

## Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap: Tinjauan Pustaka Sistematis

Satriyo Murti Pamungkas<sup>1,2 \*</sup>, Dani Rusirawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Department Localization Divisi Engineering, Hino Motors Manufacturing Indonesia

author: [satriyo.murti@mhs.itenas.ac.id](mailto:satriyo.murti@mhs.itenas.ac.id)

*Received 18 Januari 2025 | Revised 19 Juni 2025 | Accepted 25 Juli 2025*

### ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sangat penting dalam memenuhi kebutuhan energi global, terutama di wilayah yang bergantung pada pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Namun, tantangan seperti efisiensi termal yang rendah, kerusakan eksergi yang tinggi, dan emisi karbon yang signifikan memerlukan pendekatan inovatif untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan. Tinjauan pustaka ini mengkaji kemajuan terkini dalam evaluasi kinerja pembangkit listrik tenaga uap, dengan fokus pada tiga bidang utama: inovasi teknologi, analisis termodinamika, dan pendekatan eksergoekonomi. Kemajuan teknologi, seperti sistem kontrol *superheater* yang disempurnakan dan integrasi energi terbarukan, menunjukkan peningkatan yang nyata dalam efisiensi energi dan pengurangan emisi. Analisis termodinamika dan eksergi mengidentifikasi inefisiensi kritis dalam komponen seperti boiler dan menyarankan strategi pengoptimalan, termasuk peningkatan pemanas air umpan, untuk meningkatkan efisiensi termal. Sementara itu, pendekatan eksergoekonomi menawarkan perspektif yang berharga dengan menggabungkan evaluasi teknis dan ekonomi untuk memprioritaskan investasi dengan perolehan efisiensi tertinggi dan pengurangan biaya operasional. Tinjauan ini menyoroti pentingnya pendekatan multidisiplin dalam mengatasi tantangan operasional, memajukan inovasi teknologi, dan memastikan pembangkitan energi yang berkelanjutan. Penelitian di masa mendatang disarankan untuk lebih jauh mengeksplorasi sistem kendali adaptif, integrasi energi terbarukan dalam skala besar, dan strategi pengoptimalan hemat biaya.

**Kata kunci:** Penghancuran tenaga, evaluasi ekonomi eksergo, analisis termodinamika.

### ABSTRACT

Steam power plants (PLTU) are crucial in meeting global energy needs, especially in regions reliant on coal-fired power generation. However, challenges such as low thermal efficiency, high exergy destruction, and significant carbon emissions necessitate innovative approaches to improve performance and sustainability. This literature review examines recent advancements in steam power plant performance evaluation, focusing on three key areas: technological innovations, thermodynamic and exergy analysis, and exergoeconomic approaches. Technological advancements, such as enhanced superheater control systems and renewable energy integration, demonstrate notable improvements in energy efficiency and emissions reduction. Thermodynamic and exergy analyses identify critical inefficiencies in components like boilers and suggest optimization strategies, including feedwater heater enhancements, to improve thermal efficiency. Meanwhile, exergoeconomic approaches offer a valuable perspective by combining technical and economic evaluations to prioritize investments with the highest efficiency gains and cost reductions. This review highlights the importance of multidisciplinary approaches in addressing operational challenges, advancing technological innovations, and ensuring sustainable energy generation. Future research is recommended to further explore adaptive control systems, large-scale renewable integration, and cost-effective optimization strategies.

**Keywords:** Exergy destruction, Exergoeconomic evaluation, Thermodynamic analysis,

## 1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah salah satu teknologi utama dalam penyediaan energi listrik, khususnya di negara-negara dengan kebutuhan energi tinggi dan sumber daya batu bara yang melimpah [1]. Teknologi ini memainkan peran penting dalam menjaga keandalan sistem energi global karena kapasitasnya yang besar dan kemampuannya untuk menyediakan energi secara kontinu [2]. Namun, tantangan besar yang dihadapi PLTU saat ini adalah tuntutan untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi emisi karbon, serta beradaptasi dengan kebijakan energi bersih dan keberlanjutan [3].

Beberapa tantangan utama dalam operasi PLTU mencakup kerugian termodinamika yang signifikan pada komponen seperti boiler dan kondensor, serta kesulitan dalam mengintegrasikan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya atau biomassa, ke dalam sistem yang ada [4]. Selain itu, penerapan teknologi baru atau modifikasi sistem untuk meningkatkan performa sering kali terkendala oleh investasi awal yang besar, yang harus dibandingkan dengan manfaat ekonomi jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan multidisiplin yang mencakup analisis termodinamika, eksergi, dan eksergoekonomi untuk mengidentifikasi komponen yang memberikan peluang optimasi terbesar, baik dari segi teknis maupun ekonomi [5].

