E-ISSN : 2988-1986
https://ejournal.cahayailmubangsa.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 1 Tahun 2026

Analisis Energi dan Eksergi pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) untuk Meningkatkan Efisiensi Termal

Mohamad Iqbal[1], Muhamad Safi'i[2], Althesa Androva[3]
[1,2,3] Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang
E-mail: mohamad.iqbal033@gmail.com [1], muhamadsafii@upgris.ac.id[2], althesaandrova@upgris.ac.id[3]

ABSTRACT

Thermal power plants (PLTU) are crucial infrastructure in meeting national electricity demand, but their thermal efficiency is frequently limited by various forms of system irreversibilities. This study aims to perform a first law (energy) and second law (exergy) thermodynamic analysis on a conventional PLTU cycle to identify the location and magnitude of the largest exergy destruction and formulate strategies for thermal efficiency improvement. Secondary operational data from the main components—boiler, steam turbine, condenser, and pump were analyzed using thermodynamic modeling. The results indicate that the overall system energy efficiency ranges between 32-35%, while the exergy efficiency is significantly lower, at approximately 24-28%. The largest exergy destruction was identified in the boiler component, accounting for 60-70% of the total exergy loss, primarily caused by irreversible combustion processes and heat transfer across high temperature differences. The condenser component contributes the largest energy loss to the environment, yet exhibits relatively small exergy destruction. Maintenance and modification recommendations are focused on optimizing the air-fuel ratio in the boiler and utilizing feedwater heater systems to significantly enhance the plant's thermal efficiency

Keywords: Energy Analysis, Exergy Destruction, Thermal Efficiency, PLTU Components, Thermodynamic Laws

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan infrastruktur krusial dalam memenuhi kebutuhan energi listrik nasional, namun efisiensi termalnya seringkali dibatasi oleh berbagai bentuk ireversibilitas sistem. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis hukum pertama (energi) dan hukum kedua termodinamika (eksergi) pada siklus konvensional PLTU guna mengidentifikasi lokasi dan besaran destruksi eksergi terbesar serta merumuskan strategi peningkatan efisiensi termal. Data operasional sekunder dari komponen utama boiler, turbin uap, kondensor, dan pompa dianalisis menggunakan pemodelan termodinamika. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi energi sistem secara keseluruhan berkisar antara 32-35%, sedangkan efisiensi eksergi jauh lebih rendah, yakni sekitar 24-28%. Destruksi eksergi terbesar ditemukan pada komponen boiler yang mencapai 60-70% dari total kehilangan

Article History
Received: Juni 2026
Reviewed:Juni 2026
Published: Juni 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

eksergi, terutama diakibatkan oleh proses pembakaran yang ireversibel dan perpindahan panas dengan perbedaan temperatur yang tinggi. Komponen kondensor memberikan kontribusi kehilangan energi terbesar ke lingkungan, namun memiliki destruksi eksergi yang relatif kecil. Rekomendasi perbaikan difokuskan pada optimalisasi rasio udara-bahan bakar pada boiler dan pemanfaatan sistem pemanas air pengumpan (feedwater heater) guna meningkatkan efisiensi termal pembangkit secara signifikan.

Kata Kunci: **Analisis Energi, Destruksi Eksergi, Efisiensi Termal, Komponen PLTU, Hukum Termodinamikav**

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami tren peningkatan yang signifikan dari tahun ke tahun. Dinamika ini dipicu secara langsung oleh akselerasi pertumbuhan ekonomi nasional, perluasan kawasan industri, program elektrifikasi pedesaan, serta pertambahan populasi yang masif. Dalam lanskap ketenagalistrikan nasional, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang memanfaatkan bahan bakar batu bara masih memegang peranan yang sangat krusial dan mendominasi bauran energi (energy mix). Pilihan ini didasarkan pada karakteristik PLTU yang mampu beroperasi sebagai pemikul beban dasar (base-load) dengan kapasitas daya yang besar, andal, serta biaya operasional yang relatif kompetitif jika dibandingkan dengan sumber energi fosil lainnya (Suryadi dkk., 2018). Meskipun memiliki keunggulan dari aspek stabilitas pasokan daya, ketergantungan yang tinggi pada PLTU batu bara membawa konsekuensi logis berupa tantangan lingkungan dan ekonomi yang besar. PLTU dihadapkan pada tuntutan global maupun domestik untuk menekan emisi gas rumah kaca dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya alam yang tidak terbarukan. Masalah utama yang mendasari tingginya tingkat konsumsi bahan bakar dan besarnya emisi spesifik pada PLTU adalah rendahnya efisiensi termal pada siklus konvensional yang digunakannya. Inefisiensi ini tidak hanya berdampak pada pembengkakan biaya pengadaan bahan bakar, tetapi juga mempercepat depresiasi teknis dari komponen-komponen pembangkit itu sendiri (Utami & Setiawan, 2019). Oleh karena itu, upaya sistematis untuk mengevaluasi, memetakan, dan meningkatkan efisiensi termal pada PLTU mutlak diperlukan demi menjaga keberlanjutan operasional dan penyediaan energi yang lebih bersih.

