



ANALISIS LAJU KERUSAKAN EKSERGI DAN EFISIENSI EKSERGI PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Oleh

Ahmad Rifai¹, Viktor², Naubnome³, Aripin

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Indonesia

Email: ¹ahmadrifai.ar666@gmail.com, ²arifin@staff.unsika.ac.id,

Abstrak

Eksergi merupakan metode untuk menganalisa kerja maksimum yang mampu dilakukan suatu sistem terhadap lingkungan sekitar sistem dimana konsep ini menggunakan hukum pertama dan kedua termodinamika. Analisis eksergi dapat menunjukkan lokasi degradasi energi dalam proses yang dapat menyebabkan peningkatan operasi atau teknologi dari sebuah sistem pembangkit daya. Penelitian ini untuk mencari kerusakan eksergi dan efisiensi pada tiap komponen, penelitian ini dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Babelan Bekasi, hasil yang diperoleh pada studi ini menunjukkan bahwa kerugian terbesar terjadi pada boiler yaitu 249,21 MW atau sekitar 89,83% dari total kerusakan eksergi keseluruhan sistem sebesar 279,58 MW kemudian berturut-turut pada turbin uap sebesar 15,09 MW(5,39%), kondenser 12,54 MW(4,48%), pemanas tekanan rendah 1 1 MW(0,35%), pemanas tekanan rendah 2 0,3 MW(0,1%), daerator 0,41 MW(0,15%), pemanas tekanan tinggi 1 1,01 MW(0,36%), pemanas tekanan tinggi 2 0,02 MW(0,06%). Persentasi efisiensi eksergi boiler sebesar 40,54%, turbin uap sebesar 75,05%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pembakaran di dalam boiler merupakan sumber irreversibilitas yang sangat signifikan terhadap kerusakan eksergi pada sistem pembangkit uap di PLTU Babelan.

Kata Kunci: Eksergi, Analisis, Efisiensi, Irreversibilitas, Performansi

PENDAHULUAN

Menurunnya performa dari kerja mesin suatu pembangkit listrik biasanya disebabkan oleh faktor adanya rugi-rugi energi yang berlebihan. Hilangnya energi dengan jumlah yang besar pada sebuah komponen mesin pembangkit listrik dapat terjadi di salah satu maupun lebih pada komponen mesin. Oleh karena itu, perlu dilakukan perhitungan dan untuk mengetahui efisiensi dari suatu pembangkit dengan cara meng efisiensi energi dan eksergi yang juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis, penyebab, dan tempat terjadinya kerugian atau kehilangan panas pada sistem tersebut ataupun pada sub-sistem termal, sehingga perbaikan-perbaikan dan juga peningkatan kualitas dapat dilakukan. Salah satu cara yang digunakan untuk mengoptimalkan sistem pembangkit adalah dengan melakukan efisiensi eksergi [9].

Salah satu analisis yang digunakan untuk meningkatkan performansi adalah dengan menggunakan metode eksergi. Metode eksergi ini menganalisis kerja maksimum yang mampu dilakukan suatu sistem terhadap lingkungan sekitar sistem. Umumnya lingkungan dispesifikasi oleh kondisi temperatur, tekanan dan komposisi kimia. Menentukan efisiensi eksergi untuk sistem secara keseluruhan ataupun setiap komponen yang membentuk sebuah sistem merupakan bagian utama dari eksergi. Suatu yang komprehensif dari sistem termodinamika mencakup energi dan eksergi untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang kondisi dari sistem [13]. Analisis eksergi menjadi kunci aspek dalam penyediaan pemahaman yang lebih baik mengenai desain, evaluasi, dan penentuan kondisi kerja pembangkit serta menunjukkan kerugian akibat irreversibilitas dalam situasi

nyata, sehingga dapat digunakan untuk mencapai nilai efisiensi yang ideal [7].

