

Analisa Energi Dan Eksergi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Septiani Wulandari*

Magister Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya,
Palembang, 30139
septianiwulandari80@gmail.com

*Corresponding Author

Hasan Basri

Magister Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya,
Palembang, 30139
hasan_basri@unsri.ac.id

Abstrak— Pembangkit listrik tenaga uap merupakan salah satu penyuplai kebutuhan listrik yang memiliki potensi besar dalam penyediaan energi dan merupakan alternatif untuk memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia. Pemanfaatan energi fosil untuk menghasilkan energi listrik harus dimanfaatkan dengan efisien dan peningkatan efisiensi kinerja pembangkit listrik tenaga uap juga merupakan faktor penting yang perlu dievaluasi. Berdasarkan faktor tersebut, perlu dilakukan analisis pada sistem pembangkit listrik tenaga uap. Evaluasi sistem pembangkit yang lebih rinci dapat dianalisis dengan menggunakan metode energi dan eksergi. Boiler-Furnace memiliki efisiensi termal rata-rata 85,5% dan analisis eksergi Boiler-Furnace memiliki efisiensi eksergi rata-rata 52,2%. Turbin Uap memiliki efisiensi termal sebesar 27,30% dan Efisiensi eksergi Turbin Uap adalah 71,40%. Nilai efisiensi tersebut menunjukkan bahwa performance kinerja Boiler-Furnace dan Turbin uap masih relatif baik.

Kata Kunci— PLTU, Boiler-Furnace, Turbin Uap, Energi dan Eksergi

I. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan salah satu penyuplai kebutuhan listrik yang memiliki potensi besar dalam penyediaan energi dan merupakan alternatif untuk memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar fosil yaitu batubara sebagai energi primer. Pemanfaatan energi fosil untuk menghasilkan energi listrik harus dimanfaatkan dengan efisien dan peningkatan efisiensi kinerja pembangkit listrik tenaga uap juga merupakan faktor penting yang perlu dievaluasi. Berdasarkan faktor tersebut, perlu dilakukan analisis pada sistem pembangkit listrik tenaga uap. Evaluasi sistem pembangkit yang lebih rinci dapat dianalisa dengan menggunakan metode energi dan eksergi. Metode energi kinerja pembangkit listrik termal dievaluasi melalui kriteria kinerja energetik berdasarkan hukum pertama termodinamika. Sedangkan metode eksergi berdasarkan hukum kedua termodinamika yang berguna sebagai optimalisasi pembangkit listrik tenaga termal. Perhitungan data berdasarkan kondisi operasi sistem pembangkit terhadap daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga uap. Hasil yang didapatkan pada analisa energi dan eksergi yaitu

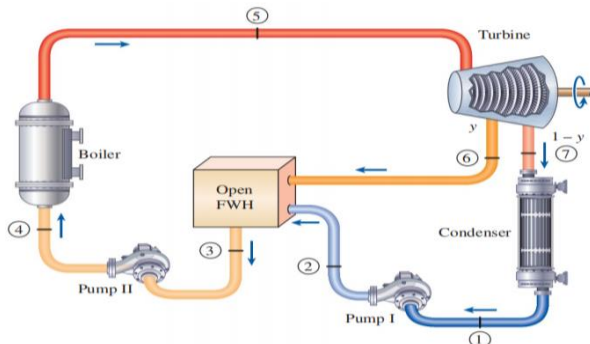
mengevaluasi pengaruh dari variasi kondisi operasi terhadap efisiensi thermal dan efisiensi eksergi, dan mengidentifikasi kerugian eksergi pada sistem pembangkit yang dapat menjadi kajian manajemen pembangkit listrik untuk membuat skala prioritas optimalisasi energi, serta meningkatkan efisiensi termodinamika pada sistem pembangkit listrik tenaga uap dengan mendapatkan kondisi operasi optimum yang menunjukkan kerugian eksergi minimum dan nilai efisiensi sesuai standar desain.

II. STUDI PUSTAKA

2.1 Rankine Cycle

Rankine Cycle adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas di suplai secara eksternal pada aliran tertutup, biasanya menggunakan air sebagai fluida kerja. Siklus ini menghasilkan 80% dari seluruh energi listrik yang dihasilkan diseluruh dunia. Sumber panas yang utama untuk *Rankine Cycle* adalah batubara, gas alam, minyak bumi, dan panas matahari. Efisiensi *Rankine Cycle* biasanya dibatasi oleh fluida kerja. Uap memasuki turbin pada temperature (480-550)°C dan temperature kondensor sekitar 30°C. Fluida pada *Rankine Cycle* menggunakan fluida tertutup dan digunakan secara konstan. Berbagai jenis fluida yang digunakan pada siklus ini, tetapi pada pembangkit listrik tenaga uap air yang dipilih dikarenakan karakteristik fisika dan kimia yang dimiliki tidak beracun dan mudah didapat.

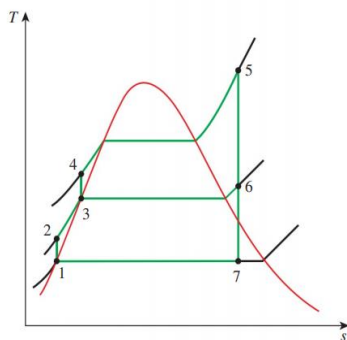
Rankine Cycle menggabungkan perpindahan kalor antara komponen pembangkit dengan sekelilingnya. Sehingga energi kinetik dan potensial juga diabaikan. Analisis kerja siklus *Rankine Cycle* beroperasi pada kondisi tunak. Prinsip kerja dan perpindahan kalor subsistem A diilustrasikan oleh Gambar 3. Perpindahan energi ini dianggap *positif ke arah tanda panah*. Perpindahan kalor liar yang tidak dapat dihindari antara komponen pembangkit dan sekelilingnya diabaikan untuk memudahkan analisis. Perubahan energi kinetik dan potensial juga diabaikan. Setiap komponen dianggap beroperasi pada kondisi tunak. Dengan menggunakan prinsip konservasi massa dan konservasi energi bersama-sama dengan idealisasi tersebut, persamaan untuk perpindahan energi seperti yang terlihat pada Gambar 3, dimulai dari kondisi 1 dan berlanjut melalui setiap komponen lainnya. Proses *Rankine Cycle* di tunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Rankine Cycle

Proses 1-2

Air umpan boiler dipompa dari tekanan P_1 menjadi P_2 . Langkah ini adalah langkah kompresi isentropis, dan proses ini terjadi pada boiler feed water pump.



Gambar 2. Skema Rankine Cycle

Proses 2-3

Proses menghilangkan gas-gas yang terkandung dalam air, sesudah melalui proses permunian air (*water treatment*). Selain itu *deaerator* berfungsi sebagai pemanas awal air sebelum masuk ke dalam boiler.

Proses 3-4

Air dipompa dari tekanan P_4 menjadi P_5 . Proses ini adalah langkah kompresi *isentropis*.

Proses 4-5

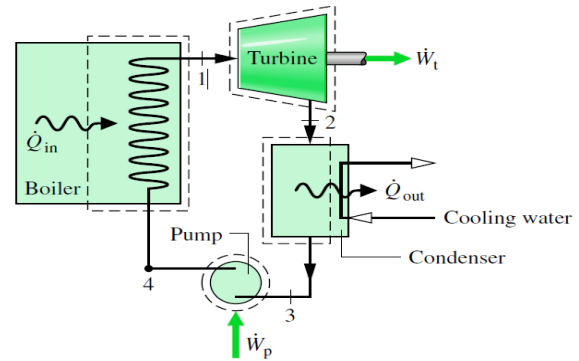
Superheated Steam menabrak turbin dan mengalami ekspansi *isentropis*, sehingga tekanan temperaturnya turun.

Proses 5-6-7

Uap dari ekstraksi turbin masuk ke dalam *feedwater heater* dan kondensor untuk di kondensasikan. Proses ini adalah *isobar isothermis*, dan terjadi didalam kondensor.

Proses 7-1

Air bertekanan ini dinaikkan temperaturnya hingga mencapai titik cair jenuh lalu air berubah wujud menjadi uap jenuh, setelah itu uap dipanaskan lebih lanjut hingga uap mencapai temperatur kerjanya menjadi uap lanjut. Langkah ini ada isobar dan terjadi didalam boiler.