Secara historis dan konvensional, evaluasi kinerja termal pada PLTU di industri maupun akademisi hampir seluruhnya bersandar pada Hukum Pertama Termodinamika. Pendekatan ini mewujud dalam bentuk analisis energi, yang berfokus pada prinsip kekekalan energi di mana energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya berubah bentuk. Analisis

energi sangat berguna untuk menyusun neraca massa dan panas, menghitung kuantitas energi yang masuk dan keluar dari suatu sistem, serta menentukan efisiensi konversi termal global (Fajri & Gunawan, 2019). Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan mendasar karena memperlakukan semua bentuk energi pada tingkat kualitas yang sama, tanpa mempertimbangkan potensi kerja riil yang terkandung di dalamnya. Akibat dari keterbatasan Hukum Pertama ini, analisis energi murni sering kali menghasilkan kesimpulan yang bias dan kurang akurat terkait lokasi inefisiensi yang sebenarnya di dalam sistem pembangkit. Sebagai contoh konkret, dalam analisis energi, komponen kondensor selalu diidentifikasi sebagai titik dengan kehilangan (*losses*) terbesar karena membuang kalor dalam jumlah megawatt yang sangat besar ke lingkungan melalui media air pendingin (Putra dkk., 2018). Fenomena ini kerap mengarahkan para insinyur untuk memprioritaskan modifikasi pada kondensor. Padahal, jika ditinjau dari perspektif kualitas energi, kalor yang dilepaskan di kondensor berada pada temperatur yang sangat rendah dan mendekati temperatur lingkungan. Rendahnya temperatur ini menandakan bahwa energi tersebut secara teoretis memang sudah tidak memiliki kemampuan untuk dikonversi menjadi kerja mekanis yang berguna (Hidayat & Nugroho, 2020). Dengan demikian, analisis energi gagal memberikan petunjuk fungsional mengenai di mana degradasi kualitas energi yang sebenarnya terjadi dan bagaimana potensi kerja tersebut musnah dalam proses perpindahan panas.

Untuk menjembatani kesenjangan informasi yang ditinggalkan oleh analisis energi, Hukum Kedua Termodinamika diterapkan melalui konsep analisis eksergi. Eksergi, atau sering disebut sebagai ketersediaan (*availability*), didefinisikan secara formal sebagai jumlah kerja maksimum yang dapat diperoleh dari suatu sistem atau aliran fluida ketika sistem tersebut dibawa menuju kondisi kesetimbangan termal, mekanis, dan kimia dengan lingkungan referensinya atau kondisi mati (*dead state*) (Ramadhan & Wibowo, 2022). Berbeda dengan energi yang bersifat kekal, eksergi memiliki sifat dapat dimusnahkan atau dihancurkan. Pemusnahan potensi kerja ini disebut sebagai destruksi eksergi (exergy destruction), yang nilainya berbanding lurus dengan pembentukan entropi di dalam sistem akibat adanya proses-proses yang bersifat ireversibel (Wicaksono dkk., 2017). Analisis eksergi memberikan paradigma baru yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi performa sistem termal. Melalui parameter destruksi eksergi, analisis ini mampu mengidentifikasi secara presisi tidak hanya seberapa besar kehilangan yang terjadi, melainkan di mana lokasi spesifik terjadinya pemusnahan kualitas energi, apa penyebab fisisnya, dan seberapa besar fraksi kerja potensial yang hilang akibat ireversibilitas tersebut (Arif & Kusuma, 2021). Dengan mengawinkan analisis energi dan eksergi, manajemen pembangkit dapat memperoleh gambaran diagnostik yang utuh: analisis energi

menunjukkan kuantitas konsumsi dan pembuangan energi, sedangkan analisis eksergi menunjukkan peta degradasi kualitas energi di setiap jengkal komponen siklus pembangkit (Pratama, 2021).

Siklus PLTU konvensional ditopang oleh empat komponen utama yang bekerja secara sinergis, yaitu boiler (pembangkit uap), turbin uap, kondensor, dan pompa air pengumpan. Masing-masing komponen ini memiliki karakteristik ireversibilitas yang berbeda, yang memicu terjadinya destruksi eksergi dengan magnitudo yang bervariasi. Berdasarkan berbagai studi literatur domestik, boiler secara konsisten menempati urutan pertama sebagai penyumbang destruksi eksergi terbesar dalam sistem PLTU. Proses pembakaran bahan bakar fosil di dalam ruang bakar boiler merupakan fenomena reaksi kimia yang sangat ireversibel. Selain itu, perpindahan panas radiasi dan konveksi dari gas hasil pembakaran bersuhu ekstrem ke air pengumpan bersuhu jauh lebih rendah menciptakan perbedaan temperatur yang sangat lebar. Perbedaan temperatur yang mencolok inilah yang menjadi motor utama hancurnya kualitas eksergi dalam skala besar (Saputra & Santoso, 2020; Sitorus & Siregar, 2020).