Penelitian Muhamad Difa Dharmakusuma^{1*}, Belyamin¹ Dan Widyatmoko¹ pada tahun 2020 “Analisis Eksergi Pada Boiler Pltu” penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi yang terjadi pada boiler, karena boiler mempunyai pengaruh penting terhadap penghematan energi. Efisiensi boiler dapat ditingkatkan dengan memaksimalkan perpindahan panas dan *heat loss*. Boiler yang digunakan untuk objek penelitian yaitu boiler PLTU Makmur Sejahtera Wisesa 2 x 30 MW Kalimantan Selatan. Dari hasil penelitian didapatkan hasil boiler PLTU memiliki efisiensi energi dan eksergi masing-masing 96,88% dan 34,62% [10]. Penelitian yang dilakukan oleh Riyan Phanama, Yohanes M Simanjuntak, Muhammad Ivanto pada tahun 2019 dengan judul “Analisa Eksergi Sistem Pembangkit Tenaga Uap (PLTU) di PT. Indonesia Power Unit Jasa Pembangkit Sanggau” Dalam penelitian ini, nilai laju eksergi diperoleh dari pengukuran tekanan dan temperatur sistem serta temperatur dan tekanan lingkungan, kemudian nilai laju kerusakan eksergi dihitung dari perbedaan nilai laju eksergi input dan nilai laju eksergi output sistem. [7].

Dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi sistem pembangkit listrik dengan menggunakan hukum kedua termodinamika yaitu dengan metode eksergi dan bertujuan untuk mengetahui kerusakan eksergi terbesar pada komponen PLTU.

LANDASAN TEORI

Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida yang bergerak. Siklus Rankine adalah model operasi mesin uap panas yang secara umum ditemukan di pembangkit listrik. Sumber panas yang utama untuk siklus Rankine

adalah batu bara, gas alam, minyak bumi, nuklir dan panas matahari.

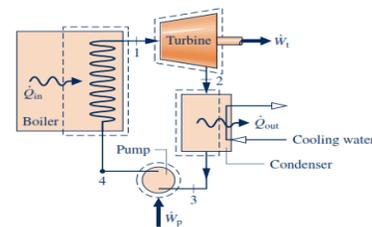
Fluida siklus Rankine mengikuti aliran tertutup dan digunakan secara konstan. Berbagai jenis fluida dapat digunakan pada siklus ini, namun air dipilih karena berbagai karakteristik fisika dan kimia.

Sistem siklus Rankine ideal terdiri dari empat komponen yaitu:

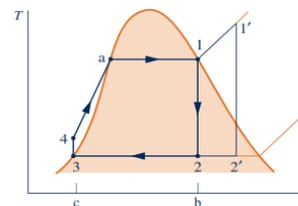
1. Boiler
2. Turbin
3. Kondenser
4. Pompa

Siklus Rankine Ideal

Siklus Rankine merupakan siklus ideal untuk siklus tenaga uap. Pada siklus Rankine terdapat proses kompresi isentropik, proses isobarik, ekspansi isentropik dan pelepasan isobarik. Skematik siklus Rankine sebagai



berikut :



Gambar 1 Skematik siklus Rankine

Gambar 2 Diagram T-S siklus Rankine

Proses 1-2 : ekspansi isentropik dari fluida kerja uap jenuh tingkat keadaan 1, menuju tekanan kondensator.

Proses 2-3 : perpindahan panas dari fluida kerja saat melalui kondensator pada tekanan konstan tingkat keadaan 3, cair jenuh.

Proses 3-4 : kompresi isentropik di dalam pompa menuju tingkat keadaan 4, di dalam daerah fasa cair



Proses 4-1 : perpindahan panas ke fluida kerja saat melalui boiler pada tekanan konstan menuju tingkat keadaan 1, untuk menyelesaikan siklus.

Eksergi

Eksergi adalah kerja teoritis maksimum yang dapat diperoleh dari sistem keseluruhan yang terdiri dari suatu sistem dan lingkungan ketika sistem mencapai kesetimbangan dengan lingkungan. Umumnya lingkungan dispesipikasikan oleh temperatur, tekanan dan komposisi kimia. Eksergi suatu sistem akan meningkat jika terjadi kerja pada sistem. Eksergi itu kekal hanya ketika semua proses dari sistem dan lingkungan dalam keadaan *reversible*. Eksergi dapat dihancurkan jika terjadi proses *irreversible*. Eksergi dapat berpindah melewati batas suatu sistem, Perpindahan eksergi berlangsung bersama dengan perpindahan panas tergantung temperatur sistem terhadap lingkungan.