Gambar 3. Prinsip Kerja dan Perpindahan Kalor Subsistem A

Turbin

Uap dari boiler pada kondisi 1 yang berada pada temperature dan tekanan yang sudah dinaikkan berekspansi di dalam turbin untuk menghasilkan kerja dan kemudian didinginkan dikondenser pada kondisi 2 dengan tekanan yang relatif rendah. Dengan mengabaikan perpindahan kalor dengan sekelilingnya, kesetimbangan laju energi dan massa untuk volume atur di sekitar turbin pada kondisi tunak menjadi :

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_t + m \left[h_1 - h_2 + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right] \quad (1)$$

atau

$$\frac{w_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \quad (2)$$

Dimana \dot{m} menyatakan laju aliran massa dari fluida kerja, dan w_t/\dot{m} adalah laju kerja yang dihasilkan per unit massa uap melalui turbin. Seperti disebutkan diatas, perubahan energi kinetik dan potensial yang diabaikan.

Kondenser

Dalam kondenser terjadi perpindahan kalor dari uap ke air pendingin yang mengalir dalam aliran yang terpisah. Uap terkondensasi dan temperature air pendingin meningkat. Pada keadaan tunak, kesetimbangan laju massa dan energi untuk volume atur dari penukaran kalor.

$$\frac{Q_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad (3)$$

Kondensat cair yang meninggalkan kondenser di kondisi 3 dipompa dari kondenser ke dalam boiler yang bertekanan lebih tinggi, dengan menggunakan volume atur dan mengasumsi tidak ada perpindahan kalor dengan sekitarnya.

$$\frac{w_p}{\dot{m}} = h_4 - h_3 \quad (4)$$

atau

$$h_4 = h_3 + V(P_4 - P_3) \quad (5)$$

Feedwater Heater

Analisis *feedwater heater* untuk mencari aliran uap dan tekanan ekstraksi dilakukan mulai dari *feedwater*

heater tekanan tinggi ke tekanan rendah. Menghitung massa aliran uap ekstraksi dan tekanan ekstraksi pada setiap *feed water heater*, entalpi dapat dengan mudah diketahui menggunakan tabel uap. Pada perhitungan menggunakan rumus termodinamika yang dikeluarkan oleh IAPWS, sehingga laju aliran massa dapat dicari dengan persamaan:

$$m_s h_{si} + m_w h_{wi} = m_s h_{se} + m_w h_{we} \quad (6)$$

Boiler

Fluida kerja yang meninggalkan pompa pada kondisi 4 disebut air pengisian, dipanaskan sampai jenuh dan diuapkan di dalam boiler, dengan menggunakan volume atur dari kondisi 4 ke kondisi 1, kesetimbangan masa dan energi.

$$\frac{Q_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (7)$$

Parameter Kerja

Efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi yang masuk ke dalam fluida kerja melalui boiler yang dikonversi menjadi keluaran kerja netto merupakan efisiensi termal.

$$\eta = \frac{\frac{W_t}{\dot{m}} - \frac{W_p}{\dot{m}}}{\frac{Q_{in}}{\dot{m}}} = \frac{h_1 - h_2 - h_4 - h_3}{h_1 - h_4} \quad (8)$$

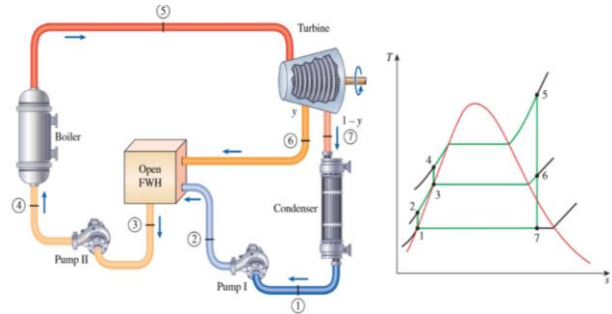
2.2 Siklus Rankine Regeneratif

Siklus Rankine Regeneratif adalah modifikasi siklus Rankine dimana air sebagai fluida kerja dinaikkan temperaturnya dengan memanfaatkan uap ekstraksi dari turbin sehingga kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan fluida kerja pada boiler berkurang. Hal ini tentu saja akan menaikkan efisiensi siklus.

Regenerasi tidak hanya meningkatkan efisiensi siklus tetapi juga salah satu cara dearasi. Dearasi yaitu menghilangkan kadar oksigen dalam air yang bisa menyebabkan korosi pada jalur perpipaan. Proses regenerasi umumnya dengan menggunakan alat yang biasanya disebut *feed water heater* dengan prinsip kerja seperti *heat exchanger*.

Analisis Open Feed Water Heater

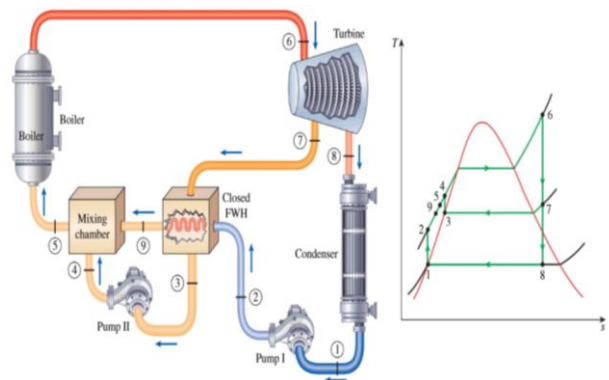
Perpindahan panas pada Heat Exchanger ini dilakukan secara konveksi. Pada Open Feedwater Heater, extraction steam bertemu dan bercampur dengan fluida kerja. Fraksi y dapat dihitung dengan menerapkan prinsip-prinsip *conservation of mass and energy* pada *control volume* di sekeliling pemanas.



Gambar 4. Open Feedwater Heater

Analisis Closed Feed Water Heater

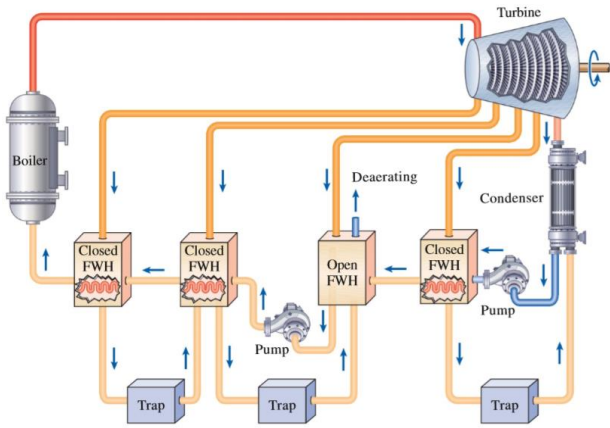
Closed feedwater heater merupakan *heat exchanger* tipe *shell and tube*. Uap dari turbin ceratan (*extraction*) berada pada sisi *shell*, sementara *feedwater heater* (air pengumpan) berada pada sisi *tube* dan menyerap panas dari uap sisi *shell* sehingga meningkatkan temperature *feedwater heater*. Fraksi dari aliran total dapat dihitung dengan menggunakan prinsip-prinsip *conservation mass and energy* pada *control volume*. Dengan mengasumsikan tidak terjadi perpindahan kalor antara sistem pengisian dan lingkungan serta mengabaikan energi kinetik dan potensial.



Gambar 5. Closed Feedwater Heater

Multiple Feed Water Heaters

Efisiensi termal dari siklus regeneratif dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan beberapa pemanas air pengisian pada tekanan yang sesuai. Jumlah pemanas air-pengisian yang digunakan ditentukan oleh pertimbangan ekonomis, karena peningkatan efisiensi termal yang diperoleh dengan setiap penambahan pemanas harus sepadan dengan biaya tambahan yang dikeluarkan (pemanas, sambung-sambungan pipa, pompa dan lain-lain).



Gambar 6. Multiple Feedwater Heaters

Jumlah Feedwater Heater

Pembangkit listrik tenaga uap dengan menggunakan *feedwater heater* dari *Rankine Cycle Regenerative*. Siklus ini merupakan salah satu metode untuk meningkatkan efisiensi termal dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yaitu meningkatkan temperature fluida yang masuk ke dalam boiler dengan menambah komponen yaitu *feedwater heater*. Pada Tabel 1 dapat dilihat *unit size* dengan *feedwater heater* yang direkomendasi.