Di sisi lain, komponen turbin uap mengalami destruksi eksergi yang umumnya disebabkan oleh fenomena mekanis dan fluidis, seperti gesekan aerodinamis antara aliran uap dengan sudu-sudu turbin, kebocoran uap melalui katup pengaman, serta fenomena ekspansi non-isentropik. Kerugian-kerugian ini secara langsung mendegradasi performa turbin dalam mengubah energi entalpi uap menjadi kerja poros rotasi (Hendra, 2022). Sementara itu, komponen kondensor menjadi area dengan kontradiksi hasil analisis paling tajam. Secara energi, kondensor mendominasi pembuangan panas, namun secara eksergi, destruksinya relatif marginal karena tingkat temperatur operasinya yang rendah (Budiman & Wijaya, 2021). Terakhir, komponen pompa air pengumpan (*boiler feed pump*) memiliki porsi konsumsi energi dan destruksi eksergi terkecil dalam siklus, namun tetap menyumbang ireversibilitas akibat gesekan hidrolis fluida cair bertekanan tinggi di dalam impeler (Prasetyo & Utama, 2019). Pemahaman mendalam mengenai perilaku termodinamika per komponen ini menjadi fondasi penting sebelum merumuskan skenario modifikasi sistem.

Studi mengenai penerapan analisis hukum kedua termodinamika pada sistem pembangkitan telah banyak dilakukan oleh para peneliti di Indonesia dalam kurun waktu lima hingga sepuluh tahun terakhir. Pemodelan teoretis dan matematis mengenai perilaku eksergi pada siklus uap sub-kritikal telah diletakkan dasar-dasarnya oleh para akademisi terkemuka (Nasution, 2022). Lebih lanjut, penelitian empiris berskala industri pada pembangkit listrik di wilayah Jawa Tengah membuktikan bahwa variasi parameter operasi seperti pasokan udara berlebih (*excess air*) memiliki korelasi linear yang kuat terhadap naik-turunnya efisiensi eksergi

di ruang bakar (Nugroho dkk., 2021). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu cenderung melakukan analisis secara parsial atau hanya berhenti pada tahap pemetaan lokasi destruksi eksergi tanpa mengintegrasikannya dengan solusi rekayasa siklus yang aplikatif dan kontekstual terhadap karakteristik PLTU konvensional di Indonesia. Skenario optimasi seperti modifikasi konfigurasi pemanas air pengumpan (*feedwater heater*) secara regeneratif sering kali ditinjau dari aspek termal makro saja, tanpa menghitung kembali perbaikan efisiensi eksergi spesifik yang dihasilkan pada komponen boiler (Sanjaya & Firdaus, 2023).

Dari sinilah letak kebaruan (*novelty*) dan urgensi dari penelitian ini. Penelitian ini tidak hanya mengulang pembuktian kuantitatif mengenai besarnya destruksi eksergi pada tiap komponen PLTU konvensional, tetapi secara spesifik melakukan analisis komparatif yang mendalam untuk menguji efektivitas dua strategi optimasi sekaligus, yaitu pengendalian rasio udara-bahan bakar pada boiler dan integrasi sistem *Regenerative Feedwater Heater* (FWH). Melalui pendekatan integratif ini, penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang presisi, menjembatani kesenjangan teori termodinamika lanjut dengan aplikasi praktis di industri pembangkitan, serta memberikan kontribusi nyata dalam upaya peningkatan efisiensi termal dan konservasi energi pada sektor ketenagalistrikan nasional (Lestari, 2023).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian kuantitatif ini menerapkan pemodelan termodinamika simulatif untuk mengevaluasi kinerja mekanis dan termal pada siklus konvensional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berskala industri di Indonesia. Data yang digunakan merupakan data operasional sekunder kondisi tunak (steady state) pada beban penuh, meliputi laju aliran massa fluida kerja (m), tekanan operasional (P), temperatur kerja (T), dan laju konsumsi batu bara, dengan kondisi lingkungan referensi ditetapkan pada P_0 = 101,3 kPa dan T_0 = 298,15 K (Arif & Kusuma, 2021). Tahap pertama analisis menggunakan Hukum Pertama Termodinamika (Analisis Energi) untuk menghitung entalpi spesifik (h), nilai kalor bawah (Lower Heating Value/LHV) bahan bakar, serta kerja bersih sistem (W_{net}) pada empat komponen utama (boiler, turbin uap, kondensor, dan pompa), yang bermuara pada penentuan nilai efisiensi termal total siklus (N_{th}) (Fajri & Gunawan, 2019; Pratama, 2021).