Analisis Eksergi

Eksergi sebuah aliran (*steam*) 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.

Adapun sifat ekstensif pada sistem dibagi menjadi dua komponen, eksergi fisik, dan eksergi kimia.

1. Eksergi fisik

Eksergi fisik adalah kerja yang diperoleh melalui proses reversible dari kondisi temperatur dan tekanan awal ke kondisi yang ditentukan berdasarkan tekanan dan temperatur lingkungan. Untuk eksergi fisik ditentukan dengan persamaan:

$$E^{ph} = (U - U_o) + p_o(V - V_o) - T_o(S - S_o) \dots \dots (1)$$

Keterangan :

- E^{ph} = Eksergi fisik (W)
- U = Energi dalam sistem (kJ/kg)
- V = Volume (m^3/kg)
- S = Entropi (kJ/kg K)
- U_o = Energi dalam lingkungan (kJ/kg)
- V_o = Volume lingkungan (m^3/kg)
- S_o = Entropi lingkungan (kJ/kg K)
- p_o = Tekanan lingkungan (atm)
- T_o = Temperatur lingkungan (K)

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 :

$$E = E^{PH} + E^{CH} + E^{KN} + E^{PT}$$

Dengan menelaah dalam sistem yang diam relatif terhadap lingkungan ($E^{KN} + E^{PT} = 0$) dalam analisis sistem termal terdapat 2 macam eksergi yang digunakan yaitu eksergi fisik dan eksergi kimia. Eksergi fisik merupakan kerja yang diperoleh melalui substansi melewati proses reversible dari kondisi temperatur T dan tekanan awal P ke kondisi yang ditentukan berdasarkan temperatur T_o dan tekanan lingkungan P_o [7].

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m} (h_i - h_o) - T_o (s_i - s_o)$$

Keterangan :

- E_{PH} : Eksergi fisik (kW)
- \dot{m} : Laju aliran fluida (kg/s)
- h : Entalpi fluida (kJ/kg)
- h_o : Entalpi lingkungan (kJ/kg)



- T_o : Temperatur lingkungan (K)
- s : Entropi fluida (kJ/kg K)
- s_o : Entropi lingkungan (kJ/kg K)

Eksergi lainnya setelah eksergi fisik adalah eksergi kimia dimana Eksergi kimia E^{CH} (bahan bakar, campuran gas dan hasil produk pembakaran) dapat didapatkan dari tabel eksergi kimia standar Pada prinsipnya, standar kimia bahan baka rmempertimbangkan suatu zat dengan zat lain pada kondisi ideal yang tidak tercampur. Untuk bahan bakar hidrocarbon murni C_aH_b pada temperatur T_o dan tekanan P_o tekanan dalam sistem bereaksi dengan oksigen untuk membentuk karbon dioksida dan air. Eksergi kimia bahan bakar gas hidrokarbon dapat juga dengan berdasarkan spesifikasi lingkungan ditulis dengan persamaan berikut:

$$E^{CH} = \dot{m} \times e^{CH}$$

Keterangan:

- E^{CH} : Eksergi kimiawi (kW)
- \dot{m} : Laju aliran fluida (kg/s)
- e^{CH} : Nilai eksergi molar (kJ/kmol)

Dengan nilai eksergi molar dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan :

$$e^{CH} = \frac{e^{-CH}}{M}$$

Keterangan:

- e^{CH} : Eksergi molar (kJ/kmol)
- e^{-CH} : eksergi molar standard (kJ/kmol)
- M : Massa molekul relatif (kg/kmol)

Dengan nilai eksergi molar standar didapatkan dari table C1 dan C2 pada buku *Thermal Design and Optimization*