Tabel 1. Typical Number of Feedwater Heater

Unit Size (MW)	Number of Heater
0 – 50	3 – 5
50 – 100	5 or 6
100 – 200	5 – 7
Over 200	6 – 8

Proses pemanasan yang terjadi di dalam *feedwater heater* dengan proses ceratan (*extraction*) uap dari turbin. Dengan ceratan ini, kerja turbin menjadi lebih kecil tetapi dengan penggunaan *feedwater heater* kebutuhan panas (*heat added*) lebih rendah. Hal ini menekan kerugian kerja secara keseluruhan sehingga efisiensi ketel uap menjadi lebih baik. Jumlah penambahan *feedwater heater* dibatasi berdasarkan kapasitas pembangkit.

2.3 Energi

Energi dapat disimpan di dalam suatu sistem dalam berbagai bentuk makroskopik. Energi dapat juga dikonversi dari satu bentuk ke bentuk lain dan dipindahkan antar sistem. Untuk sistem tertutup, energi dapat dipindahkan dalam bentuk kerja (*work*) dan perpindahan kalor (*heat transfer*). Jumlah total energi selama proses konversi energi dan perpindahan energi adalah kekal (Moran & Shapiro, 2004)

2.4 Eksergi

Eksergi dapat hancur jika system dan lingkungan secara spontan berada pada keadaan seimbang, sehingga kerja akan sepenuhnya terbuang. Perubahan disimpulkan bahwa nilai eksergi setidaknya nol dan tidak bisa negative. Eksergi dapat diartikan dengan potensi penggunaan kerja (*work*) dalam bentuk materi. Potensi kerja yang dapat digunakan ini diperoleh melalui proses

reversible. *Eksergi* dapat ditransfer di antara sistem dan dapat dihancurkan oleh irreversibilitas dalam sistem (Bejan & Tsatsronis, 1995).

2.5 Langkah Perhitungan dengan menggunakan Metode Energi

Tahapan untuk menghitung nilai energi sistem pembangkit listrik tenaga uap yaitu menghitung nilai energi pada *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap yang ditinjau dari efisiensi thermal.

A. Tahapan untuk menghitung energi pada *Boiler-Furnace* adalah sebagai berikut :

1. Menghitung Neraca Massa pada *Furnace*

- Menghitung massa komponen batubara

$$m = \%m \times m_{total} \quad (9)$$
- Menghitung massa refuse yang terbentuk

$$\%Abu_{(bb)} \times \text{massa } bb = \%Abu_{(R)} \times \text{Refuse} \quad (10)$$

- Menghitung karbon dalam *refuse*

$$C_{refuse} = C_{batubara} - C_{flue\ gas} \quad (11)$$

- Menghitung massa *dry flue gas*

$$m = (\%n \times n_{total}) \times BM \quad (12)$$

- Menghitung massa udara kering

$$N_2 \text{ pada udara} = N_2 \text{ flue gas} - N_2 \text{ batubara} \quad (13)$$

$$\text{Mol udara suplai} = \frac{100\%}{79\%} \times \text{mol } N_2 \text{ udara} \quad (14)$$

$$\text{Mol } O_2 \text{ suplai} = \frac{21\%}{79\%} \times \text{mol } N_2 \text{ udara} \quad (15)$$

- Menghitung massa H₂O didalam Udara Menggunakan *humidity chart*
- Menghitung massa H₂O dari pembakaran H₂ pada batubara

$$H_2O_{flue\ gas} = H_2O_{bb} + H_2O_{\text{dari reaksi } H_2 + H_2O \text{ pada udara}} \quad (16)$$
- Menghitung Neraca Oksigen

$$O_2 \text{ Reaksi} = (O_2 \text{ Reaksi } CO_2 + O_2 \text{ Reaksi } CO + O_2 \text{ Reaksi } SO_2 + O_2 \text{ Reaksi } H_2O) \quad (17)$$
- $O_2 \text{ Teoritis} = O_2 \text{ Reaksi} - O_2 \text{ Batubara} \quad (18)$
- $O_2 \text{ yang disuplai} = O_2 \text{ Teoritis} + O_2 \text{ Flue Gas} \quad (19)$

- Menghitung udara yang berlebih

$$\% \text{ Excess} = \frac{O_2 \text{ Suplai} - O_2 \text{ Teoritis}}{O_2 \text{ Teoritis}} \times 100\% \quad (20)$$

2. Menghitung Neraca Energi pada *Furnace*

- Menghitung energi dari batubara

$$Q = m \times HHV \quad (21)$$

- Menghitung panas sensibel udara masuk *air heater*

$$Q = n \int_{T_1}^{T_2} Cp \, dT \quad (22)$$

- Menghitung panas sensibel udara keluar *air heater*

$$Q = n \int_{T_1}^{T_2} Cp \, dT \quad (23)$$

- Menghitung panas air umpan masuk *economizer*

$$Q = m_{air \text{ umpan}} \times h_f \quad (24)$$

- Menghitung panas air umpan keluar *economizer*

$$Q = m_{air \text{ umpan}} \times h_f \quad (25)$$

- Menghitung panas sensibel *refuse*

$$Q = m_{abu} \times c_{p_{abu}} \times \Delta T \quad (26)$$

- Menghitung panas pembakaran *unburned carbon*

$$Q = n_{carbon} \times \Delta H C \quad (27)$$

- Menghitung panas *main steam*

$$Q = m_{steam} \times h \quad (28)$$

- Menghitung panas *flue gas* yang keluar dari *furnace*

- Menghitung panas pembakaran CO

$$Q_{CO} = \text{Mol CO} \times \Delta H CO \quad (29)$$

- Menghitung panas sensibel *dry flue gas*

$$Q = n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (30)$$

- Menghitung panas sensibel dan laten air yang terbentuk karena pembakaran H_2 .

- Menghitung panas sensibel dan laten air dari batubara

- Menghitung panas dari *flue gas* yang keluar dari *stack gas*

- Menghitung panas pembakaran CO

$$Q_{CO} = \text{Mol CO} \times \Delta H CO \quad (31)$$

- Menghitung panas sensibel *dry flue gas*

$$Q = n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (32)$$

- Menghitung panas sensibel dan laten air yang terbentuk karena pembakaran H_2 .

- Menghitung panas sensibel dan laten air dari batubara

- Menghitung panas *flue gas* yang ditransfer pada *air heater* dan *economizer*

- Menghitung panas yang hilang.

- Menghitung Energi *Boiler-Furnace*

$$\eta_{thermal} = \left(\frac{Q_r}{Q_{suptai}} \right) \times 100\% \quad (33)$$

B. Tahapan untuk menghitung energi pada Turbin Uap adalah sebagai berikut :

- Menghitung entalpi *main steam* masuk turbin uap pada kondisi 1.

- Menghitung entalpi *superheated steam* masuk turbin dengan menggunakan data tekanan dan temperature.

- Menghitung entalpi *high pressure steam* keluar turbin uap pada kondisi 2.

- Menghitung entalpi *high pressure steam* keluar turbin dengan menggunakan data tekanan dan temperature.

- Menghitung entalpi *intermediate pressure steam* keluar turbin uap pada kondisi 3.

- Menghitung entalpi *intermediate pressure steam* keluar turbin dengan menggunakan data tekanan dan temperature.

- Menghitung entalpi *low pressure steam* keluar turbin uap pada kondisi 4.

- Menghitung entalpi *low pressure steam* keluar turbin dengan menggunakan data tekanan dan temperature.

- Menghitung entalpi *low pressure exhaust steam* keluar turbin uap pada kondisi 5.

- Menghitung entalpi *low pressure exhaust steam* dengan menggunakan data tekanan dan temperature.

- Menghitung Entalpi *Saturated Liquid* (h_6), Volume Spesific *Saturated Liquid* (v_6) Pada Kondisi 6

- Menghitung Entalpi (h_7) dan Kerja Pompa Kondensat Pada Kondisi 7

- Menghitung Entalpi *Specific Saturated Liquid* (h_7) pada bagian keluar pompa pertama.

$$h_7 = h_6 + v_6 (p_7 - p_6) \quad (34)$$

- Menghitung Kerja Pompa Kondensat (*Condensate Water Pump*)

$$Wp_1 = \dot{m}_5 \times v_6 (p_7 - p_6) \quad (35)$$

- Menghitung Entalpi *Saturated Liquid* (h_8) Pada kondisi 8.

- Menghitung Entalpi *Saturated Liquid* (h_9), Volume Spesific *Saturated Liquid* (v_9) Pada Kondisi 9.

- Menghitung Entalpi (h_{10}) dan Kerja Pompa Air Umpan Boiler Pada Kondisi 10.