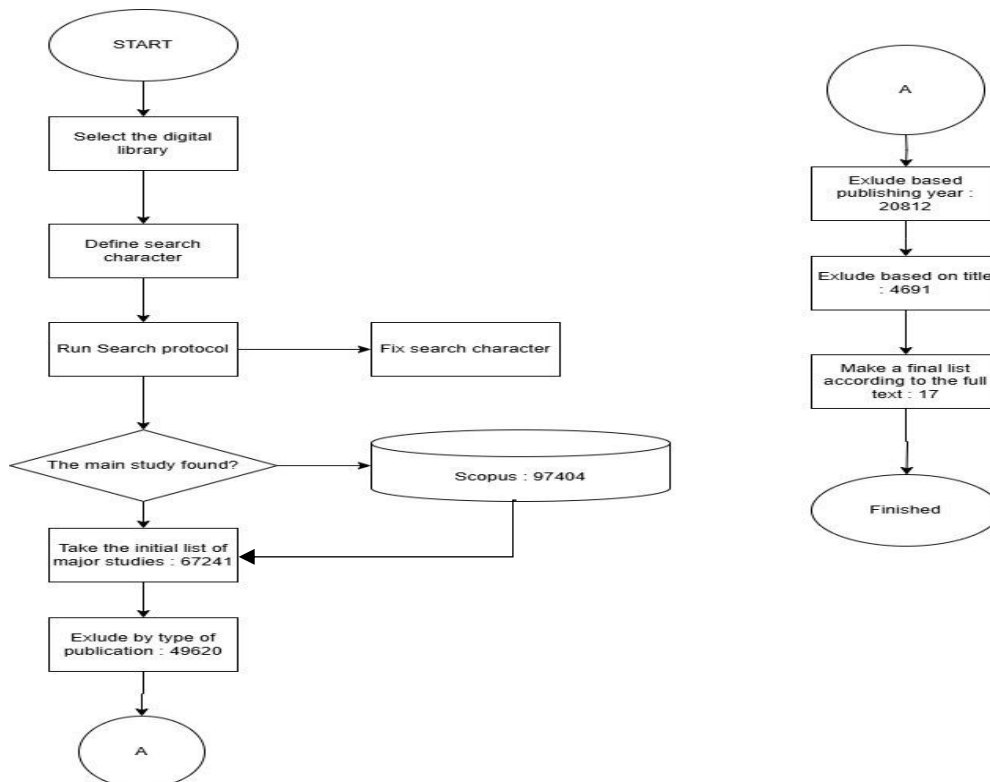
Penelitian sebelumnya telah berfokus pada inovasi teknologi dan pendekatan untuk meningkatkan efisiensi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) serta transisi menuju energi bersih. Debiagi et al. (2022) menganalisis potensi penggunaan besi sebagai pembawa energi berkelanjutan dalam retrofitting pembangkit listrik berbahan bakar batu bara untuk menghasilkan listrik bebas CO<sub>2</sub>. Studi ini menemukan bahwa konversi ini tidak hanya memungkinkan pada skala kecil maupun besar, tetapi juga dapat mengurangi emisi karbon hingga 10 juta ton per tahun, sekaligus memanfaatkan infrastruktur yang sudah ada. Solusi ini menunjukkan potensi besar dalam mendukung infrastruktur energi terbarukan dan produksi hidrogen sebagai bagian dari transisi energi global [6]. Takayabu et al. (2020) menggunakan pendekatan metafrontier DEA decomposition untuk mengevaluasi efisiensi pembangkit listrik berbahan bakar batu bara di Tiongkok selama periode 2009-2011. Studi ini menemukan bahwa pembangkit berskala besar memiliki efisiensi 13% lebih tinggi dibandingkan pembangkit berskala kecil. Temuan ini juga menunjukkan bahwa inefisiensi operasional lebih dominan di wilayah timur dan tengah Tiongkok, sementara kesenjangan teknologi lebih signifikan di wilayah barat. Meskipun ada sedikit peningkatan efisiensi pembangkitan selama periode penelitian, peningkatan meta-inefisiensi hanya mencapai 0,5%, menyoroti perlunya kebijakan untuk mendukung penghapusan pembangkit yang tidak efisien [7]. Xu et al. (2020) menyajikan tinjauan literatur tentang penerapan Data Envelopment Analysis (DEA) dalam evaluasi efisiensi energi antara 2011-2019. Penelitian ini mencatat evolusi model DEA dari struktur statis menjadi dinamis, memungkinkan evaluasi efisiensi energi yang lebih akurat dengan mempertimbangkan emisi polusi. Selain itu, studi ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam jumlah penelitian dan publikasi yang menggunakan pendekatan DEA selama periode tersebut. Penelitian ini juga menyoroti adanya kesenjangan penelitian, seperti kebutuhan untuk memperluas cakupan model DEA agar dapat mengakomodasi skenario dunia nyata secara lebih baik [8]. Meskipun penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi penting dalam inovasi teknologi dan evaluasi efisiensi pembangkit listrik, masih terdapat kekurangan yang perlu diatasi. Debiagi et al. (2022) belum mencakup analisis ekonomi jangka panjang untuk retrofitting berbasis besi, sementara Takayabu et al. (2020) hanya menyoroti inefisiensi tanpa solusi strategis. Xu et al. (2020) juga menunjukkan keterbatasan model DEA dalam menangkap kompleksitas pembangkit terintegrasi energi terbarukan.

Artikel ini dirancang untuk mengatasi kekurangan-kekurangan tersebut dengan mengintegrasikan pendekatan multidisiplin yang mencakup analisis termodinamika, eksergi, dan eksergoekonomi secara komprehensif. Selain itu, artikel ini juga memberikan perhatian khusus pada integrasi energi terbarukan dan dampaknya terhadap performa pembangkit, sekaligus menyajikan panduan strategis yang aplikatif untuk mengurangi inefisiensi pada sistem pembangkit listrik. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat melengkapi literatur yang ada dan memberikan kontribusi

nyata dalam mendukung pengembangan sistem pembangkit listrik yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ekonomis. Ruang lingkup Studi ini difokuskan pada analisis berbasis literatur dengan menggunakan metode termodinamika dan eksergoekonomi, serta terbatas pada teknologi PLTU konvensional dan hibrid. Melalui analisis ini, diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai inovasi teknologi dan peluang optimasi, serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang dapat dikembangkan lebih lanjut di masa mendatang..

## 2. Metodologi

Metode yang digunakan dalam tinjauan ini adalah tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review*, SLR) terhadap penelitian-penelitian terkini mengenai evaluasi performa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pendekatan SLR dipilih untuk memberikan analisis komprehensif dan terstruktur terhadap berbagai studi yang relevan, mencakup inovasi teknologi, optimasi termodinamika, dan evaluasi eksergoekonomi. Data yang dianalisis diambil dari tabel yang mencakup informasi utama seperti judul penelitian, penulis, tahun publikasi, metodologi, temuan utama, tujuan penelitian, dan desain studi. Literatur yang dipilih memiliki ruang lingkup yang sesuai dengan topik, yaitu evaluasi performa PLTU, serta diterbitkan dalam lima tahun terakhir untuk memastikan relevansi temuan dalam konteks teknologi dan tantangan energi terkini.



**Gambar 1.** Diagram alir tahap pencarian data

Proses SLR ini dimulai dengan seleksi literatur berdasarkan kata kunci seperti "steam turbine power plant performance," "thermodynamic optimization," dan "exergy-economic analysis." Hanya literatur yang memenuhi kriteria inklusi, seperti keterlibatan analisis termodinamika atau eksperimental pada sistem PLTU, yang dimasukkan ke dalam studi ini. Analisis dilakukan dengan fokus pada metodologi yang digunakan dalam penelitian masing-masing, seperti simulasi berbasis perangkat lunak, analisis eksperimental, atau pendekatan matematis. Selain itu, setiap studi juga dianalisis dari segi keterbatasan dan kekuatannya untuk memberikan pandangan yang lebih menyeluruh. Dengan pendekatan ini, tinjauan ini tidak hanya memberikan pemetaan tren

penelitian terkini, tetapi juga mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang dapat dikembangkan lebih lanjut. Proses SLR ditunjukkan pada Gambar 1.

Informasi yang diambil dari artikel yang dipilih mencakup judul, penulis, tahun publikasi, metode penelitian, temuan utama, serta kesimpulan teknis, dengan kriteria inklusi dan eksklusi disajikan pada Tabel 1. Studi-studi ini kemudian dikategorikan ke dalam empat kategori utama yakni inovasi teknologi, Analisis Termodinamika dan Eksergi, Pendekatan Eksergoekonomi. Setiap penelitian dirangkum dalam tabel *state of the art* untuk mempermudah analisis lebih lanjut.