Kerusakan Eksergi

Irreversibilitas juga dapat disebut kerusakan eksergi atau eksergi *loss*. Ketika suatu sistem terjadi proses *Irreversible* maka pada sistem tersebut terjadi kerusakan eksergi atau eksergi *loss*. Kerusakan eksergi dihitung dengan cara mengambil perbedaan antara eksergi masuk dan eksergi keluar sistem, persamaan kerusakan eksergi sebagai berikut:

$$E_D = E_{in} - E_{out} \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

$$E_D = \text{Eksergi } destruction \text{ (W)}$$

- E_{in} = Eksergi masuk sistem (W)
- E_{out} = Rasio eksergi destruksi ke sistem adalah perbandingan antara laju

Efisiensi Eksergi

Dalam mendefinisikan efisiensi eksergetik perlu untuk mengidentifikasi baik produk dan bahan bakar untuk sistem termodinamika yang di. 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.

Efisiensi eksergi adalah perbandingan antara produk dan bahan bakar, yaitu :

$$\varepsilon = 1 \left(\frac{E_D}{E_F} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan :

- ε = Efisiensi eksergi (W)
- E_D = Eksergi *destruction* (W)
- E_{Ftot} = Laju eksergi bahan bakar yang diberikan ke dalam sistem secara keseluruhan (W)

Rasio destruksi eksergi yang merupakan perbandingan laju destruksi eksergi di dalam komponen sebuah sistem terhadap laju eksergi dari bahan bakar yang diberikan ke seluruh sistem dengan persamaan sebagai berikut:

$$y_{D*} = \frac{E_D}{E_F}$$

Dimana :

- y_D : Rasio kerusakan eksergi
- E_D : Eksergi *destruction* (kW)
- E_F : Eksergi bahan bakar (kW)

Laju eksergi destruksi komponen dapat dibandingkan dengan total laju eksergi destruksi di dalam sistem E_{Dtot} dengan persamaan sebagai berikut:

$$y_{D*} = \frac{E_D}{E_{Dtot}}$$

Dimana :

- y_D : Rasio kerusakan eksergi
- E_D : Eksergi *destruction* (kW)
- E_{Dtot} : Eksergi *destruction* total (kW)

Efisiensi eksergetik adalah rasio dari produk terhadap bahan bakar yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{E_D}{\dot{E}_F} \right) \quad (2.9)$$

Dimana :

- ε : Efisiensi eksergi (kW)
- E_D : Eksergi *destruction* (kW)
- \dot{E}_F : Laju eksergi bahan bakar yang diberikan ke dalam sistem

Nilai eksergi kimia bahan bakar ditentukan dengan menggunakan Persamaan :

$$E_F^{CH} = \beta \times LHV \quad (2.10)$$

Dimana :

- E_F^{CH} : Eksergi kimia bahan bakar (kW)
- β : Rasio eksergi
- LHV: Lower Heating Value (kJ/kg)

Nilai rasio eksergi bahan bakar hidrokarbon β terhadap nilai LHV bahan bakat dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\beta = 1.0437 + 0.1882 \left(\frac{H}{C} \right) + 0.0610 \left(\frac{O}{C} \right) + 0.0404 \left(\frac{N}{C} \right) \quad (2.11)$$

Dimana :

- β : Rasio eksergi
- H : Fraksi massa hidrogen
- O : Fraksi massa oksigen
- N : Fraksi massa nitrogen
- C : Fraksi massa carbon