- Menghitung Entalpi *Specific Saturated Liquid* (h_{10}) pada bagian keluar pompa kedua.

$$h_{10} = h_9 + v_9 (p_{10} - p_9) \quad (36)$$

- Menghitung Kerja Pompa Air Umpan Boiler (*Boiler Feed Water Pump*)

$$Wp_2 = m \times v_9 (p_{10} - p_9) \quad (37)$$

- Menghitung kerja yang Dihasilkan Turbin

$$Wt_{total} = Wt_{HP} + Wt_{IP} + Wt_{LP1} + Wt_{LP2} \quad (38)$$

$$Wt_{HP} = \dot{m}_1 \times (h_1 - h_2) \quad (39)$$

$$Wt_{IP} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \times (h_2 - h_3)$$

$$Wt_{LP1} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) \times (h_3 - h_4) \quad (40)$$

$$Wt_{LP2} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4) \times (h_4 - h_5) \quad (41)$$

Keterangan :

Wt_{HP} = Kerja turbin yang dihasilkan oleh *High Pressure Turbine*

Wt_{IP} = Kerja turbin yang dihasilkan oleh *Intermediate Pressure Turbine*

Wt_{LP1} = Kerja turbin yang dihasilkan oleh *Low Pressure Turbine*

Wt_{LP2} = Kerja turbin yang dihasilkan oleh *Low Exhaust Pressure Turbine*

\dot{m}_1 = Laju alir massa *Main Steam*

\dot{m}_2 = Laju alir massa *High Pressure Steam*

\dot{m}_3 = Laju alir massa *Intermediate Pressure Steam*

\dot{m}_4 = Laju alir massa *Low Pressure Steam*

- Menghitung Kerja yang Dihasilkan Pompa

$$Wp_{total} = Wp_1 + Wp_2 \quad (42)$$

Keterangan :

Wp_1 = Kerja Pompa Kondensat

Wp_2 = Kerja Pompa Air Umpan Boiler

12. Panas yang diserap boiler

$$Q_{in} = \text{Panas steam} - \text{Energi air umpan boiler}$$

13. Menghitung Effisiensi Thermal Turbin Uap

$$\eta_{thermal} = \left(\frac{W_{total} - W_{ptotal}}{Q_{in}} \right) \times 100\% \quad (43)$$

2.6 Langkah Perhitungan dengan menggunakan Metode Eksergi

Tahapan perhitungan nilai eksergi sistem pembangkit yaitu menghitung nilai eksergi pada *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap yang ditinjau dari efisiensi eksergi.

A. Tahapan untuk menghitung eksergi pada *Boiler-Furnace* adalah sebagai berikut :

1. Menghitung *Eksergi* Input batubara

- Menghitung *absolute entrophy* batubara

$$s_{DAF} = c \left[\begin{array}{l} 37,1653 - 31,4767 \exp\left(-0,564682 \frac{h}{c+n}\right) \\ + 20,1145 \frac{o}{c+n} + 54,3111 \frac{n}{c+n} + 44,6712 \frac{s}{c+n} \end{array} \right] \quad (44)$$

- Menghitung *Eksergi* kimia batubara dengan *dry ash free basis*.

$$e_{DAF}^{ch} = [(HHV)_{DAF} - T_0[s_{DAF} + vSO_2SO_2 - vCO_2CO_2 - vH_2OH_2O - vN_2N_2] + [vCO_2e_{CO_2}^{ch} + vH_2Oe_{H_2O}^{ch} + vN_2e_{N_2}^{ch} + vO_2e_{O_2}^{ch}]] \quad (45)$$

- Menghitung *Eksergi* kimia batubara dengan *as received basis*.

$$e_{Ar}^{ch} = \left[0,7918 e_{DAF}^{ch} + \frac{\text{Mass Fraction } H_2O}{BM_{H_2O}} \times e_{H_2O(L)}^{ch} \right] \times m_{batubara} \quad (46)$$

2. Menghitung *Eksergi* Input Udara

$$ef_{udara} = \dot{m}_{udara} \times (h_{udara} - h_0) - T_0(s_{udara} - s_0) \quad (47)$$

3. Menghitung *Eksergi* Input *Boiler Feed Water*

$$ef_{bfw} = \dot{m}_{bfw} \times (h_{bfw} - h_0) - T_0(s_{bfw} - s_0) \quad (48)$$

4. Menghitung total *Eksergi* Input

$$\text{Exergy Input} = \text{Eksergi coal} + \text{Eksergi Udara} + \text{Eksergi Boiler Feed Water} \quad (49)$$

5. Menghitung *Eksergi* output *steam*

$$ef_{steam} = \dot{m}_{steam} \times (h_{steam} - h_0) - T_0(s_{steam} - s_0) \quad (50)$$

6. Menghitung *Eksergi* output *blowdown*

$$ef_{blowdown} = \dot{m}_{blowdown} \times (h_{blowdown} - h_0) - T_0(s_{blowdown} - s_0) \quad (51)$$

7. Menghitung *Eksergi* output *Flue Gas*

$$ef_{fluegas} = \dot{m}_{fluegas} \times \sum xi (h_{fluegas} - h_0) - T_0(s_{fluegas} - s_0) \quad (52)$$

8. Menghitung total *Eksergi* output

$$\text{Exergy Output} = \text{Eksergi Steam} + \text{Eksergi Blowdown} + \text{Eksergi Flue Gas} \quad (53)$$

9. Menghitung *Eksergi Destruction* (Pemusnahan *Eksergi*)

$$\dot{E}_d = [\text{Exergy Input} - \text{Exergy Output}] \quad (54)$$

10. Menghitung Efisiensi *Eksergi Boiler-Furnace*

Nilai efisiensi *Eksergi* dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\eta_{exergy} = \left(\frac{\text{Exergy Useful}}{\text{Exergy Input}} \right) = \left(1 - \frac{\dot{E}_d}{\text{Exergy Input}} \right) \times 100\% \quad (55)$$

B. Tahapan untuk menghitung eksergi pada Turbin Uap adalah sebagai berikut :

1. Menghitung Entalpi dan Entropi Pada Kondisi Lingkungan

Pada kondisi lingkungan temperatur 28°C.

- Entalpi temperatur lingkungan 28°C, didapatkan dari steam tabel yaitu:

$$h_0 = 117,43 \text{ kJ/kg.}$$

- Entropi temperatur lingkungan 28°C, didapatkan dari steam tabel yaitu:

$$s_0 = 0,4093 \text{ kJ/kg.K.}$$

2. Menghitung Aliran *Eksergi Main Steam* Pada Kondisi 1

Dalam perhitungan *Eksergi* sistem dibutuhkan entalpi, entropi dan laju alir massa yang didapatkan dari keadaan operasi serta tekanan dan temperature lingkungan.

Persamaan *Eksergi Main Steam*

$$ef_1 = \dot{m}_1 \times (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (56)$$

3. Menghitung Aliran *Eksergi High Pressure Steam* Pada Kondisi 2

Persamaan *Eksergi High Pressure Steam*

$$ef_2 = \dot{m}_2 \times (h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0) \quad (57)$$

4. Menghitung Aliran *Eksergi Intermediate Pressure Steam* Pada Kondisi 3.

Persamaan *Eksergi Intermediate Pressure Steam*

$$ef_3 = \dot{m}_3 \times (h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0) \quad (58)$$

5. Menghitung Aliran *Eksergi Low Pressure Steam* Pada Kondisi 4.

Persamaan *Eksergi Low Pressure Steam*

$$ef_4 = \dot{m}_4 \times (h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0) \quad (59)$$

6. Menghitung Aliran *Eksergi Exhaust Steam* Pada Kondisi 5.

Persamaan *Eksergi Exhaust Steam*

$$ef_5 = \dot{m}_5 \times (h_5 - h_0) - T_0(s_5 - s_0) \quad (60)$$

7. Menghitung *Eksergi Output* Turbin Uap

Untuk menghitung *Eksergi output* menggunakan hasil dari penjumlahan keempat *Eksergi exhaust steam*.

$$\dot{E}_{out} = [(ef_2 + ef_3 + ef_4 + ef_5)] \quad (61)$$

8. Menghitung *Eksergi Destruction* (Pemusnahan *Eksergi*) Turbin Uap

Eksergi Destruction yang disebabkan irreversibilitas didalam sistem.

$$\dot{E}_d = [\text{Exergy Input} - \text{Exergy Output} - W_{cv}] \quad (61)$$

9. Menghitung Efisiensi *Eksergi Steam Turbine*

$$\eta_{exergy} = \left(\frac{W_{cv}}{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}} \right) \times 100\% \quad (62)$$