**Tabel 1.** *Include dan exclude criteria* pencarian data

|                          |                                                                                            |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Kriteria Inklusi</b>  | Kajian termasuk kedalam artikel bidang Teknik mesin, ilmu termodinamika, dan ilmu material |
|                          | Publikasi dalam range tahun 2020-2025                                                      |
|                          | Tipe publikasi merupakan research article dan review article                               |
| <b>Kriteria Eksklusi</b> | Kajian tidak menggunakan validasi                                                          |
|                          | Kajian tidak merupakan full text articles                                                  |

### 2.1 *State of the art*

Pada penelitian ini artikel yang direview diklasifikasikan pada empat kategori utama yakni inovasi teknologi, Analisis Termodinamika dan Eksergi, Pendekatan Eksergoekonomi. *Tabel state of the art* ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** *State of the art* penelitian.

| Klasifikasi              | Judul                                                                                                 | Penulis                   | Tahun | Metodologi                                                                                                                       | Temuan Utama                                                                                                                                             |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Inovasi Teknologi</b> | Performance assessment of a solar-aided dual-fuel supercritical steam power plant                     | Karim Abd El-Hakam et al. | 2023  | Pemodelan termodinamika PLTU berbahan bakar ganda dengan integrasi tenaga surya menggunakan <i>multi-heat exchangers</i> (MHXs). | Integrasi tenaga surya meningkatkan efisiensi energi hingga 21% pada beban parsial dan efisiensi eksersgi hingga 17% dibandingkan PLTU konvensional. [9] |
|                          | Novel performance assessment method for superheated steam control                                     | Yue Cao et al.            | 2024  | Pengembangan model autoregresif (AR) untuk kontrol superheater berbasis data operasi non-stasioner.                              | Model AR meningkatkan akurasi kontrol superheater pada kondisi beban variabel, dengan performa terbaik pada beban tinggi. [10]                           |
|                          | Reduce water consumption of steam power plant using novel single-effect double-lift absorption system | Amirhosein Farmani et al. | 2024  | Model termodinamika untuk mengintegrasikan sistem pendinginan baru berbasis absorpsi ke dalam PLTU guna mengurangi konsumsi air. | Mengurangi konsumsi air hingga 31.07 kg/s namun menurunkan daya bersih sebesar 7.7 MW. [11]                                                              |

|                                           |                                                                                             |                               |      |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                           | Dynamic performance simulation of combined gas-electric and steam power plants              | Alessandro Dotto et al.       | 2023 | Simulasi dinamis menggunakan MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi efisiensi sistem PLTU berbahan bakar LNG dengan konfigurasi COGES.                | Sistem COGES memberikan peningkatan efisiensi hingga 51%, dengan performa terbaik pada gas turbin LM2500. [12]                                                    |
|                                           | Environmental, economic, and energy evaluation of alternative fuels                         | Bahar Panbechi et al.         | 2024 | Analisis penggunaan campuran biodiesel-nanopartikel sebagai bahan bakar alternatif untuk PLTU.                                                    | Campuran biodiesel-nanopartikel meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi karbon dibanding diesel murni. [13]                                        |
|                                           | Design optimization of cogeneration steam power plants with supercritical parameters        | Victor-Eduard Cenușă et al.   | 2024 | Optimasi multi-objektif untuk desain ulang PLTU cogeneration berbasis supercritical parameters.                                                   | Efisiensi termal maksimum mencapai 74,33%, dengan penurunan biaya investasi spesifik sebesar 8,39% dibanding siklus konvensional. [14]                            |
| <b>Analisis Termodinamika dan Eksergi</b> | Utilizing exergy analysis in studying the performance of steam power plants                 | Mohamed Elhelw et al.         | 2019 | Analisis eksergi pada PLTU 650 MW menggunakan pemodelan matematis untuk mengidentifikasi destruksi eksersi terbesar pada komponen.                | Boiler menyumbang 75%-78% destruksi eksergi. Peningkatan suhu uap superheater hingga 45°C mengurangi kerugian eksersi hingga 17,67% pada beban penuh. [15]        |
|                                           | Thermodynamics analysis and performance optimization of a reheat-regenerative steam turbine | S. O. Oyedepo et al.          | 2020 | Pemodelan termodinamika dengan perangkat lunak CyclePad untuk optimasi sistem reheat-regenerative dengan variasi jumlah feedwater heaters (FWHs). | Penambahan FWH meningkatkan efisiensi termal dari 42,17% menjadi 45,97% dan mengurangi konsumsi bahan bakar serta panas yang terbuang ke kondensor. [16]          |
|                                           | Interaction effects of natural draft dry cooling tower performance                          | Reza Alizadeh Kheneslu et al. | 2020 | Simulasi termodinamika dan analisis lingkungan untuk mengevaluasi pengaruh kondisi iklim terhadap performa menara pendingin PLTU.                 | Suhu lingkungan tinggi (42°C) dan angin lintas (9.7 m/s) mengurangi kapasitas daya hingga 50% dan menyebabkan kerugian ekonomi sebesar \$158,801 per 24 jam. [17] |

|                                  |                                                                                                 |                        |      |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | Exergy analysis of a steam power station in a sulfuric acid plant                               | Maged Galal et al.     | 2023 | Analisis eksersgi pada PLTU berbasis limbah panas menggunakan EES, dengan evaluasi parameter operasional seperti tekanan dan suhu kondensor.        | Boiler limbah panas menyumbang 41% destruksi eksersgi total. Penurunan tekanan kondensor meningkatkan efisiensi eksersgi hingga 7%. [18]                                          |
|                                  | Performance analysis of an integrated gas-, steam-, and organic fluid-cycle thermal power plant | C. O. Oko et al.       | 2017 | Analisis termodinamika dari integrasi siklus organik Rankine (ORC) ke dalam PLTU siklus gabungan.                                                   | Integrasi ORC meningkatkan daya tambahan sebesar 12,4 MW dan meningkatkan efisiensi eksersgi total sebesar 1,95%. [19]                                                            |
| <b>Pendekatan Eksergoekonomi</b> | Developing criteria for advanced exergoeconomic performance analysis                            | Turgay Koroglu et al.  | 2023 | Analisis eksergoekonomi lanjut untuk menentukan biaya destruksi eksersgi yang dapat dihindari pada komponen PLTU.                                   | Boiler memiliki biaya destruksi eksersgi tertinggi (\$77,4/jam). Investasi pada boiler berpotensi menghemat \$36,8/jam. [20]                                                      |
|                                  | Exergoeconomic analysis of a steam turbine power plant in a sulfuric acid factory               | Maged Galal et al.     | 2024 | Pemodelan eksersgi-ekonomi pada PLTU berbahan limbah panas dari pabrik asam sulfat, dengan evaluasi biaya destruksi eksersgi untuk optimasi sistem. | Peningkatan tekanan uap masuk turbin sebesar 5 bar mengurangi biaya destruksi eksersgi hingga \$2,2/jam, dengan efisiensi eksersgi tertinggi pada deaerator (80,38%). [21]        |
|                                  | Design of components of a steam power plant and its exergoeconomic performance                  | Animesh Goswami et al. | 2023 | Simulasi menggunakan perangkat lunak Flownex untuk mengevaluasi kinerja eksersgi dan ekonomi PLTU berbahan bakar batu bara.                         | Kondensor memiliki luas area tabung terbesar (17,357 m <sup>2</sup> ), sedangkan tekanan rendah pada pemanas air umpan meningkatkan efisiensi eksersgi sistem hingga 32,85%. [22] |