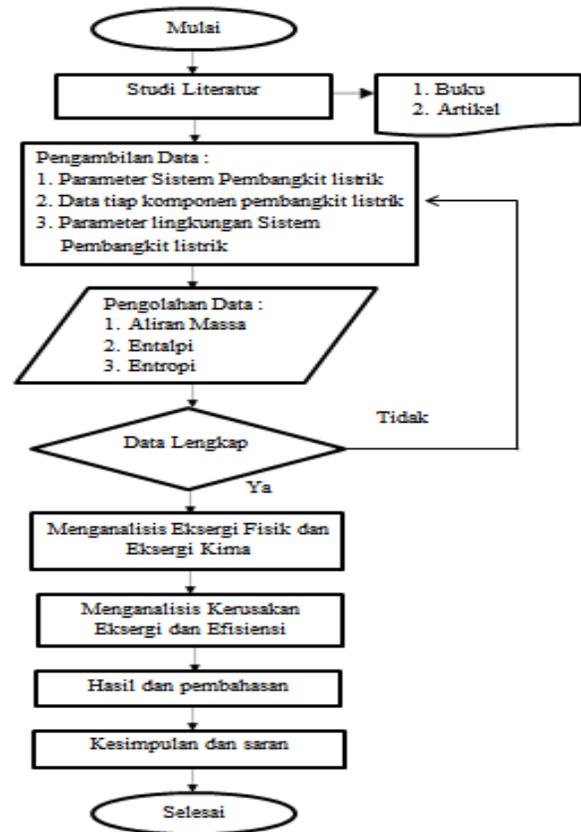
METODE PENELITIAN

Objek Penelitian

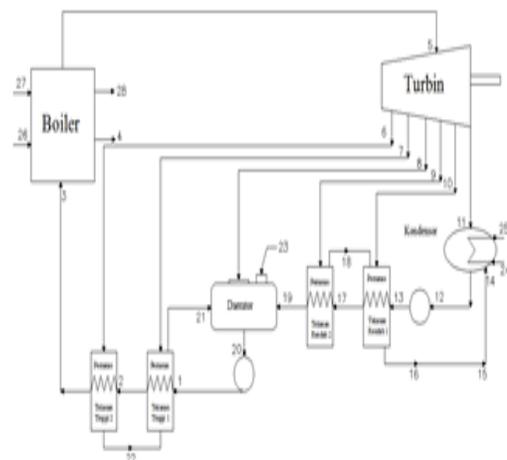
Dalam penelitian ini berlokasi di PLTU Babelan, Bekasi Jawa Barat. Siklus aktual air-uap PLTU Babelan menggunakan siklus Rankine dasar dengan penambahan ekstraksi uap dari turbin untuk pemanas air kondensat dan air umpan. Metode yang digunakan untuk mengevaluasi eksergi dan pertukaran eksergi untuk sistem tertutup dan sistem steady-state terbuka, seperti halnya proses perpindahan kalor adalah dengan mengevaluasi kesetimbangan eksergi pada setiap kondisi

aliran fluida. Suatu laju eksergi \dot{E}_x berkaitan dengan laju perpindahan panas Q_i

Diagram Alir Penelitian



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 4 Skematik PLTU Babelan
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.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Eksergi

Analisis eksergi pembangkit dilakukan dengan persamaan yang telah diberikan. Tabel 1 menunjukkan kesetimbangan energi tiap keadaan, kesetimbangan eksergi didapatkan dengan mengetahui temperatur dan tekanan tiapkeadaan.