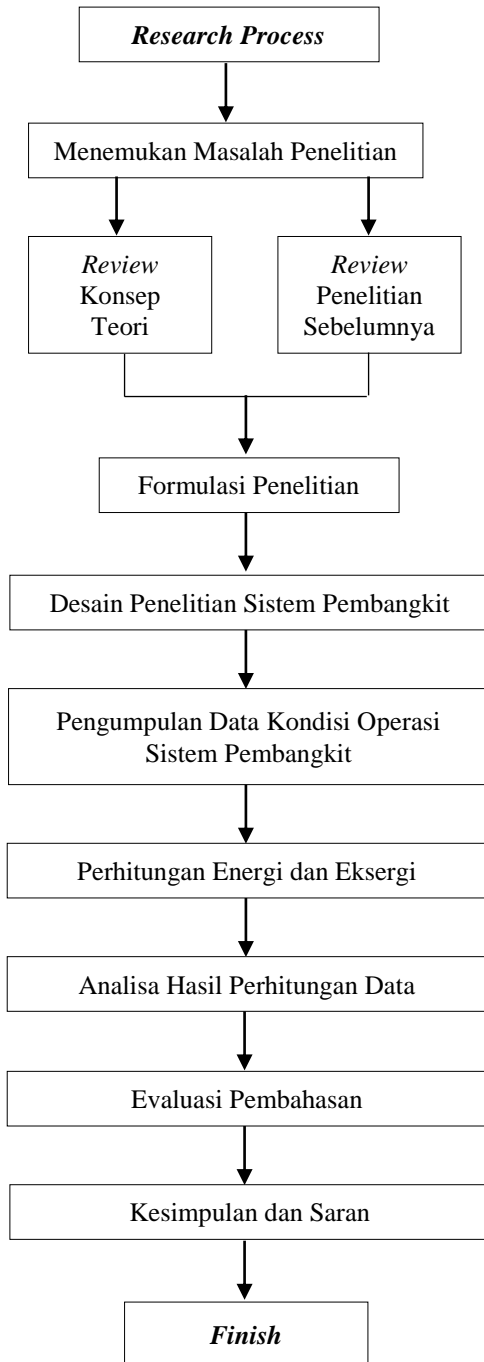
III. METODOLOGI

3.1 Desain Sistem Pembangkit

Berdasarkan Gambar 8 merupakan desain pembangkit listrik tenaga uap dilengkapi dengan kondisi operasi sistem pembangkit.

3.2 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini penulis melakukan pengamatan selama 3 hari pada unit *Boiler-Furnace* dan *Steam Turbine*. Proses penelitian dapat diamati pada Gambar 7.

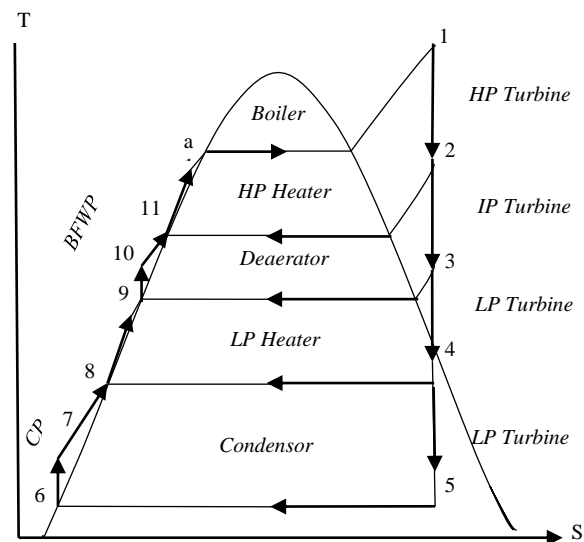


Gambar 7. Flowchart Penelitian

Adapun tahapan pengolahan data pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu: analisis energi dan analisis eksergi pada unit *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap.

Data kondisi operasi diambil berdasarkan *operation log sheet* dan pengamatan langsung di *Distributed Control System* yang merupakan sistem kendali pembangkit. Perhitungan metode energi dan eksergi didapatkan dari studi *literature handbook thermodynamics* dan *thermal design and optimization* sebagai perhitungan efisiensi energi dan eksergi serta *chemical process principles* sebagai literature menghitung neraca massa dan neraca energi pada pembakaran *Boiler-Furnace*.

Merujuk pada Gambar 8, terlihat fluida kerja melewati urutan proses yang reversibel secara internal sebagai berikut:



Gambar 8. Diagram T-s Pada Steam Turbine

Proses 1-2-3-4-5

Ekspansi isentropik dari fluida kerja melalui turbin dari uap superheated pada kondisi 1 hingga mencapai tekanan konstan.

Proses 5-6

Perpindahan kalor dari fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui kondensor dengan cairan jenuh pada kondisi 6. Langkah ini adalah *isobar*.

Proses 6-7-8

Kompresi isentropik dalam pompa menuju ke kondisi 7 dalam daerah cairan jenuh.

Proses 8-9

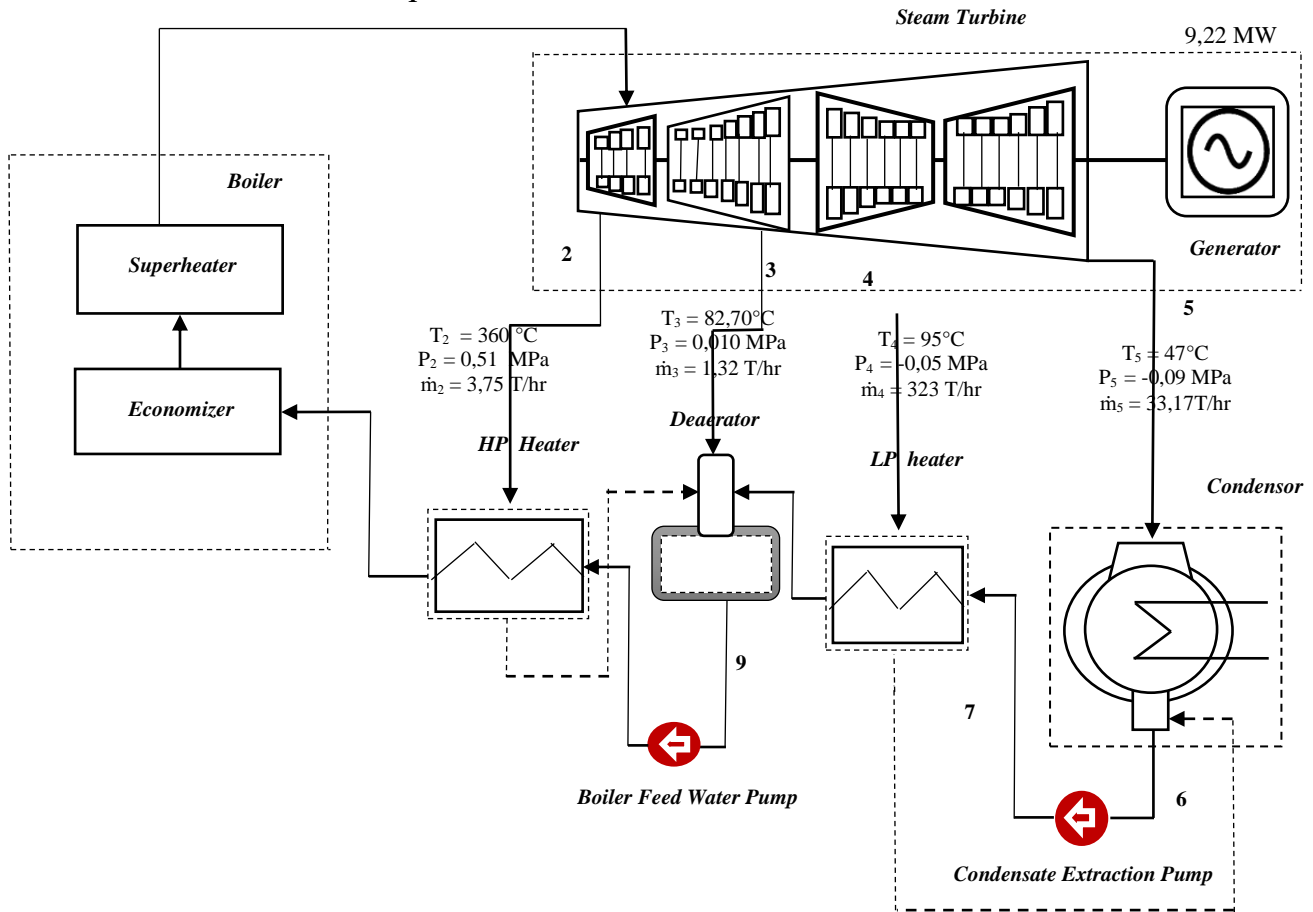
Fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui LP Heater dengan cairan jenuh pada kondisi 8. Langkah ini adalah *isobar*.