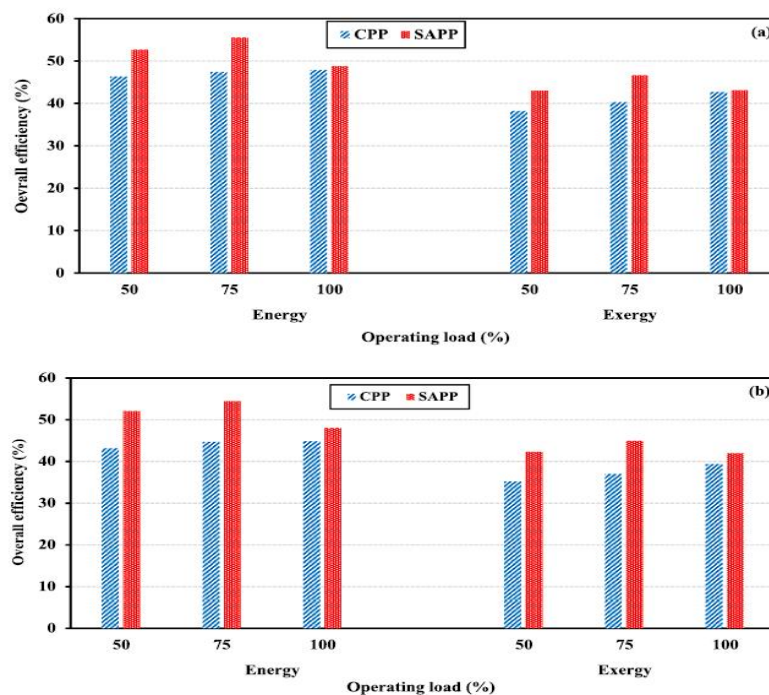
Berdasarkan artikel yang direview pada tabel state of the art, keempat kategori mencerminkan aspek-aspek kunci yang saling berinteraksi dalam inovasi teknologi, Analisis Termodinamika dan Eksergi, Pendekatan Eksergoekonomi pada PLTU.

### 3. Evaluasi dan Pembahasan

#### 3.1 Inovasi Teknologi

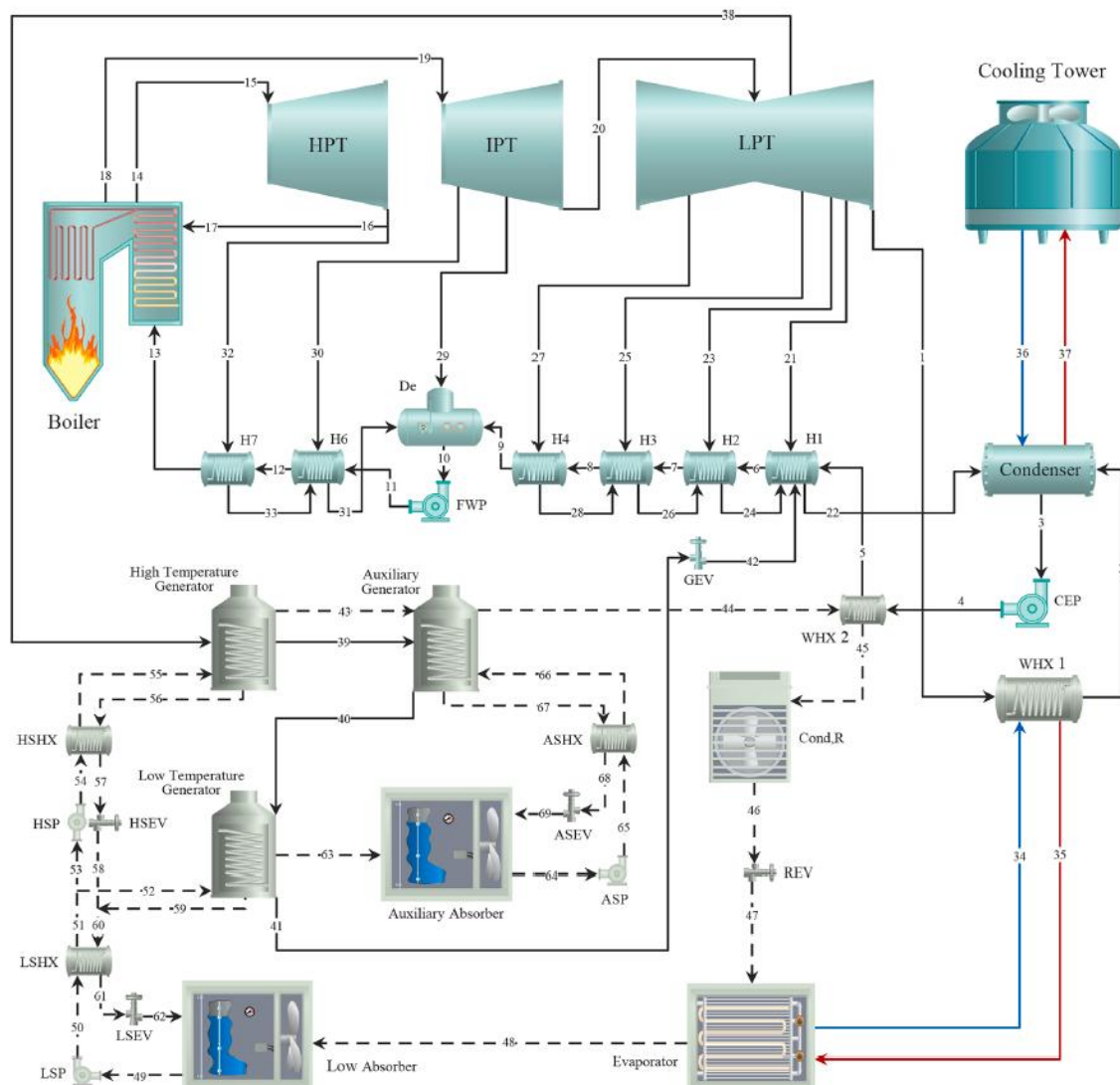
Inovasi teknologi terus menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan performa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) agar lebih efisien dan ramah lingkungan. Salah satu kemajuan signifikan adalah pengembangan metode kontrol *superheater* untuk mengatasi tantangan kondisi operasi yang tidak stabil. Penelitian oleh Cao et al. (2024) menggunakan model *autoregresif* (AR) untuk meningkatkan akurasi kontrol *superheater* di PLTU berbahan bakar batu bara yang beroperasi di bawah kondisi akomodasi energi terbarukan. Model ini terbukti sangat efektif dalam mengurangi variabilitas output *superheated steam*, terutama saat beban operasi berubah-ubah. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa kontrol *superheater* beroperasi lebih baik pada kondisi beban tinggi dibandingkan beban rendah. Hal ini memberikan wawasan bahwa stabilitas operasi dapat ditingkatkan melalui kontrol yang lebih adaptif terhadap variabilitas beban.