Tabel 1. Kesetimbangan Energi Pada Tiap Aliran

| Nomor aliran | Entalpi (kJ/kg) | Entropi (kJ/kg.K) | Fasa aliran | Laju aliran massa (kg/s) | Tekanan (Atm) | Temperatur (°C) |
|--------------|-----------------|-------------------|-------------|--------------------------|---------------|-----------------|
| 1 | 684,4 | 1,9256 | Air | 135,4 | 155,14 | 160 |
| 2 | 814,05 | 2,2163 | Air | 135,4 | 150,10 | 190 |
| 3 | 938,36 | 2,4774 | Air | 135,4 | 148,09 | 218 |
| 4 | 1344,0 | 3,2323 | Air | 0,4 | 139,02 | 300 |
| 5 | 3454,07 | 6,6159 | Uap | 135 | 122,50 | 540 |
| 6 | 3056,62 | 6,7214 | Uap | 6,95 | 25,49 | 320 |
| 7 | 3000,37 | 6,8770 | Uap | 7,4 | 14,31 | 282 |
| 8 | 2781,76 | 6,6501 | Uap | 6,75 | 6,85 | 172 |
| 9 | 2713,4 | 7,0782 | Uap | 7,93 | 2,35 | 125 |
| 10 | 2661,7 | 7,4631 | Uap | 7,77 | 0,69 | 91 |
| 11 | 2591,5 | 8,1207 | Uap | 99,2 | 0,11 | 49,8 |
| 12 | 208,55 | 0,7015 | Air | 99,2 | 0,11 | 49,8 |
| 13 | 210,87 | 0,7015 | Air | 99,2 | 0,11 | 49,8 |
| 14 | 2746,5 | 6,8739 | Uap | 0,18 | 22,67 | 50 |
| 15 | 209,33 | 0,7038 | Air | 99,2 | 22,87 | 49,9 |
| 16 | 347,5 | 1,1107 | Air | 0,18 | 0,40 | 150 |
| 17 | 361,35 | 1,1450 | Air | 0,18 | 22,67 | 50 |
| 18 | 383,33 | 1,2155 | Air | 14,7 | 1,74 | 83 |
| 19 | 542,05 | 1,6237 | Air | 99,2 | 16,12 | 86 |
| 20 | 675,55 | 1,9427 | Air | 6,93 | 16,12 | 92 |
| 21 | 679,91 | 1,9526 | Air | 113,9 | 3,35 | 129 |
| 22 | 812,1 | 2,2454 | Air | 135,4 | 16,12 | 160 |
| 23 | 125,79 | 0,4369 | Air | 14,35 | 6,59 | 167 |
| 24 | 104,89 | 1,7186 | Udara | 6,95 | 14,31 | 191 |
| 25 | 175,92 | 1,7511 | Udara | 0,4 | 24,38 | 30 |
| 26 | 299,26 | 1,6989 | Udara | 12056 | 11,08 | 25 |
| 27 | - | - | Batu Bara | 12056 | 1,0074 | 42 |
| 28 | 441,61 | 2,0887 | Udara | 181,29 | 1,00674 | 167 |

Setelah mengetahui parameter yang dibutuhkan nilai eksergi pada setiap aliran dapat diketahui seperti pada tabel 2 dengan eksergi total tiap komponen didapatkan dari penjumlahan eksergi fisik dan kimia.

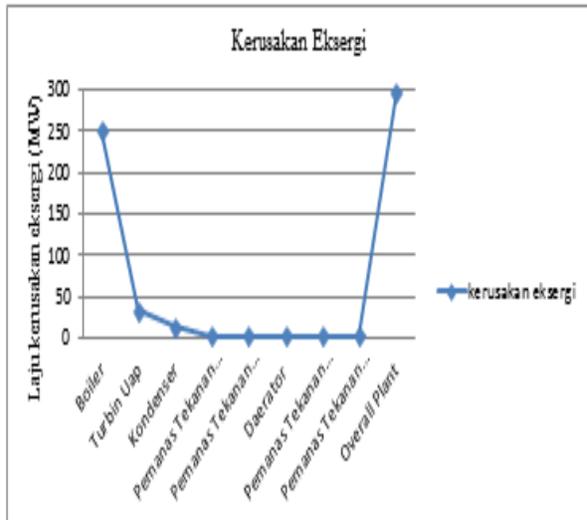
Tabel 2. eksergi total pada tiap aliran.

| Nomor aliran | Fasa aliran | Eksergi Fisik (MW) | Eksergi Kimia (MW) | Eksergi Total (MW) |
|--------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | Air | 15,59 | 0,338 | 15,93 |
| 2 | Air | 21,41 | 0,338 | 21,75 |
| 3 | Air | 27,71 | 0,338 | 28,05 |
| 4 | Air | 0,15 | 0,00 | 0,15 |
| 5 | Uap | 200,76 | 0,064 | 200,82 |
| 6 | Uap | 7,35 | 0,0033 | 7,35 |
| 7 | Uap | 7,07 | 0,0035 | 7,07 |
| 8 | Uap | 5,43 | 0,0032 | 5,43 |
| 9 | Uap | 4,82 | 0,0032 | 4,82 |
| 10 | Uap | 3,43 | 0,00 | 3,43 |
| 11 | Uap | 17,47 | 0,047 | 17,52 |
| 12 | Air | 0,19 | 0,24 | 0,43 |
| 13 | Air | 0,42 | 0,24 | 0,66 |
| 14 | Uap | 0,12 | 0,00 | 0,12 |
| 15 | Air | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 16 | Air | 0,31 | 0,04 | 0,35 |
| 17 | Air | 2,23 | 0,24 | 2,47 |
| 18 | Air | 0,17 | 0,017 | 0,17 |
| 19 | Air | 6,9 | 0,28 | 7,18 |
| 20 | Air | 13,7 | 0,33 | 13,7 |
| 21 | Air | 1,47 | 0,035 | 1,5 |
| 22 | Air | 1,02 | 0,017 | 1,26 |
| 23 | Air | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24 | Udara | 1,09 | 0,00 | 1,09 |
| 25 | Udara | 5,64 | 0,21 | 5,64 |
| 26 | Udara | 0,00 | 2,73 | 2,73 |
| 27 | Batu Bara | 0,00 | 419,25 | 419,25 |
| 28 | Udara | 0,00 | 0,32 | 3,36 |

