Dari data dapat digunakan untuk analisis energi dan eksergi. Untuk analisis energi dan eksergi adalah sebagai berikut :

Hasil Analisis Efisiensi Energetik dan Efisiensi Eksergetik. Analisis energi meliputi nilai energi *losses* dan efisiensi energi. Untuk analisis eksergi meliputi nilai destruksi eksergi dan

efisiensi eksergi. Hasil analisis energi dan eksergi dari pemodelan Pembangkit Listrik Tanjung Jati B Unit 3 untuk kondisi aktual dan kondisi ideal dapat dilihat pada Tabel 5 .

Nilai efisiensi energi dan eksergi untuk kondisi operasi ideal memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan nilai efisiensi untuk kondisi operasi aktual. Hal ini dikarenakan perbedaan pada nilai tekanan dan temperatur pada *mainsteam*.

Tabel 5. Hasil Analisis Energi dan Eksergi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Unit 3 PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan Tanjung Jati B pada Kondisi Aktual dan Ideal.

KOMPONEN		Energy Losses (MW)	Efisiensi Energi (%)	Destruksi Eksergi (MW)	Efisiensi Eksergi (%)
Boiler	Kondisi Aktual	228,89MW	87,17%	879,94 MW	49,83%
	Kondisi Ideal	228,37 MW	87,19%	875,69 MW	50,20%
Kondensor	Kondisi Aktual	146,88 MW	81,89%	27,36 MW	67,18%
	Kondisi Ideal	146,88 MW	81,89%	27,36 MW	67,18%
HPH 7	Kondisi Aktual	1,11 MW	99,06%	2,56 MW	94,62%
	Kondisi Ideal	1,01 MW	99,15%	2,51 MW	95,02%
HPH 6	Kondisi Aktual	0,74 MW	99,24%	1,81 MW	90,97%
	Kondisi Ideal	0,65MW	99,33%	1,77 MW	91,01%
HPH 5	Kondisi Aktual	0,99 MW	99,06%	8,55 MW	85,13%
	Kondisi Ideal	0,90 MW	99,15%	8,51MW	85,27%
LPH 3	Kondisi Aktual	2,22 MW	94,38%	0,60 MW	91,62%
	Kondisi Ideal	2,51 MW	93,59%	0,60 MW	91,62%
LPH 2	Kondisi Aktual	3,39 MW	94,38%	2,54 MW	73,11%
	Kondisi Ideal	3,38 MW	94,38%	2,54 MW	73,11%
LPH 1	Kondisi Aktual	1,64 MW	94,04%	1,49 MW	52,34%
	Kondisi Ideal	1,55 MW	94,38%	1,50 MW	52,34%
Daerator	Kondisi Aktual	59,39 MW	87,95%	24,95 MW	72,95%
	Kondisi Ideal	59,19 MW	87,98%	24,88 MW	72,97%

Untuk hasil perhitungan analisis energi dan efisiensi eksergi berdasarkan keadaan isentropik dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Analisis Energi dan Eksergi Isentropik pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Unit 3 PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan Tanjung Jati B pada Kondisi Aktual dan Ideal.

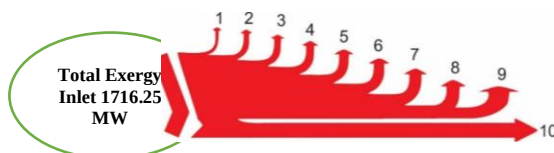
		Energy Losses (MW)	Efisiensi Energi (%)	Destruksi Eksergi (MW)	Efisiensi Eksergi (%)
HPT	Kondisi Aktual	43,05 MW	84,80%	22,29 MW	91,95%
	Kondisi Ideal	46,97 MW	86,68%	20,74 MW	93,03%
IPT	Kondisi Aktual	34,49 MW	88,42%	14,15 MW	94,02%
	Kondisi Ideal	34,49 MW	88,42%	14,15 MW	94,02%
LPT	Kondisi Aktual	110,10 MW	62,17%	61,98 MW	72,75%
	Kondisi Ideal	110,10 MW	62,17%	61,98 MW	72,75%
BFPT	Kondisi Aktual	0,12 MW	99,04%	5,56MW	67,16%
	Kondisi Ideal	0,12MW	99,04%	5,56MW	67,16%
CEP	Kondisi Aktual	0,78 MW	35,00%	1,76 MW	38,17%
	Kondisi Ideal	0,78 MW	35,00%	1,76 MW	38,17%
BP-BFP	Kondisi Aktual	13,28 MW	64%	8,44 MW	56,22%
	Kondisi Ideal	13,28 MW	64%	8,43 MW	56,22%

Diagram Grassman. Dengan menggunakan hasil perhitungan eksergi dan laju destruksi eksergi, maka diagram Grassman aliran eksergi pada Pembangkit listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B unit 3 dapat dianalisis. Laju destruksi eksergi per komponen pada kondisi aktual ditunjukkan pada Tabel 7, dan untuk kondisi ideal ditunjukkan pada Tabel 8. Pada penelitian Sairam Adibhatla dan Kaushik S.C. (2014), diperoleh nilai destruksi eksergi boiler 1196 MW.