Inovasi lain yang sangat berpotensi meningkatkan efisiensi PLTU adalah integrasi energi terbarukan, seperti tenaga surya, ke dalam sistem PLTU. Abd El-Hakam et al. (2023) menunjukkan bahwa pembangkit tenaga uap berbantuan surya (SAPP) dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan dibandingkan PLTU konvensional. Dengan mengganti *regenerative heat exchangers* (RHXs) dengan *multi-heat exchangers* (MHXs) yang menggunakan fluida panas dari sistem surya, PLTU mampu meningkatkan output mekanis hingga 27% dan efisiensi energi hingga 21% pada kondisi beban parsial. Studi ini juga menemukan bahwa integrasi surya memiliki dampak yang lebih besar pada beban parsial dibandingkan beban penuh, menunjukkan pentingnya strategi desain untuk memanfaatkan fluktuasi energi surya secara optimal. Pada Gambar 2, dapat dilihat sebagai konsekuensi dari pengurangan ekstraksi turbin uap karena menggunakan sistem berbantuan matahari, diamati bahwa keseluruhan efisiensi energi untuk SAPP karena menggunakan bahan bakar NG dibandingkan dengan CPP naik sebesar 13,7, 17, dan 1,9%. Namun, keseluruhan *exergy* efisiensi NG berbasis SAPP dibandingkan dengan peningkatan CPP sebesar 15, 20, dan 1% untuk beban operasi 50%, 75%, dan 100%, masing-masing (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(a)). Di sisi lain, untuk Bahan bakar minyak berbasis SAPP, efisiensi energi secara keseluruhan dibandingkan dengan CPP meningkat sebesar 20,6, 21,9, dan 7%, sedangkan efisiensi *exergy* secara keseluruhan meningkat sebesar 25,6, 27,5, dan 6,6% untuk beban operasi 50%, 75%, dan masing-masing 100 % (seperti yang disajikan pada Gambar 12(b))



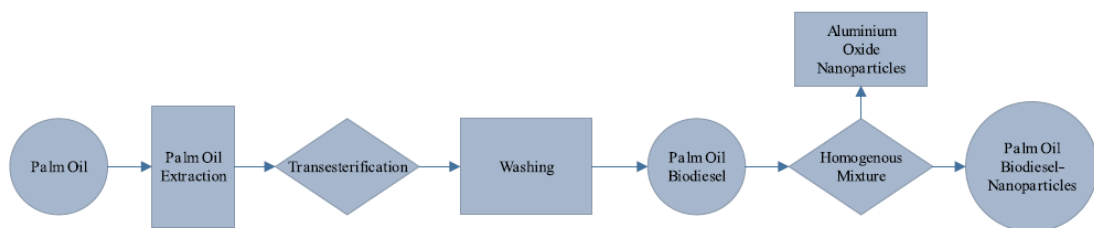
**Gambar.2** Efisiensi energi dan tenaga keseluruhan untuk CPP (*conventional power system*) dan SAPP (*solar aided power plant*) di bawah beban operasi yang berbeda menggunakan (a) bahan bakar NG (Natural Gas) dan (b) bahan bakar minyak [10]

Selain energi terbarukan, integrasi teknologi pendinginan canggih juga menjadi perhatian dalam inovasi teknologi PLTU. Farmani et al. (2024) memperkenalkan sistem pendinginan berbasis single-effect double lift absorption refrigeration system (SE-DL-ARS) yang dirancang untuk mengurangi konsumsi air pada menara pendingin. Sistem ini memungkinkan penggunaan panas buangan dari kondensor untuk mendukung proses pendinginan, sehingga mengurangi kebutuhan air hingga 31.07 kg/s. Namun, inovasi ini juga memiliki kompromi dalam bentuk penurunan daya output bersih sebesar 7,7 MW, yang menunjukkan bahwa implementasinya membutuhkan analisis mendalam antara penghematan sumber daya dan kerugian daya.



**Gambar 3.** Schematic of combination steam power plant with single effect double lift absorption refrigeration system. [11]

Penggunaan bahan bakar alternatif juga menjadi bagian dari inovasi teknologi untuk meningkatkan efisiensi pembakaran sekaligus mengurangi emisi karbon. Panbechi et al. (2024) mengkaji penggunaan campuran biodiesel dengan nanopartikel sebagai bahan bakar alternatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pembakaran tetapi juga mengurangi emisi karbon dioksida dan polutan lainnya dibandingkan dengan diesel atau minyak bahan bakar. Meskipun demikian, biaya produksi bahan bakar alternatif ini tetap menjadi tantangan yang harus diatasi untuk memastikan penerapan yang lebih luas.



**Gambar 4.** Schematic of combination steam power plant with single effect double lift absorption refrigeration system. [13]



Pada Gambar 4. Tersebut mengilustrasikan langkah-langkah yang terlibat dalam produksi biodiesel dan pencampuran selanjutnya dengan nanopartikel. Prosesnya dimulai dengan ekstraksi minyak sawit, yang kemudian diubah menjadi biodiesel melalui transesterifikasi. Biodiesel yang diperoleh kemudian dicampur dengan konsentrasi aluminium oksida yang diukur nanopartikel ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dalam mixer homogen. Dalam reaksi transesterifikasi untuk menghasilkan biodiesel, nanopartikel seperti  $\text{Al}_2\text{O}_3$  berpotensi bertindak sebagai katalis atau ko-katalis. Nanopartikel ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) memiliki ukuran 40 nm. Selanjutnya diberi kode nama POBD2075 untuk memudahkan perbandingan dalam pengujian di materi tersebut.

**Tabel 3.** Metode AHP optimasi dalam pemilihan bahan bakar alternatif [13]

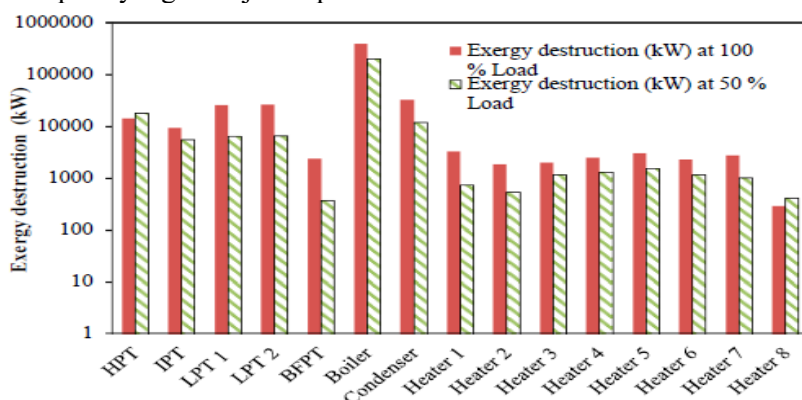
| weight    | 0.10616   | 0.2605  | 0.63335      |          |      |
|-----------|-----------|---------|--------------|----------|------|
| Criterion | Economics | Energy  | Environments | Score    | Rank |
| Fuel      |           |         |              |          |      |
| POBD2075  | 0.2605    | 0.14286 | 0.64338887   | 0.472355 | 1    |
| Diesel    | 0.63335   | 0.71429 | 0.28283902   | 0.43244  | 2    |
| Fuel Oil  | 0.10616   | 0.14286 | 0.07377211   | 0.095206 | 3    |