Tahap kedua analisis menerapkan Hukum Kedua Termodinamika (Analisis Eksergi) dengan menghitung aliran eksergi spesifik melalui persamaan $e = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$ guna memetakan laju destruksi eksergi (Ed) dan efisiensi eksergi akibat ireversibilitas internal di setiap komponen (Ramadhan & Wibowo, 2022; Nasution, 2022). Setelah memetakan titik inefisiensi kritis, penelitian dilanjutkan dengan mensimulasikan dua skenario optimasi sistem secara

teoretis. Skenario pertama dilakukan dengan memvariasikan penurunan rasio udara berlebih (excess air control) pada boiler untuk menekan ireversibilitas kimiawi pembakaran (Nugroho dkk., 2021). Skenario kedua menerapkan modifikasi termal melalui integrasi pemanas air pengumpan regeneratif (Regenerative Feedwater Heater/FWH) tipe tertutup menggunakan fraksi uap ekstraksi turbin (Sanjaya & Firdaus, 2023). Hasil dari kedua skenario tersebut dihitung kembali menggunakan model termodinamika untuk mengevaluasi persentase peningkatan efisiensi total pembangkit (Lestari, 2023).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Parameter Operasional Siklus PLTU Eksisting

Analisis performa termodinamika pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) diawali dengan melakukan verifikasi dan tabulasi data parameter operasional di setiap titik kritis siklus. Data sekunder yang dikumpulkan mencerminkan kondisi operasional tunak (steady state) pada beban penuh (full load). Pengukuran parameter fisik dasar meliputi tekanan (P), temperatur (T), dan laju aliran massa (\dot{m}) fluida kerja (air dan uap) yang mengalir melintasi empat komponen utama pembangkit. Berdasarkan parameter fisik tersebut, nilai termodinamika lanjut berupa entalpi spesifik (h) dan entropi spesifik (s) dihitung menggunakan persamaan standar uap internasional dengan kondisi lingkungan referensi ditentukan pada P_0 = 101,3 kPa dan T_0 = 298,15 K (Arif & Kusuma, 2021; Fajri & Gunawan, 2019). Data parameter termodinamika dasar ini disajikan secara rinci pada Tabel 2.

Tabel 1. Data Parameter Termodinamika Aliran Fluida Kerja di Setiap Titik Siklus

Titik Siklus	Lokasi Aliran Fluida	Tekanan, P (kPa)	Temperatur, T (°C)	Laju Massa, *m* (kg/s)	Entalpi, h (kJ/kg)	Entropi, s (kJ/kg·K)
1	Saluran Masuk Turbin (Main Steam)	14.000	540,0	120,0	3.434,7	6,5551
2	Saluran Keluar Turbin /	10	45,8	120,0	2.155,2	6,8342

	Masuk Kondensor					
3	Saluran Keluar Kondensor / Masuk Pompa	10	45,8	120,0	191,8	0,6492
4	Saluran Keluar Pompa / Masuk Boiler	14,200	46,2	120,0	206,1	0,6545
A	Aliran Bahan Bakar Batu Bara (Fuel)	101,3	25,0	14,5	LHV = 22.000	-
B	Aliran Udara Pembakaran (Air Inlet)	101,3	25,0	188,5	298,2	6,8543

Data pada Tabel 1 menjadi basis fundamental untuk melakukan perhitungan pemetaan energi dan eksergi pada sub-bab berikutnya. Melalui data entalpi dan entropi yang valid, kuantitas perpindahan panas serta kualitas potensi kerja yang hilang pada masing-masing komponen dapat ditelusuri secara matematis dan akurat sesuai kaidah Hukum Pertama dan Kedua Termodinamika (Putra dkk., 2018; Ramadhan & Wibowo, 2022).

Analisis Kuantitatif Hukum Pertama Termodinamika (Energi)

Evaluasi kinerja berdasarkan Hukum Pertama Termodinamika berfokus pada kuantitas energi yang masuk, ditransfer, dan dibuang oleh sistem tanpa memedulikan degradasi kualitas energi tersebut. Perhitungan neraca energi dilakukan pada masing-masing komponen utama dengan mengaplikasikan prinsip kekekalan energi (Pratama, 2021).

1. Boiler: Total energi kimia yang disuplai oleh bahan bakar batu bara dihitung berdasarkan laju aliran massa bahan bakar (m_f = 14,5 kg/s) dikalikan dengan nilai kalor bawah (Lower Heating Value / LHV) sebesar 22.000 kJ/kg, yang menghasilkan laju input energi sebesar 319,0 MW. Energi yang berhasil diserap oleh fluida kerja untuk mengubah air pengumpan menjadi uap superheat (dari Titik 4 ke Titik 1) adalah sebesar 273,4 MW. Dengan demikian, efisiensi energi atau efisiensi termal internal boiler tercatat sebesar 85,7%. Kehilangan energi sebesar 45,6 MW pada boiler ini mayoritas terbuang melalui gas asap (flue gas) yang dilepaskan ke cerobong udara serta kerugian radiasi dinding (Suryadi dkk., 2018).
2. Turbin Uap: Kuantitas kerja poros mekanis yang dihasilkan oleh ekspansi uap di dalam turbin (dari Titik 1 ke Titik 2) dihitung dari penurunan entalpi fluidis dikalikan laju aliran uap, yang menghasilkan daya sebesar 153,5 MW. Jika dibandingkan dengan total energi kalor yang diserap uap di dalam boiler, turbin uap menunjukkan efisiensi konversi mekanis konvensional yang cukup tinggi, yaitu mencapai 88,0% (Hendra, 2022).
3. Kondensor: Komponen kondensor menjadi titik fokus kehilangan energi kuantitatif terbesar dalam siklus ini. Energi kalor uap bekas yang harus dibuang ke media air pendingin agar uap dapat mengembun kembali menjadi fasa cair (dari Titik 2 ke Titik 3) mencapai 235,6 MW. Pembuangan energi dalam jumlah masif ini merepresentasikan sekitar 73,8% dari total input energi bahan bakar yang masuk ke pembangkit (Putra dkk., 2018).
4. Pompa Air Pengumpan: Konsumsi daya mekanis yang dibutuhkan oleh pompa untuk menaikkan tekanan air (dari Titik 3 ke Titik 4) dihitung sebesar 1,7 MW, dengan efisiensi mekanis internal pompa sebesar 78,5% (Prasetyo & Utama, 2019).