Tabel 7. Destruksi Eksergi untuk di Plot ke Diagram Grassman

Komponen	Destruksi eksergi (MW)	Presentasi destruksi eksergi (%)
CEP	1.76	0.10%
BFP	8.44	0.49%
LPH	4.63	0.27%
BFPT	5.56	0.32%
HPH	12.92	0.75%
Deaereter	24.95	1.45%
Turbin	96.75	5.51%
Kondensor	27.36	1.59%
Boiler	879.94	51.27%
Net Power Output	656.15	38.23%

Dari Tabel 7 dapat dibentuk sebuah Grassman diagram. Untuk Grassman diagram dapat dilihat pada Gambar 5.

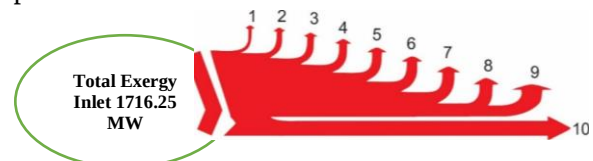


Gambar 5. Diagram Grassman Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B unit 3

Tabel 8. Destruksi Eksergi Kondisi Ideal di Plot ke Diagram Grassman

Komponen	Destruksi eksergi (MW)	Presentasi destruksi eksergi (%)
CEP	1.76	0.10%
BFP	8.43	0.49%
LPH	4.60	0.27%
BFPT	5.56	0.32%
HPH	12.79	0.75%
Deaereter	24.88	1.45%
Turbin	94.64	5.64%
Kondensor	27.24	1.59%
Boiler	875.69	51.02%
Net Power Output	658.54	38.37%

Tabel 8 adalah tabel destruksi eksergi dari PLTU Tanjung Jati B untuk *mainsteam* keadaan ideal. Dari tabel dapat dibentuk sebuah Grassman diagram. Untuk Grassman diagram dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Grassman Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B unit 3 untuk *mainsteam* keadaan ideal.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, destruksi eksergi terbesar terletak pada *boiler* untuk kondisi ideal sebesar 875,69 MW dengan efisiensi eksergi 50,20%. Sedangkan untuk kondisi aktual sebesar 879,94 MW dengan efisiensi eksergi 49,83%. Destruksi eksergi terkecil terletak pada LPH 3. Destruksi eksergi LPH 3 baik kondisi ideal maupun aktual sebesar 0,6 MW dan efisiensi eksergi sebesar 91,62%. Nilai energi *losses* terbesar terletak pada boiler untuk kondisi ideal sebesar 228,37 MW dengan efisiensi energi 87,19%. Sedangkan untuk kondisi aktualnya sebesar 228,89 MW dengan efisiensi energi 87,17%. Nilai energi *losses* terkecil terletak pada HPH 6 untuk kondisi ideal sebesar 0,65 MW dengan efisiensi energi 99,33%. Sedangkan untuk kondisi aktual sebesar 0,74 MW dengan efisiensi energi 99,24%.

Penghargaan

Ucapan terima kasih kepada PT. PLN Tanjung Jati B Jepara karena telah memberikan kesempatan untuk melakukan proses pengumpulan data sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Ucapan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro yang sangat membantu penelitian ini.

Referensi

- [1] Moran MJ, Shapiro HN. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5th Edition. Vol. 181, Nature. 2006. 1-107 p.
- [2] Cengel YA, Boles MA. Thermodynamics an Engineering aproach. 55th ed. Mexico : Mc GrawHill ; 2011.
- [3] A. Bejan, G. Tsatsaronis MM. Thermal design and optimization. Vol. 21, Energy. New York: Wiley; 1996. 433-434 p.

- [4] Handa, P. Singh, Shah, I. Hussain. First law and second law analysis of a lignite fired boiler used in a 30MWe thermal power plant, J.Eng. Innov. Tech. 1 (2012) 84-88.
- [5] Kumar,R., Berry A., Kumar M. dan Manchanda H. Energy and Exergy Analysis of a 250 mw Coal Thermal Power Plant at Design Load Conditions. International Journal for Research. (IJRASET) Vol. 5, Issue 11 ; 2017
- [6] Kaushik SC, Reddy VS, Tyagi SK. Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. Renew Sustain Energy Rev [Internet]. 2011;15(4):1857–72.
- [7] Butcher CJ, Reddy B V. Second law analysis of a waste heat recovery based power generation system. Int J Heat Mass Transf. 2007;50(11–12):2355–63.
- [8] Ganapathy T, Alagumurthi N, Gakkhar RP, Murugesan K. Exergy analysis of operating lignite fired thermal power plant. J Eng Sci Technol Rev. 2009;2(1):123–30.
- [9] Oktay Z. Investigation of coal-fired power plants in Turkey and a case study: Can plant. Appl Therm Eng. 2009;29(2–3):550–7.
- [10] Regulagadda P, Dincer I, Naterer GF. Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses. Appl Therm Eng. 2010;30(8–9):970–6.
- [11] Aljundi IH. Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. Appl Therm Eng. 2009;29(2–3):324–8.
- [12] Rosen MA. Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants. Exergy, An Int J. 2002;1(3):180–92.
- [13] Verkhivker GP, Kosoy B V. On the exergy analysis of power plants. 2001;42