Proses 9-10-11

Kompresi isentropik dalam pompa menuju ke kondisi 11 dalam daerah cairan hasil kompresi.

Proses 11-a

Perpindahan kalor ke fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui boiler untuk menyelesaikan siklus. Langkah ini adalah *isobar*.



Gambar 9. Desain Sistem Pembangkit

3.3 Data Proses

3.3.1 Data Pengamatan Boiler-Furnace

Tahapan pertama adalah pengumpulan data pada Unit Boiler-Furnace. Pengumpulan data meliputi data komposisi batubara dan data komposisi refuse.

Tabel 1. Data Komposisi Batubara As Received Basis

Analisa Ultimate (%)		Analisa Proximate (%)	
Carbon (C)	48,63	Moisture Content	26,38
Hydrogen (H ₂)	3,36	Ash Content	9,31
Oxygen (O ₂)	10,50	Volatile Matter	32,00
Nitrogen (N ₂)	0,70	Fixed Carbon	32,31
Sulfur (S)	1,12	HHV (kcal/kg)	4.594

(Sumber: Report Analysis Sucofindo)

Tabel 2. Data Komposisi Refuse

Parameter	Nilai (%)
Abu	99,79
Carbon	0,21

(Sumber: Report Analysis Sucofindo)

Tabel 3. Data Pengamatan Boiler-Furnace

Parameter Operasi	Tanggal		
	1	2	3
Laju alir massa Batubara (T/hr)	8.450	8.300	8.600
Laju alir massa Boiler Feed Water (T/hr)	44,68	43,55	43,98
Temperatur Boiler Feed Water in Economizer (°C)	151	149	149
Temperatur Boiler Feed Water out Economizer (°C)	269	255	268
Relative Humidity (%)	71	71	71
Temperature Udara Masuk Air Heater (°C)	44	43	46
Temperature Udara Masuk Air Heater (°C)	150	158	149
Laju alir Steam (T/hr)	42,67	40,29	40,35
Temperatur Steam (°C)	476	474	476
Tekanan Steam (MPa)	4,82	4,83	4,81
Laju Alir Blowdown (T/hr)	2,01	3,26	3,63
Temperatur Blowdown (°C)	274	260	273
Analisa Orsat Flue Gas CO ₂ (%)	13,55	13,55	13,55
Analisa Orsat Flue Gas CO (%)	0,50	0,50	0,50

Analisa Orsat <i>Flue Gas</i> SO ₂ (%)	0,049	0,049	0,049
Analisa Orsat <i>Flue Gas</i> O ₂ (%)	5,14	5,14	5,14
Analisa Orsat <i>Flue Gas</i> N ₂ (%)	80,76	80,76	80,76
Temperature <i>Stack Gas</i> (°C)	151	148	143
Temperature <i>Out Furnace</i> (°C)	781	779	780
Temperature <i>Refuse</i> (°C)	177	176	178

3.3.2 Data Pengamatan Turbin Uap

Tahapan kedua adalah pengumpulan data pada Unit Turbin Uap. Pengumpulan data meliputi data laju aliran massa, tekanan, dan temperature untuk kondisi operasi pada uap yang dihasilkan.

Tabel 4. Data Pengamatan Turbin Uap

Parameter	Tanggal		
	1	2	3
Daya Terpasang (MW)	9,22	8,68	8,50
Laju alir <i>Steam</i> masuk <i>Turbine</i> (T/hr)	42,67	40,29	40,35
Temperatur <i>Steam</i> masuk <i>Turbine</i> (°C)	476	474	476
Tekanan <i>Steam</i> masuk <i>Turbine</i> (MPa)	4,82	4,83	4,81
Laju alir <i>Exhaust Steam High Pressure</i> (T/hr)	3,75	3,85	3,78
Temperature <i>Exhaust Steam High Pressure</i> (°C)	360	350	360
Tekanan <i>Exhaust Steam High Pressure</i> (MPa)	0,51	0,48	0,50
Laju alir <i>Exhaust Steam Low Pressure</i> (T/hr)	3,23	3,33	3,26
Temperature <i>Exhaust Steam Low Pressure</i> (°C)	95	95	90
Tekanan <i>Exhaust Steam Low Pressure</i> (MPa)	-0,05	-0,045	-0,05
Laju alir <i>Exhaust Steam</i> ke <i>Deaerator</i> (T/hr)	1,32	1,42	1,35
Temperature <i>Exhaust Steam</i> ke <i>Deaerator</i> (°C)	82,70	81,40	80,00
Tekanan <i>Exhaust Steam</i> ke <i>Deaerator</i> (MPa)	0,01	0,02	0,02
Laju alir <i>Exhaust Steam</i> ke <i>Condenser</i> (T/hr)	33,17	30,69	30,82
Temperature <i>Exhaust Steam</i> ke <i>Condenser</i> (°C)	47	45	45
Tekanan <i>Exhaust Steam</i> ke <i>Condenser</i> (MPa)	-0,090	-0,091	-0,092

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian yang telah dilakukan selama tiga hari dengan pengambilan data kondisi operasi yang meliputi data kondisi operasi *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap dapat dianalisa dengan hasil metode perhitungan energi dan eksergi.

Boiler-furnace merupakan bagian terpenting dalam suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yaitu untuk menghasilkan *steam* yang digunakan sebagai penggerak turbin yang akan menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik. Turbin Uap adalah satu peralatan dimana kerja dibangkitkan sebagai hasil dari lewatnya uap panas atau *superheated steam* melalui satu set barisan sudu-sudu yang terpasang pada poros yang dapat bebas berputar.

Boiler-Furnace dan Turbin Uap yang terdapat pada PLTU X telah beroperasi selama 10 tahun dalam memenuhi kebutuhan energi listrik bagi area pertambangan, pemakaian pembangkit sendiri dan penjualan energi listrik ke PLN. Untuk itulah perlu dilakukan evaluasi terhadap kinerja *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap.

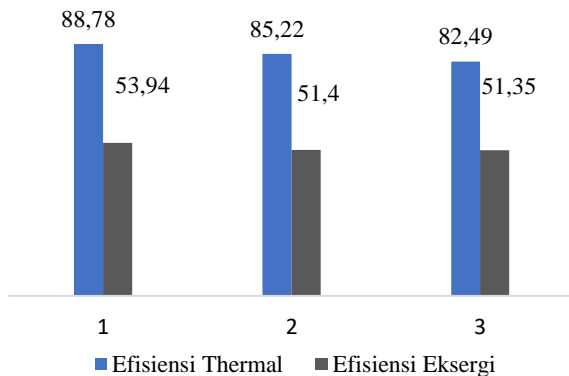
Evaluasi kinerja yang dilakukan pada *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap dengan menggunakan metode Analisis energi dan eksergi. Analisis energi untuk mengevaluasi energi pada kuantitasnya saja sedangkan analisis eksergi menilai energi pada kuantitas maupun kualitas, dan mengidentifikasi besaran dan lokasi kehilangan energi nyata untuk meningkatkan sistem, proses atau komponen. Dalam menghitung Analisis energi konsep terfokus pada hukum ke-1 Termodinamika bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi dapat diubah ke bentuk yang lain. Dengan pendekatan ini, strategi efisiensi energi lebih cenderung pada efisiensi termal. Sedangkan dalam menghitung Analisis eksergi konsep terfokus pada hukum ke-2 Termodinamika yang memberikan konsep efisiensi yang lebih baik dan untuk mengidentifikasi terjadinya pemusnahan eksergi.

Analisis energi merujuk pada perhitungan efisiensi termal dan analisa eksergi merujuk pada perhitungan efisiensi eksergi. Analisis energi dalam evaluasi ini merupakan efisiensi thermal yaitu ukuran tanpa dimensi yang menunjukkan performa peralatan mesin pembakaran dalam, yang merujuk pada energi yang dihasilkan per energi yang disuplai. Sedangkan analisis eksergi dalam evaluasi ini merupakan efisiensi eksergi yaitu kerja maksimum teoritis yang mampu di peroleh saat sistem tersebut berinteraksi dalam mencapai kesetimbangan dengan memperhitungkan juga lingkungan referensi eksergi.