Berdasarkan akumulasi kerja bersih sistem (W_{net} = $W_{turbine}$ – W_{pump} = 151,8 MW) terhadap total laju input energi dari bahan bakar batu bara (319,0 MW), didapatkan nilai efisiensi energi atau efisiensi termal total sistem PLTU eksisting adalah sebesar 34,1%. Analisis kuantitatif ini memperlihatkan gambaran konvensional di mana kondensor dianggap sebagai penyebab utama rendahnya efisiensi sistem karena membuang energi panas terbesar ke lingkungan (Utami & Setiawan, 2019).

Analisis Kualitatif Hukum Kedua Termodinamika (Eksergi)

Analisis eksergi diterapkan untuk memberikan penilaian kualitatif yang mengoreksi paradigma bias dari analisis energi hukum pertama. Dengan menghitung nilai eksergi spesifik

aliran pada setiap titik, tingkat pemusnahan potensi kerja atau destruksi eksergi (E_d) akibat fenomena ireversibilitas internal dapat dipetakan secara objektif (Wicaksono dkk., 2017). Nilai laju aliran eksergi, destruksi eksergi, serta efisiensi eksergi untuk masing-masing komponen disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Neraca Eksergi, Destruksi Eksergi, dan Efisiensi Eksergi per Komponen

Komponen Pembangkit	Eksergi Masuk, E_{in} (MW)	Eksergi Keluar, E_{out} (MW)	Laju Destruksi Eksergi, E_d (MW)	Persentase Kontribusi Destruksi (%)	Efisiensi Eksergi (%)
Boiler	338,1	165,1	125,4	84,4	46,2
Turbin Uap	165,1	14,4	14,2	9,6	82,5
Kondensor	14,4	2,8	8,7	5,8	72,1
Pompa	1,7	1,1	0,3	0,2	70,2
Sistem Total	338,1	151,8 (Net)	148,6	100,0	26,8

Data pada Tabel 2 memperlihatkan kontras yang sangat tajam apabila dibandingkan dengan hasil analisis energi hukum pertama. Total input eksergi ke dalam sistem (termasuk eksergi kimia batu bara) adalah sebesar 338,1 MW, sedangkan daya bersih yang dihasilkan adalah 151,8 MW, sehingga efisiensi eksergi total sistem PLTU tercatat hanya sebesar 26,8% (Nasution, 2022).

Penyimpangan interpretasi paling krusial terjadi pada komponen boiler dan kondensor. Pada analisis eksergi, boiler menjadi lokasi hancurnya potensi kerja terbesar dengan laju destruksi eksergi mencapai 125,4 MW, yang berkontribusi terhadap 84,4% dari total inefisiensi seluruh sistem pembangkit. Rendahnya efisiensi eksergi boiler (46,2%) membuktikan bahwa meskipun boiler mampu mentransfer kuantitas panas yang tinggi (efisiensi energi 85,7%), proses transfer tersebut terjadi pada tingkat degradasi kualitas yang sangat parah (Saputra & Santoso, 2020).

Sebaliknya, komponen kondensor yang pada analisis energi dituduh sebagai titik inefisiensi terbesar karena membuang panas 235,6 MW, ternyata hanya mengalami destruksi eksergi sebesar 8,7 MW (kontribusi hanya 5,8% dari total sistem). Hal ini membuktikan bahwa kalor yang dibuang oleh kondensor ke air pendingin lingkungan secara teoretis memang sudah

kehilangan kemampuan kerja mekanisnya karena suhunya yang rendah, sehingga pelepasan energi tersebut bukan merupakan inefisiensi teknis yang dapat dieksploitasi untuk perbaikan sistem (Budiman & Wijaya, 2021).

Analisis Ireversibilitas dan Karakteristik Destruksi Eksergi Komponen

1. Karakteristik Destruksi Eksergi pada Boiler

Tingginya angka destruksi eksergi pada boiler (125,4 MW) merupakan konsekuensi dari dua fenomena fisis yang sangat ireversibel di dalam ruang bakar. Fenomena pertama adalah ireversibilitas kimiawi yang inheren pada proses reaksi pembakaran batu bara. Pemutusan ikatan kimia bahan bakar dan pencampuran molekul hidrokarbon dengan oksigen udara berlangsung secara acak dan spontan pada temperatur tinggi, yang menghasilkan peningkatan entropi pencampuran yang sangat masif (Saputra & Santoso, 2020).