Nilai eksergi total yang diberikan pada tabel 2 kemudian dilakukan analisis perhitungan kehancuran eksergi sehingga diketahui nilai kerusakan eksergi, rasio kerusakan eksergi terhadap bahan bakar dan rasio kerusakan eksergi terhadap kerusakan eksergi total pada setiap komponen PLTU yang kemudian ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. kerusakan eksergi pada tiap komponen

| Nomor | Komponen | Kerusakan eksergi | | |
|-------|--------------------------|-------------------|--------|-------|
| | | Rate (MW) | yD*(%) | yD(%) |
| 1 | Boiler | 249,21 | 66,21 | 89,13 |
| 2 | Turbin Uap | 15,09 | 3,5 | 5,39 |
| 3 | Kondenser | 12,54 | 2,9 | 4,48 |
| 4 | Pemanas Tekanan Rendah 1 | 1 | 0,2 | 0,35 |
| 5 | Pemanas Tekanan Rendah 2 | 0,3 | 0,07 | 0,1 |
| 6 | Daerator | 0,41 | 0,09 | 0,15 |
| 7 | Pemanas Tekanan Tinggi 1 | 1,01 | 0,24 | 0,36 |
| 8 | Pemanas Tekanan Tinggi 2 | 0,02 | 0,004 | 0,006 |
| 9 | Overall Plant | 279,58 | 66,68 | 100 |



Gambar 5 kerusakan eksergi

Dalam mendefinisikan efisiensi eksergetik perlu untuk mengidentifikasi baik produk dan bahan bakar untuk sistem termodinamika yang di. 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.

Tabel 4 Efisiensi Eksergi

| Nomor | Komponen | Efisiensi Eksergi (%) |
|-------|--------------------------|-----------------------|
| 1 | Boiler | 47,9 |
| 2 | Turbin Uap | 75,05 |
| 3 | Kondenser | 39,06 |
| 4 | Pemanas Tekanan Rendah 1 | 88,8 |
| 5 | Pemanas Tekanan Rendah 2 | 87,31 |
| 6 | Daerator | 97 |
| 7 | Pemanas Tekanan Tinggi 1 | 81,86 |
| 8 | Pemanas Tekanan Tinggi 2 | 99 |
| 9 | Overall Plant | 27,77 |

Dapat dilihat pada tabel 4.3 kerusakan eksergi terbesar terjadi pada boiler sebesar 249,21 MW atau sekitar 89,13% dari total kerusakan eksergi keseluruhan sistem sebesar 279,58 MW dan rasio kerusakan eksergi terhadap bahan bakar ialah 66,21%

Kerusakan eksergi 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.

PENUTUP

Kesimpulan

Dari hasil yang telah dilakukan pada bab sebelumnya didapatkan hasil dan kesimpulan sebagai berikut:

1. Kerusakan eksergi terbesar terjadi pada boiler sebesar 249,21 MW atau sekitar 89,13 % dari total kerusakan eksergi keseluruhan sistem.
2. Sementara untuk efisiensi eksergi tertinggi pada komponen Pemanas Tekanan Tinggi 2 yaitu 99 %, kerusakan eksergi sebesar 0,02 MW atau 0,06% dari total kerusakan eksergi keseluruhan sistem.