Gambar 10 merupakan diagram hasil perhitungan energi dan eksergi pada *Boiler-Furnace*. Pada analisis energi *Boiler-Furnace* memiliki efisiensi termal rata-rata 85,5% dan menunjukkan bahwa kinerja *Boiler* cukup baik.

A. Analisis Energi dan Eksergi Boiler Furnace

Efisiensi Energi dan Eksergi Boiler-Furnace (%)



Gambar 10. Diagram Efisiensi Boiler-Furnace

Terjadi proporsi kenaikan dan penurunan terhadap efisiensi termal *Boiler-Furnace* yang disebabkan beberapa faktor, yaitu :

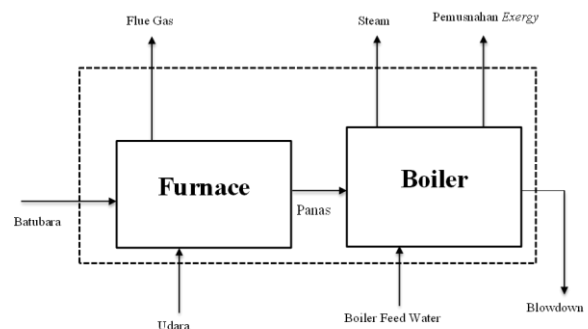
1. Besarnya persentase panas keluar akibat panas pembakaran CO yang disebabkan oleh pembakaran yang tidak sempurna. Pembakaran yang tidak sempurna dapat timbul dari kurangnya udara yang disuplai atau kelebihan bahan bakar, yang kemudian mengarah pada pencampuran udara dan bahan bakar. Pengaturan O_2 excess sangat penting karena udara pembakaran yang terlalu berlebih akan menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna.
2. Temperatur udara pembakaran merupakan faktor yang mempengaruhi efisiensi *Boiler-Furnace*, temperatur udara pembakaran dapat dinaikkan dengan memanfaatkan temperatur gas buang yang tinggi melalui *air heater*. Udara pembakaran dipanaskan terlebih dahulu pada sebuah *air heater* sehingga menyebabkan beban kerja *Boiler* menjadi lebih ringan. Pengendalian temperatur furnace $900^{\circ}C$. Hal ini jika temperatur pembakaran batubara diatas $1000^{\circ}C$ akan menimbulkan melting didalam furnace. Penggumpalan abu dan pasir dapat disebabkan oleh interaksi mineral alkali yang terdapat dalam abu dengan silikat yang terdapat dalam *bed material* pasir pada saat pembakaran terjadi dimana suhu deformasi dan leleh abu turun hingga sekitar $300^{\circ}C$.
3. Pemanasan air umpan *Boiler* dengan *Economizer*. Pada titik dimana efisiensi menurun dikarenakan temperatur air umpan *Boiler* juga cukup rendah, sedangkan pada titik dimana efisiensi *Boiler* tinggi dikarenakan temperatur air umpan *Boiler* sudah cukup tinggi. Hal tersebut terjadi karena pada *Economizer* dilakukan pemanasan terlebih dahulu sehingga mengurangi beban kerja *Boiler*.
4. *Slagging* dan *Fouling* merupakan faktot yang dapat mempengaruhi penurunan efisiensi kinerja *Boiler*. Permukaan *slagging* pada pipa *waterwall* dapat disebabkan oleh lelehan, tetesan abu yang membentuk endapan di permukaan pipa. Apabila batubara yang

digunakan memiliki suhu lebur abu yang relatif rendah, abu yang menempel dapat membentuk lapisan dan seiring waktu akan berkembang. Selain itu jika *slagging* sudah menempel pada dinding pipa cukup lama, berat *slagging* bisa menarik dinding pipa turun. Hal ini sangat berbahaya dikarenakan akan mengurangi ketebalan, dinding pipa dan rentan menyebabkan kebocoran dinding pipa. Selain itu kandungan yang terdapat pada *slagging* ini berupa unsur-unsur logam besi oksida yang bersifat korosif terhadap dinding pipa.

5. *Fouling* merupakan fenomena menempel dan menumpuknya abu pada pipa *waterwall* atau dinding penghantar panas lainnya seperti, *superheater*.

Fouling ini bisa terjadi jika temperatur gas pada bagian *furnace* lebih rendah dibandingkan temperatur titik leleh abu. Unsur yang paling utama penempelan abu ini adalah kadar material basa terutama Na, yang dalam hal ini adalah kadar Na_2O atau senyawa alkali. Bila kadar abu batubara banyak, kemudian unsur basa dalam abu juga banyak, ditambah kadar alkali juga tinggi, *fouling* pada material akan mudah terjadi. Evaluasi karakteristik *fouling* sama dengan *slagging*, yaitu dinilai berdasarkan rasio unsur basa dan asam, serta kadar alkali di dalam abu. Jika nilai-nilai tadi tinggi maka secara umum kecenderungan *fouling* juga meningkat. kadar sulfur yang tinggi juga cenderung mendorong timbul nya *fouling* melalui pembentukan senyawa bersuhu lebur rendah, melalui persenyawaan dengan unsur basa ataupun besi.

Pada analisis eksergi *Boiler-Furnace* memiliki efisiensi eksergi rata-rata 52,2%. Nilai ini menunjukkan bahwa 47,8% dari *exergy* yang dipasok ke unit penukar kalor melalui produk pembakaran mengalami kehancuran.



Gambar 11. Diagram Eksergi Boiler-Furnace

Pada *Boiler-Furnace* merupakan komponen yang menyedot sumber daya terbesar dikarenakan cukup banyak diantara eksergi yang masuk ke pembangkit bersama bahan bakar dihancurkan oleh irreversibilitas didalam komponen tersebut. Ada dua sumber irreversibilitas di dalam *Boiler*, yaitu: perpindahan kalor irreversibel yang terjadi diantara gas-gas panas hasil pembakaran dengan fluida kerja dari siklus tenaga uap yang mengalir melalui pipa-pipa *Boiler* dan proses pembakaran itu sendiri. Proses irreversibilitas internal merupakan sifat tidak dapat kembali kepada keadaan awalnya setelah proses berlangsung yang terjadi di dalam sistem (Moran, 2006).

Pada perhitungan eksergi juga memperhitungkan keadaan lingkungan sekitar yang disebut dengan lingkungan referensi eksergi. Sejauh ini eksergi telah di pandang sebagai kerja teoritis maksimum yang diperoleh dari sistem kombinasi ditambah dengan lingkungan, ketika suatu sistem bergerak dari keadaan yang diberikan menuju ke keadaan mati, dimana hanya terjadi interaksi dengan lingkungan saja. Proses irversibilitas akan mengakibatkan adanya laju pemusnahan eksergi yang berarti energi yang hancur yang benar-benar tidak dapat dimanfaatkan dalam sistem.

Dari hasil analisa diatas maka perlu dilakukan tindakan peningkatan kinerja *Boiler-Furnace*. Tindakan evaluasi terhadap kinerja boiler sangat penting dilakukan karena performa atau kinerja dari suatu *boiler*, akan menurun sepanjang waktu akibat dari proses pembakaran yang tidak sempurna, *fouling* yang terjadi pada alat penukar panas dan teknik perawatan dan pengoperasian yang kurang memadai.

Upaya untuk meningkatkan efisiensi *Boiler-Furnace* sebenarnya bisa dilakukan tidak sebatas dengan pengaturan O_2 excess dan pembersihan *tubes*, akan tetapi dapat dilakukan dengan meningkatkan efisiensi pembakaran, efisiensi perpindahan panas ke air dalam *tubes* dan pengurangan kehilangan panas ke lingkungan. Sehingga data desain boiler ini menghasilkan O_2 excess yang rendah (0,5%) dan temperatur *flue gas* yang rendah (<100°C).