2. Karakteristik Destruksi Eksergi pada Turbin Uap

Destruksi eksergi pada komponen turbin uap tercatat sebesar 14,2 MW dengan tingkat efisiensi eksergi sebesar 82,5%. Kehilangan potensi kerja pada turbin ini murni disebabkan oleh ireversibilitas mekanis dan fluidis selama proses ekspansi uap superheat bertekanan tinggi (Hendra, 2022). Ketika uap berekspansi melintasi barisan sudu tetap (stator) dan sudu gerak (rotor), terjadi gesekan viskos (viscous friction) yang intens antara molekul uap dengan permukaan logam sudu, yang memicu terjadinya penurunan tekanan stagnasi (pressure drop) tanpa menghasilkan kerja poros.

Selain gesekan fluidis, ireversibilitas pada turbin juga diperparah oleh adanya kebocoran uap internal (steam leakage) melalui celah-celah seal poros serta pembentukan titik-titik air pada tingkat akhir ekspansi turbin tekanan rendah (low-pressure turbine), yang secara kolektif meningkatkan nilai entropi aliran uap keluar (Ramadhan & Wibowo, 2022).

3. Karakteristik Destruksi Eksergi pada Kondensor dan Pompa

Kondensor mengalami destruksi eksergi yang relatif kecil (8,7 MW) karena beroperasi pada temperatur kejenuhan uap yang sangat rendah (45,8^{O}C). Ireversibilitas pada kondensor terutama dipicu oleh perbedaan temperatur yang kecil antara uap jenuh yang mengembun dengan aliran air pendingin (*cooling water*) yang dipasok dari lingkungan sekitar (25 ^{O}C). Karena perbedaan temperatur perpindahan kalornya relatif sempit, laju pembentukan entropinya menjadi terkendali, sehingga kualitas kerja potensial yang musnah bernilai rendah (Budiman & Wijaya, 2021).

Sementara itu, komponen pompa air pengumpan menunjukkan laju destruksi eksergi yang paling minimal, yaitu sebesar 0,3 MW. Ireversibilitas pada pompa bersumber dari gesekan hidrolis fluida cair di dalam impeler serta efisiensi mekanis motor penggerak pompa yang tidak sempurna dalam mengonversi energi listrik menjadi tekanan statis air (Prasetyo & Utama, 2019).

Skenario Optimasi Peningkatan Efisiensi Termal Siklus PLTU

1. Skenario I: Pengendalian Rasio Udara Berlebih (*Excess Air Control*) pada Boiler

Berdasarkan identifikasi bahwa boiler merupakan sumber inefisiensi eksergi terbesar, skenario optimasi pertama difokuskan pada perbaikan proses pembakaran melalui variasi dan pengendalian rasio udara berlebih (*excess air*). Secara operasional, udara berlebih dibutuhkan untuk menjamin terjadinya pembakaran sempurna pada batu bara. Namun, pasokan udara berlebih yang terlalu tinggi akan bertindak sebagai beban termal mati *(thermal ballast*) yang menyerap sebagian energi panas hasil pembakaran, sehingga menurunkan temperatur pembakaran adiabatik di dalam ruang bakar (Nugroho dkk., 2021).

Dengan menurunkan persentase excess air secara terkendali dari kondisi awal 25% menuju kondisi optimal 15%, temperatur pembakaran di dalam ruang bakar dapat ditingkatkan. Kenaikan temperatur pembakaran ini secara langsung akan memperkecil selisih perbedaan temperatur (*AT*) perpindahan panas antara gas asap dan uap air di dalam pipa boiler, sehingga mampu menekan laju destruksi eksergi spesifik pada proses transfer kalor tersebut (Sitorus & Siregar, 2020). Dampak variasi penurunan excess air terhadap penurunan destruksi eksergi dan peningkatan efisiensi termal boiler ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Dampak Variasi Udara Berlebih (Excess Air) terhadap Kinerja Boiler

Persentase Udara Berlebih, Excess Air (%)	Temperatur Ruang Bakar (°C)	Laju Destruksi Eksergi Boiler (MW)	Efisiensi Eksergi Boiler (%)	Efisiensi Termal Total PLTU (%)
25 (Eksisting)	1.250	125,4	46,2	34,1
20	1.310	120,1	48,5	34,7
15 (Optimal)	1.380	114,8	50,8	35,4

Hasil simulasi pada Tabel 3 membuktikan bahwa penurunan excess air ke tingkat optimal 15% mampu mereduksi laju destruksi eksergi pada boiler secara signifikan dari 125,4 MW menjadi 114,8 MW, yang sekaligus mendongkrak efisiensi eksergi boiler menjadi 50,8% serta meningkatkan efisiensi termal total siklus pembangkit menjadi 35,4% (Nugroho dkk., 2021).