Berdasarkan temuan metode AHP pada Tabel 3. tersebut, biodiesel nanopartikel tampaknya menjadi pilihan terbaik. Seperti yang disebutkan sebelumnya, penambahan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  menghasilkan peningkatan laju pembakaran dan mengurangi produk yang tidak diinginkan. Dilain pihak budidaya pohon palem untuk biodiesel tidak hanya membantu menetralkan  $\text{CO}_2$  emisi, tetapi juga mempromosikan praktik pertanian. Akhirnya akan meningkatkan pembangunan dan pertumbuhan ekonomi di daerah pedesaan, dimana produsen pertanian kelapa sawit terbesar berada di pedesaan.

Analisis terhadap inovasi teknologi ini menunjukkan bahwa pengembangan metode kontrol adaptif, integrasi energi terbarukan, dan penerapan teknologi pendinginan serta bahan bakar alternatif menawarkan solusi signifikan untuk meningkatkan performa PLTU. Namun, keberhasilan implementasi memerlukan desain sistem yang matang dan analisis menyeluruh terhadap biaya investasi, efisiensi, dan dampak lingkungan. Inovasi-inovasi ini juga menyoroti pentingnya pendekatan lintas disiplin dalam mengatasi tantangan operasional dan keberlanjutan PLTU di masa depan.

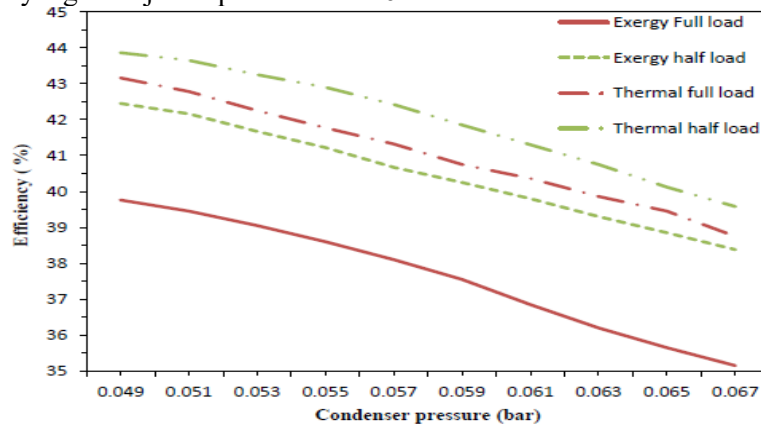
### 3.2 Analisis Termodinamika dan Eksergi

Analisis termodinamika dan eksergi memainkan peran penting dalam mengidentifikasi dan mengurangi kerugian energi pada PLTU. Elhelw et al. (2019) menunjukkan bahwa boiler adalah komponen yang paling banyak menyumbang destruksi eksergi, mencapai 75%-78% dari total destruksi sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar.5.



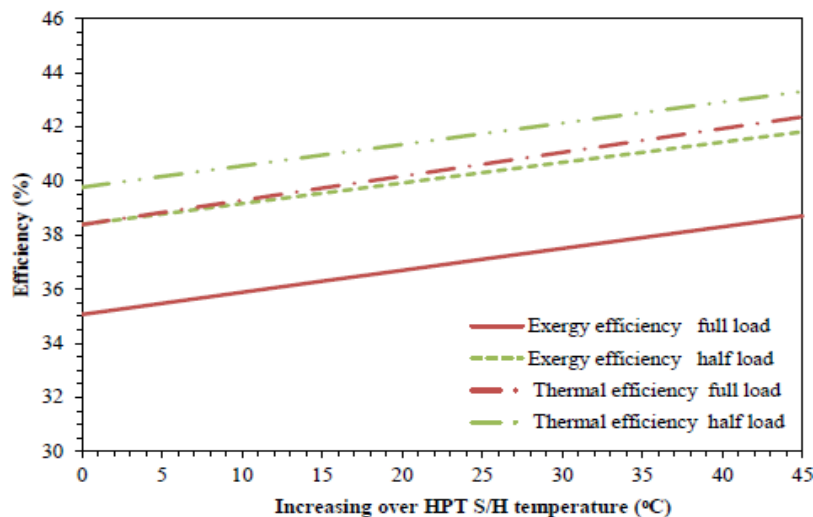
**Gambar.5** Exergy destruction pada beban penuh dan setengah, skala logaritma [15]

Pada studi ini ditemukan suatu fenomena bahwa saat kondensor tekanan menurun, *Exergy destruction* kondensor berkurang juga, sedangkan *Exergy destruction* turbin meningkat karena meningkatnya *Exergy destruction* LPT1, LPT1 dan BFPT. Penurunan dalam *exergy destruction* kondensor lebih tinggi daripada peningkatan turbin *exergy destruction*, sehingga total *Exergy destruction* menurun sebesar 0,744% dan 0,802% masing-masing pada operasi beban penuh dan setengah beban. Ini Penurunan kehilangan eksergi mengarah pada peningkatan termal dan *Exergy* Efisiensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar.6.



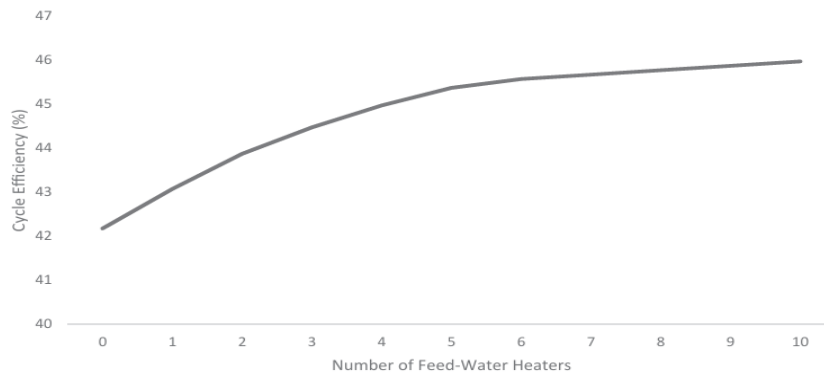
**Gambar.6** Condenser pressure vs. power plant efficiencies [15]

Studi ini juga menemukan bahwa peningkatan suhu uap superheater hingga 45°C dapat secara signifikan mengurangi destruksi eksergi, meningkatkan efisiensi, dan menghasilkan penghematan energi hingga 17,67% pada beban penuh seperti yang ditunjukkan pada Gambar.7. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian parameter termodinamika yang lebih presisi pada boiler dan turbin sangat penting untuk meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan.