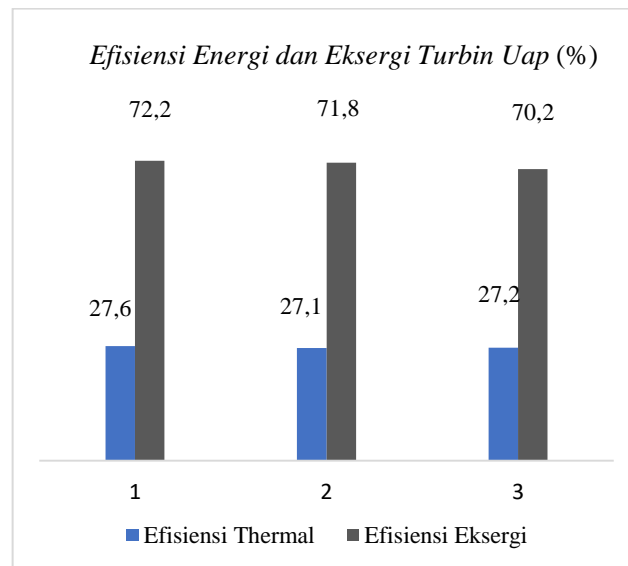
Upaya lain untuk peningkatan efisiensi adalah dengan mengurangi *heat loss* yang terjadi selama proses pembakaran di dalam boiler. Sebagaimana hasil evaluasi bahwa *heat loss* terbesar adalah pada panas pembakaran CO memperkirakan pencampuran antara udara dan bahan bakar yang ideal (*air and fuel ratio*) dan dengan mendesain burner dengan burner yang lebih baik. Kehilangan panas radiasi yaitu nilai *heat losses* terbesar dikarenakan panas radiasi merupakan tahapan pertama terjadinya perpindahan panas di dalam *Boiler* dimana energi panas radiasi akan terpancar ke pipa-pipa *water wall*, sehingga memanaskan pipa-pipa tersebut. Kemudian, panas yang terserap oleh permukaan pipa akan berpindah secara konduksi yang berpindah ke sisi permukaan dalam pipa. Setelah itu, di dalam pipa mengalir air yang terus-menerus menyerap panas tersebut. Proses penyebaran panas antar molekul air di dalam aliran ini terjadi secara konveksi. Itu sebabnya energi pancaran radiasi memberikan energi yang paling besar untuk membantu dalam proses pemanasan air *feed water Boiler*. Semakin energi yang diberikan itu besar, semakin besar pula nilai *heat losses* yang terjadi.

B. Analisis Energi dan Eksergi Turbin Uap

Gambar 12 merupakan hasil analisa energi Turbin Uap memiliki nilai efisiensi *thermal* rata-rata 27,30% dan nilai efisiensi eksergi rata-rata 71,40%.

Terdapat perbedaan antara perhitungan *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap. Jika *Boiler-Furnace* memiliki nilai efisiensi *thermal* lebih tinggi dari efisiensi eksergi, Turbin Uap dengan hasil sebaliknya. Efisiensi *Thermal* Turbin Uap rendah dikarenakan oleh energi dari *exhasut steam*

yang cukup banyak menjadi *waste heat boiler*. Sedangkan efisiensi eksergi besar dikarenakan memanfaatkan dari kerja turbin untuk menghasilkan daya yang disebut dengan eksergi *power* yang digunakan dalam perhitungan untuk mencari laju pemusnahan eksergi. Dikarenakan prinsip Turbin Uap ini menghasilkan kerja, jadi tidak banyak eksergi yang hancur. Berdasarkan literatur sumber Jurnal *Energy and Eksergi Analysis of Fully Condensing Steam-Turbine at Various Steam Load Condition* mendapatkan hasil yang tidak jauh berbeda, Efisiensi Energi yang didapatkan yaitu 30,66%, sedangkan Efisiensi Eksergi yaitu 76,82%.



Gambar 12. Diagram Efisiensi Turbin Uap

Perhitungan efisiensi *thermal* Turbin Uap menggunakan konsep *Siklus Rankine*. Terjadi proporsi kenaikan dan penurunan terhadap efisiensi *thermal* Turbin Uap yang dapat dievaluasi dari daya yang dihasilkan kerja turbin. Dalam jurnal M.M. Rashidi, A. Aghagoli, dan M. Ali yang berjudul *Thermodynamic Analysis of a Steam Power Plant with Double Reheat and Feed Water Heaters* menyimpulkan bahwa ketika tekanan *high pressure* turbin meningkat, entalpi keluaran turbin menurun dan beban kalor kondenser menurun karena entalpi inlet dan outlet pada kondenser konstan dan laju aliran massa menurun. Hal tersebut dapat diperhatikan bahwa penurunan entalpi lewat turbin dan laju aliran massa ekstraksi meningkat seiring tekanan inlet *high pressure* turbin meningkat, sehingga daya keluaran turbin meningkat. Hal ini merupakan akibat dari perubahan gradien garis uap jenuh, daya turbin menurun dan hal tersebut menjelaskan perilaku dari efisiensi *thermal* Turbin Uap yang meningkat dan menurun seiring peningkatan tekanan ekstraksi turbin.

Pada perhitungan nilai efisiensi eksergi rata-rata 71,40% itu menunjukkan bahwa 27,30% dari eksergi yang masuk ke Turbin Uap dengan fluida kerja *steam* yang mengalami kehancuran. Nilai kehancuran atau laju pemusnahan eksergi pada Turbin Uap berbeda dengan nilai kehancuran yang dimiliki oleh *Boiler-Furnace*. Disebabkan oleh prinsip dari Turbin Uap lebih

menghasilkan kerja ketimbang panas. Dari kedua analisa energi dan eksergi tersebut menunjukkan bahwa kinerja Turbin Uap masih cukup baik dikarenakan masih memanfaatkan panas dari *exhaust steam*.

V. KESIMPULAN

Analisa Energi dan Eksergi sistem pembangkit listrik tenaga uap dilakukan pada *Boiler-Furnace* dan Turbin Uap. Performansi *Boiler Furnace* dievaluasi dari efisiensi termal dan efisiensi eksergi dengan menganalisa pemakaian batubara, nilai kalor batubara dan energi *steam* yang dihasilkan. Pada penelitian efisiensi termal tertinggi yaitu 88,78% dan efisiensi eksergi 53,94% yang dilakukan pada pengamatan hari pertama, artinya nilai tersebut menunjukkan *performance* kinerja *Boiler-Furnace* masih relatif baik.

Terjadi proporsi kenaikan dan penurunan terhadap efisiensi *Boiler-Furnace* yang dapat dievaluasi dari beberapa faktor diantaranya: (1) Pembakaran yang tidak sempurna yang terjadi dalam ruang bakar *furnace*. (2) Temperatur udara pembakaran batubara diatas 900°C yang akan menimbulkan aglomerasi atau penggumpalan abu dan pasir di dalam *furnace* dan menghambat terjadinya perpindahan panas di dalam ruang bakar *furnace*. (3) Pembentukan *slagging* dan *fouling* yang terjadi pada permukaan panas seperti *water wall tube* dan *superheater*.

Efisiensi thermal Turbin Uap adalah 27,30% dan Efisiensi eksergi Turbin Uap adalah 71,40%. Dari kedua analisa energi dan eksergi tersebut menunjukkan bahwa kinerja Turbin uap masih cukup baik dikarenakan masih memanfaatkan panas dari *exhaust steam*. Perbedaan selisih antara Efisiensi thermal dan eksergi disebabkan oleh hancurnya energi yang tidak termanfaatkan oleh faktor irreversibilitas. Hal tersebut berkaitan dengan hukum kedua termodinamika yang berbunyi “*tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam satu siklus, menerima kalor dari sebuah reservoir dan mengubah seluruhnya menjadi energi*” (Kelvin Planck).

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran M. 1996. *Thermal Design and Optimization*. U.S.A: John Wiley and Sons Inc.
- Cengel, Y.A., Cimbala, J.M., & Ghajar, A.J. 2022. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*, 6th Edition.,New York: McGraw-Hill.
- Cengel, Y.A., Boles, M.A. 2006. *Thermodynamics An Engineering Approach*, 9th Edition.,Dubuque, Iowa: McGraw-Hill.
- Hougen, Olaf A., Watson, Kenneth M., Ragatzm Roland A. 1961. *Chemical Process Principles Part 1: Material & Energy Balance*. NewYork: McGraw-Hill Book Company.
- Kern, Donald Q. 1965. *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Moran, Michael. J., Shaphiro, Howard. N. 2006. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. NewYork: McGraw-Hill Book Company.
- Nag, P. K. 2002. *Power Plant Engineering*, 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Perry, Robert. H., Green. Don. W., Maloney. James. O. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7th Edition. NewYork: McGraw-Hill Book Company.
- Rashidi, M. M., Aghagoli, A., Ali, M. 2014. *Thermodynamic Analysis of a Steam Power Plant with Double Reheat and Feed Water Heaters*. Creative Commons Attribution License.
- Yusuf, Fernando. 2015. *Thermodynamic Analysis of a Steam Turbine Flow Mass The Extraction of High Pressure for Feedwater Heater Performance of Steam Power Plant 200 MW PT. PJB Gresik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.