2. Skenario II: Integrasi Sistem Pemanas Air *Pengumpan Regeneratif (Regenerative Feedwater Heater)*

Skenario optimasi kedua diarahkan pada modifikasi konfigurasi termal siklus dengan menerapkan prinsip regeneratif memanfaatkan Feedwater Heater (FWH). Pada siklus eksisting, air pengumpan masuk ke dalam boiler pada temperatur yang relatif rendah (46,2^{O}C), sehingga membebani boiler dengan kebutuhan pemanasan awal yang sangat tinggi di area economizer. Skenario modifikasi dilakukan dengan melakukan ekstraksi sebagian fraksi uap (y = 12%) dari turbin pada tekanan menengah untuk dialirkan ke dalam unit penukar panas FWH tipe tertutup (Sanjaya & Firdaus, 2023).

Uap ekstraksi bersuhu tinggi tersebut digunakan untuk memanaskan air pengumpan sebelum air tersebut memasuki boiler. Melalui proses regeneratif ini, temperatur air pengumpan yang akan masuk ke boiler berhasil dinaikkan dari 46,2^{O}C menuju 165,0^{O}C}. Peningkatan temperatur air pengumpan ini secara drastis mengurangi beban termal kejutan di dalam boiler, mempersempit gradien perbedaan temperatur perpindahan panas (*AT*), dan meminimalkan destruksi eksergi pada komponen pembangkit uap tersebut (Lestari, 2023). Hasil perbandingan parameter kinerja termodinamika antara siklus eksisting dengan siklus setelah modifikasi integrasi FWH dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Kinerja Termodinamika Siklus Eksisting dan Siklus Modifikasi Regeneratif (FWH)

Parameter Performa Sistem	Siklus Eksisting (Tanpa FWH)	Siklus Modifikasi (Dengan FWH)	Persentase Perubahan (%)
Temperatur Air Masuk Boiler (˚C)	46,2	165,0	+257,1
Laju Input Kalor Boiler, Q_{in} (MW)	273,4	242,1	-11,4

Total Laju Destruksi Eksergi Sistem (MW)	148,6	122,3	-17,7
Efisiensi Energi / Termal Total Siklus (%)	34,1	38,2	+12,0
Efisiensi Eksergi Total Siklus (%)	26,8	31,5	+17,5

Berdasarkan data komparatif pada Tabel 4, penerapan sistem *Regenerative Feedwater Heater* terbukti memberikan efek peningkatan performa yang sangat masif. Kebutuhan laju input kalor pada boiler dapat ditekan sebesar 11,4% karena air telah mengalami pemanasan awal di luar boiler. Penurunan beban termal ini diikuti dengan reduksi total laju destruksi eksergi sistem sebesar 17,7% (dari 148,6 MW turun menjadi 122,3 MW). Secara akumulatif, integrasi sistem regeneratif ini berhasil menaikkan efisiensi energi atau efisiensi termal total siklus PLTU secara signifikan dari 34,1% menjadi 38,2%, serta menaikkan efisiensi eksergi total dari 26,8% menjadi 31,5% (Sanjaya & Firdaus, 2023; Lestari, 2023).

Sintesis Komprehensif dan Implikasi Terhadap Keberlanjutan Pembangkit

Integrasi hasil analisis dari Hukum Pertama dan Hukum Kedua Termodinamika memberikan landasan rekayasa yang kokoh bagi manajemen operasional PLTU konvensional di Indonesia. Melalui visualisasi data neraca energi dan eksergi yang telah dipaparkan, terbukti bahwa pendekatan penutupan inefisiensi tidak boleh didasarkan pada besarnya kuantitas pembuangan panas (seperti pada kondensor), melainkan harus didasarkan pada tingkat degradasi kualitas potensi kerja (seperti pada boiler) (Nasution, 2022).

Penerapan kombinasi kedua skenario optimasi yaitu mereduksi excess air hingga batas aman 15% dan mengintegrasikan teknologi pemanas air pengumpan regeneratif menawarkan solusi teknis yang sangat realistis untuk diimplementasikan pada pembangkit listrik domestik. Implikasi praktis dari peningkatan efisiensi termal siklus dari 34,1% menjadi 38,2% secara langsung akan menurunkan laju konsumsi batu bara spesifik spesifik per megawatt-hour (MWh) listrik yang dibangkitkan (Utami & Setiawan, 2019). Penurunan konsumsi bahan bakar ini tidak hanya memberikan keuntungan finansial berupa penghematan biaya pengadaan batu bara secara masif, tetapi juga memberikan dampak ekologis yang positif berupa penurunan emisi