**Gambar.7** HPT S/H steam temperature vs. power plant efficiencies [15]

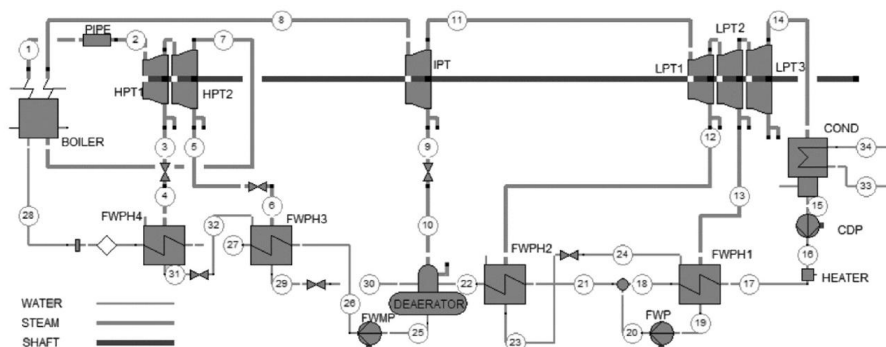
Penelitian lain oleh Oyedepo et al. (2020) menyoroti pentingnya optimasi sistem *reheat-regenerative*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar.8. Dengan meningkatkan jumlah *feedwater heaters* (FWHs) dari satu menjadi sepuluh, efisiensi termal dapat ditingkatkan dari 42,17% menjadi 45,97%. Selain itu, konsumsi bahan bakar dan jumlah panas yang dilepaskan ke kondensor juga berkurang secara signifikan. Analisis termodinamika seperti ini tidak hanya membantu dalam mengidentifikasi inefisiensi, tetapi juga memberikan panduan untuk meningkatkan desain sistem PLTU.



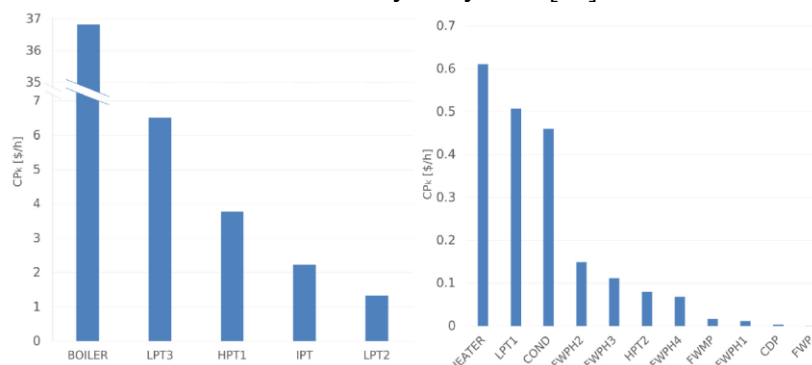
**Gambar.8** Plot Efisiensi Siklus terhadap Jumlah FWH yang ditutup. [16]

### 3.3 Pendekatan Eksergoekonomi

Pendekatan eksergoekonomi memberikan perspektif tambahan yang menggabungkan analisis efisiensi teknis dengan evaluasi biaya. Penelitian oleh Koroglu et al. (2023), dengan deskripsi sistem yaitu memiliki turbin bertekanan tinggi (HPT) dengan dua tahapan, turbin tekanan menengah (IPT), dan turbin bertekanan rendah (LPT) dengan tiga tahap. Empat pemanas awal feed water preheaters yang berbeda (FWPHs) memanaskan air umpan hingga suhu saluran masuk boiler dengan menggunakan *bleeding steam*, sedangkan tiga pompa yaitu, *condensed feed water pump* (CDP), *feed water pump* (FWP), dan *feed water main pump* (FWMP) meningkatkan tingkat tekanan hingga tekanan masuk boiler. Air yang terkondensasi dipanaskan dengan pemanas berbahan bakar minyak eksternal setelah CDP. Sebelum FWMP, *feed water* yang didegasifikasi di deaerator (DEAER). Model sistem ini dibuat dengan menyusun data sistem yang bekerja secara nyata, kondisi stabil dan kondisi pembangkit listrik berkelanjutan. Sistem deskripsi tersebut seperti terlihat pada gambar 9.



**Gambar.9** Layout system. [20]



**Gambar.10** Keuntungan biaya, potensi penghematan dari komponen yang diselidiki.[20]

*Cost Profit*, dapat ditunjukkan dalam urutan berurutan pada Gambar 10. Meskipun potensi boiler lebih rendah dari pemanas, IPT, dan FWP, ia memiliki *exergy destruction* yang tertinggi, yang sebenarnya dapat dihindari, dan dapat menghasilkan penghematan tertinggi sekitar \$36,8/jam. Ini

kira-kira enam kali lebih banyak dari komponen terdekat LPT3. LPT3 berada di urutan kedua setelah keuntungan biaya karena memiliki jumlah *exergy destruction* yang lebih tinggi yang dapat dihindari, meskipun memiliki potensi tabungan yang lebih rendah daripada *boiler*, FWP, IPT, dan *Heater*. Sebagai peningkatan pada lima Komponen yang pertama, *boiler*, LPT3, HPT1, IPT, LPT2 dapat menghemat di atas \$ 1 / jam. Ditotal, dimungkinkan untuk menghemat \$ 52.7/jam di seluruh sistem dengan meningkatkan semua Komponen. 70% dari nilai ini hanya milik boiler. Empat lainnya komponen yaitu LPT3, HPT1, IPT, LPT2 masing-masing memiliki 12,3%, 7%, 4%, dan 2,5%.

Dengan pendekatan sistem tersebut menunjukkan bahwa boiler memiliki biaya *exergy destruction* yang dapat dihindari sebesar \$77,4/jam, menjadikannya prioritas utama untuk perbaikan. Pendekatan ini tidak hanya membantu menentukan komponen yang membutuhkan investasi teknologi, tetapi juga memberikan dasar bagi perencanaan ekonomi jangka panjang untuk meningkatkan profitabilitas PLTU.

Penelitian serupa oleh Galal et al. (2024) menggunakan analisis eksergoekonomi pada PLTU yang memanfaatkan panas limbah dari pabrik asam sulfat. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan tekanan dan suhu uap pada turbin dapat mengurangi biaya destruksi eksergi hingga \$6,8/jam. Dengan fokus pada hubungan antara efisiensi teknis dan biaya operasional, pendekatan ini memberikan alat pengambilan keputusan yang berharga bagi pengelola PLTU untuk mengoptimalkan efisiensi sekaligus meminimalkan biaya.