3. Kerusakan eksergi pada komponen utama yaitu boiler, turbin dan kondensor tersebut diakibatkan oleh tiga jenis *irreversibility* yaitu pada reaksi pembakaran, perpindahan kalor dan juga gesekan yang terjadi pada turbin.
4. Ketiga jenis *irreversibility* tersebut terjadi pada ruang bakar, dimana reaksi kimia merupakan sumber pemusnahan eksergi yang sangat signifikan dan berhubungan dengan perpindahan kalor.

Saran

1. Perlu tentang termoekonomi agar dapat mengetahui efisiensi secara ekonomi.
2. Studi lebih detail tentang energi dan kerukan eksergi agar efisiensi sistem semakin meningkat.
3. Peluang optimasi paling besar dapat dilakukan pada komponen boiler dan turbin uap. Dengan optimasi pada kedua komponen tersebut dapat mengurangi kerugian pada keseluruhan sistem PLTU.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Moran, Michael, and Shapiro, H.N., *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics*, 8th ed. United States Of America : John Willey and Son, 2014.
- [2] A. Bejan, Moran. M, T. George, "Exergy Analysis" dalam *Thermal Design And Optimization* New York, USA: John Willey and Son, 1996, hal,113-143.
- [3] W.C. Reynolds, H.C. Perkins, *Engineering Thermodynamics*, 2nd ed. Termodinamika teknik, ed. ke-2. Terjemahan: Filino Harahap, Pantur Silaban. Institut Teknologi Bandung, Bandung : Erlangga, 1983
- [4] Cengel, Y.A., Boles, M.A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8th ed. McGraw-Hill, New York. (2015)
- [5] El-Wakil, M.M, *Instalasi Pembangkit Daya*, Jakarta : Erlangga, 1992
- [6] Febri Ramdhan, Chalilullah Rangkuti, "Analisis Eksergi pada Pembangkit

- Listrik Tenaga Uap PT X Unit 1 Babelan," *Jurnal Seminar Nasional Cendekiawan*, no.5. 2019.
- [7] Riyan Phanama, Yohanes M Simanjuntak, Muhammad Ivanto, "Analisis Eksergi Sistem Pembangkit Tenaga Uap (PLTU) di Pt. Indonesia Power Unit Jasa Pembangkit Sanggau," jurusan teknik mesin. Universitas tanjungpura. Pontianak. 2019.
- [8] Muhamad Fauzi Zakaria, Mohammad Effendy, "Analisis Energi dan Eksergi Turbin Uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 2 Tanjung Awar-Awar," vol.06, no.02. hal 77 – 85.2018.
- [9] Muhammad Rafianur Zulmi, Doddy Suanggana, Diniar Mungil Kurniawati, "Efisiensi Energi Efisiensi Eksergi dan Laju Kerusakan Eksergi pada Komponen Mesin PLTU Muara Jawa dengan Variasi Pembebanan," *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, vol. 22, no. 1. 2018.
- [10] Muhamad Difa Dharmakusuma, Belyamin dan Widyatmoko, " Eksergi pada Boiler PLTU," *Jurnal Mekanik Terapan*, vol.01, no.01. hal 045-053.2020.
- [11] Pratamahendra Ismantoro, Agustian. " Laju Kerusakan *Exergy* Dan Efisiensi *Exergy* Mesin PLTGU PT.Indonesia Power Unit Pembangkit Semarang". Laporan Tugas Akhir. Program Studi Teknik Mesin. Universitas Sanata Dharma. Yogyakarta. 2016.
- [12] Ibrahim Dancer, and Yunus. A Cengel. "Energy, Entropy And Exergy Concepts And Their Roles In Thermal Engineering" vol.3, no.3. hal 116-119. 2001.
- [13] Khairil Anwar, Muhamamad Hasan Basri, Ikmal Tobe. " Eksergi pada Sistem Pembangkit Daya Tenaga Uap (PLTU) Palu" *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII*, 2013.