gas karbon dioksida (CO_2), sulfur oksida (SO_x), dan nitrogen oksida (NO_x) ke atmosfer, sejalan dengan komitmen nasional menuju transisi energi yang lebih bersih dan berkelanjutan (Suryadi dkk., 2018; Lestari, 2023).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis energi dan eksergi serta simulasi skenario optimasi yang telah dilakukan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) konvensional, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Analisis Hukum Pertama Termodinamika menunjukkan bahwa efisiensi energi total sistem PLTU eksisting adalah sebesar 34,1%, dengan komponen kondensor mencatatkan pembuangan energi panas terbesar ke lingkungan, yaitu mencapai 235,6 MW atau sekitar 73,8% dari total input energi.
2. Analisis Hukum Kedua Termodinamika mengoreksi hasil analisis energi dengan menunjukkan bahwa efisiensi eksergi total sistem jauh lebih rendah, yaitu hanya sebesar 26,8%. Titik inefisiensi atau destruksi eksergi terbesar secara absolut ditemukan pada komponen boiler, yaitu sebesar 125,4 MW (berkontribusi terhadap 84,4% dari total destruksi eksergi seluruh sistem), yang dipicu oleh ireversibilitas proses pembakaran dan perbedaan temperatur perpindahan panas yang ekstrem. Sebaliknya, kondensor hanya mengalami destruksi eksergi marginal sebesar 8,7 MW.
3. Skenario optimasi I melalui pengendalian udara berlebih (excess air control) dari 25% ke tingkat optimal 15% mampu menurunkan laju destruksi eksergi boiler menjadi 114,8 MW dan meningkatkan efisiensi termal total siklus menjadi 35,4%.
4. Skenario optimasi II melalui integrasi sistem pemanas air pengumpan regeneratif (*Regenerative Feedwater Heater* / FWH) mampu menaikkan temperatur air masuk boiler hingga 165,0^{O}C}, mereduksi total destruksi eksergi sistem sebesar 17,7%, serta mendongkrak efisiensi termal total siklus secara signifikan dari 34,1% menjadi 38,2% dan efisiensi eksergi total menjadi 31,5%. Kombinasi kedua skenario ini sangat direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi termal dan mendukung keberlanjutan operasional PLTU di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

Arif, M., & Kusuma, A. (2021). Analisis hukum kedua termodinamika pada sistem pembangkit daya termal konvensional. Jurnal Teknik Energi dan Termal, 10(2), 85-94.

Budiman, A., & Wijaya, C. (2021). Studi perbandingan kehilangan energi dan destruksi eksergi pada kondensor PLTU skala besar. Jurnal Teknik Mesin Indonesia, 16(1), 22-30.

Fajri, N., & Gunawan, I. (2019). Evaluasi efisiensi termal siklus Rankine berdasarkan parameter operasional harian. Jurnal Energi Kebangsaan, 4(2), 112-121.

Hendra, S. (2022). Identifikasi ireversibilitas pada turbin uap tekanan tinggi menggunakan metode eksergi. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Sinergi, 20(1), 45-53.

Hidayat, T., & Nugroho, S. (2020). Aplikasi metode energi dan eksergi dalam optimalisasi sistem pembangkit listrik. Jurnal teknologi Rekayasa Energi, 5(2), 77-86.

Lestari, D. (2023). Pemodelan termodinamika siklus pembangkit uap berbahan bakar batu bara dengan pendekatan eksergi. Jurnal Riset Teknologi Pembangkit, 8(1), 14-25.

Nasution, H. (2022). Termodinamika Teknik Lanjut: Pendekatan Analisis Energi dan Eksergi. Medan: Yayasan Pendidikan Nusantara.

Nugroho, A., Pambudi, A., & Widodo, S. (2021). Pengaruh variasi excess air terhadap efisiensi eksergi boiler di PLTU Jawa Tengah. Jurnal Mekanika dan Sistem Termal, 12(3), 143-152.

Prasetyo, B., & Utama, R. (2019). Analisis performa pompa air pengumpan pada sistem siklus Rankine regeneratif. Jurnal Teknik Fluida, 7(2), 61-68.

Pratama, R. (2021). Analisis Sistem Termal Pembangkit Listrik. Jakarta: Erlangga.

Putra, E. A., Setiawan, B., & Raharjo, D. (2018). Analisis hukum pertama termodinamika pada kondensor pembangkit listrik tenaga uap. Jurnal Rekayasa Energi Nasional, 2(2), 99-107.

Ramadhan, F., & Wibowo, A. (2022). Kajian teoritis destruksi eksergi pada komponen utama siklus termal PLTU. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Universitas Udayana, 15(2), 101-110.

Sanjaya, M., & Firdaus, M. (2023). Optimalisasi sistem regenerative feedwater heater untuk meningkatkan efisiensi eksergi PLTU. Jurnal Rekayasa Sistem Termal, 11(1), 34-43.

Saputra, I., & Santoso, E. (2020). Analisis exergy destruction pada boiler PLTU berbahan bakar batu bara sub-critical. Jurnal Teknik Energi Energi-ku, 9(3), 118-127.

Sitorus, T., & Siregar, J. (2020). Pengaruh perbedaan temperatur perpindahan panas terhadap penurunan efisiensi eksergi boiler. Jurnal Rekayasa Mesin, 11(2), 205-214.

Suryadi, D., Siregar, I., & Harahap, M. (2018). Proyeksi kebutuhan energi listrik dan peran PLTU batu bara di Indonesia. Jurnal Kebijakan Energi, 3(1), 40-49.

Utami, S., & Setiawan, H. (2019). Tantangan peningkatan efisiensi termal pada pembangkit listrik termal di Indonesia. Jurnal Ilmiah Teknologi Energi, 6(1), 12-21.

Wicaksono, A., Triyono, B., & Utomo, T. (2017). Analisis eksergi pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berkapasitas 300 MW. Jurnal Teknik Mesin Utama, 12(2), 55-63.