#### 4. Kesimpulan dan Saran

Evaluasi performa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) telah mengalami perkembangan signifikan seiring meningkatnya tuntutan akan efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan, dan optimalisasi ekonomi operasional. Kajian-kajian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan multidisiplin kini menjadi kunci dalam menganalisis dan meningkatkan performa PLTU, mencakup integrasi inovasi teknologi, optimasi berbasis prinsip termodinamika, serta pendekatan eksergetik dan eksergoekonomi yang holistik. Penelitian terkini menekankan pentingnya peningkatan efisiensi termal dan pengurangan destruksi eksergi, terutama pada komponen utama seperti boiler, superheater, reheater, kondensor, dan turbin. Analisis termodinamika klasik, khususnya melalui hukum pertama dan kedua, telah membantu mengidentifikasi titik-titik kritis inefisiensi energi, sementara pendekatan eksergoekonomi memberikan kerangka kerja untuk mengaitkan kerugian eksergi dengan aspek biaya, memungkinkan pengambilan keputusan investasi yang lebih tepat sasaran terhadap elemen yang paling berdampak terhadap performa dan biaya operasional.

Lebih lanjut, integrasi energi terbarukan seperti solar thermal, biomassa, dan sistem hybrid lainnya dalam konfigurasi PLTU telah menunjukkan potensi dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Studi-studi eksperimental dan simulasi termodinamika mengindikasikan bahwa integrasi ini dapat meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan serta menurunkan intensitas emisi karbon. Namun, tantangan teknis seperti kestabilan sistem, kontrol operasional, integrasi beban variabel, serta kebutuhan investasi awal yang tinggi menjadi hambatan utama yang perlu diselesaikan melalui pendekatan desain sistem dan manajemen energi yang lebih adaptif.

Secara keseluruhan, tinjauan ini menggarisbawahi bahwa peningkatan performa PLTU tidak cukup hanya dengan pengembangan teknologi semata, tetapi memerlukan sinergi antar disiplin ilmu—termasuk teknik mesin, energi, ekonomi, dan lingkungan—guna menjawab tantangan efisiensi, fleksibilitas operasional, serta keberlanjutan jangka panjang. Penelitian lanjutan sangat diperlukan untuk mengembangkan model dan teknologi adaptif yang mampu merespons

dinamika kebutuhan energi global, fluktuasi pasar energi, serta tuntutan pengurangan emisi dalam skenario transisi energi masa depan.

## 5. Daftar Pustaka

- [1] Fernando, Y. and Runturambi, A.J.S., 2024. Cost Benefit Analysis for Coal Steam Power Plants in Energy Security Framework. *JMKSP (Jurnal Manajemen, Kepemimpinan, dan Supervisi Pendidikan)*, 9(1), pp.731-746.
- [2] Milovanović, Z.N., Branković, D.L. and Milovanović, V.J., 2024. System reliability methods of complex coal-fired thermal power plant in the western Balkan countries: A critical review. *Developments in Reliability Engineering*, pp.229-326.
- [3] Kabeyi, M.J.B. and Olanrewaju, O.A., 2022. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy research*, 9, p.743114.
- [4] Elwardany, M., Nassib, A.M. and Mohamed, H.A., 2024. Advancing sustainable thermal power generation: insights from recent energy and exergy studies. *Process Safety and Environmental Protection*.
- [5] Frangopoulos, C.A. and Dimopoulos, G., 2024. A contribution to the discussion on the future of thermoeconomics. *Energy*, 298, p.131290.
- [6] Debiagi, P., Rocha, R.C., Scholtissek, A., Janicka, J. and Hasse, C., 2022. Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, p.112579.
- [7] Eguchi, S., Takayabu, H. and Lin, C., 2021. Sources of inefficient power generation by coal-fired thermal power plants in China: A metafrontier DEA decomposition approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, p.110562.
- [8] Xu, T., You, J., Li, H. and Shao, L., 2020. Energy efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A literature review. *Energies*, 13(14), p.3548.
- [9] Mohamed, K.A.E.H.A., Hassan, A.A.M. and Maghrabie, H.M., 2024. Performance assessment of a solar aided dual-fuel supercritical steam power plant for power boosting under different operating loads. *Applied Thermal Engineering*, 236, p.121734.
- [10] Cao, Y., Huang, Q., Fang, Y. and Si, F., 2024. Novel performance assessment method for superheated steam control of a coal-fired power plant under renewable energy accommodation condition. *Applied Thermal Engineering*, 243, p.122661.
- [11] Farmani, A. and Manjili, F.E., 2024. Reduce water consumption of steam power plant using novel single effect double lift absorption refrigeration system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 51, p.102645.
- [12] Dotto, A., Sacchi, R., Satta, F. and Campora, U., 2023. Dynamic performance simulation of combined gas electric and steam power plants for cruise-ferry ships. *Next Energy*, 1(3), p.100020.
- [13] Panbechi, B., Hajinezhad, A., Yousefi, H., Moosavian, S.F. and Hajinezhad, S., 2024. Environmental, economic and energy evaluation of alternative fuels for a steam power plant: Focus on biodiesel-nanoparticles utilization. *Results in Engineering*, 23, p.102636.
- [14] Cenușă, V.E. and Opreș, I., 2024. Design optimization of cogeneration steam power plants with supercritical parameters. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 64, p.103727.
- [15] Elhelw, M. and Al Dahma, K.S., 2019. Utilizing exergy analysis in studying the performance of steam power plant at two different operation mode. *Applied Thermal Engineering*, 150, pp.285-293.
- [16] Oyedepo, S.O., Fakeye, B.A., Mabinuori, B., Babalola, P.O., Leramo, R.O., Kilanko, O., Dirisu, J.O., Udo, M., Efemwenkikie, U.K. and Oyebanji, J.A., 2020. Thermodynamics analysis and performance optimization of a reheat-Regenerative steam turbine power plant with feed water heaters. *Fuel*, 280, p.118577.
- [17] Jahangiri, A. and Ameri, M., 2020. Interaction effects of natural draft dry cooling tower (NDDCT) performance and 4E (energy, exergy, economic and environmental) analysis of steam power plant under different climatic conditions. *Sustainable energy technologies and assessments*, 37, p.100599.

- [18] Galal, M., Abd El-Maksoud, R. and Bayomi, N.N., 2024. Exergy analysis of a steam power station in a sulfuric acid plant. *Case Studies In Thermal Engineering*, 53, p.103937.
- [19] Oko, C.O.C. and Njoku, I.H., 2017. Performance analysis of an integrated gas-, steam-and organic fluid-cycle thermal power plant. *Energy*, 122, pp.431-443.
- [20] Koroglu, T. and Sogut, O.S., 2023. Developing criteria for advanced exergoeconomic performance analysis of thermal energy systems: Application to a marine steam power plant. *Energy*, 267, p.126582.
- [21] Galal, M., Abd El Maksoud, R. and Bayomi, N.N., 2024. Exergoeconomic analysis of a steam turbine power plant in a sulfuric acid factory. *Results in Engineering*, 24, p.103330.
- [22] Goswami, A. and Gogoi, T.K., 2024. Design of components of a steam power plant and its exergoeconomic performance analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, 47, p.102276.