

## Review Optimalisasi Pengelolaan Pengotoran dan Korosi pada Sistem Perpindahan Panas terhadap *Reheater* pada PLTU

Sutiono Watiko Putro, dan Dani Rusirawan

Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,

Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

[sutionowatikoptr@gmail.com](mailto:sutionowatikoptr@gmail.com), [danir@itenas.ac.id](mailto:danir@itenas.ac.id)

### Abstrak

Pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas pembangkit listrik termal dapat mengurangi efisiensi operasional dan memperpendek umur peralatan. Masalah pengotoran di pembangkit listrik termal telah menjadi tantangan signifikan dalam pengelolaan efisiensi operasional. Pengotoran, yang umumnya disebabkan oleh akumulasi abu atau endapan pada permukaan perpindahan panas seperti pemanas ulang (*reheater*), mengurangi efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan konsumsi energi. Kondisi ini menyebabkan tidak hanya penurunan kinerja termal tetapi juga biaya operasional yang lebih tinggi akibat kebutuhan pembersihan yang lebih sering dan potensi kerusakan komponen *system*. Artikel ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi pengotoran dan korosi serta mengevaluasi upaya pencegahan yang dapat meningkatkan kinerja sistem. Metode yang digunakan adalah melihat hasil deskriptif studi kasus pada beberapa unit pembangkit listrik termal. Variabel yang dianalisis mencakup jenis material pipa, kualitas air, dan pengelolaan pemeliharaan, dengan cara pengumpulan data dari beberapa penelitian sebelumnya maka didapat perbandingan untuk ketahanan dan cara menambah efisiensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas air dan pemilihan material pipa yang tepat berperan signifikan dalam mengurangi tingkat pengotoran dan korosi sehingga proses pemanasan tidak terhambat oleh faktor-faktor tersebut. Implikasi penelitian ini dapat memberikan rekomendasi perbaikan pada sistem perpindahan panas pembangkit listrik termal, guna meningkatkan efisiensi operasional dan memperpanjang umur peralatan.

Kata kunci: *reheater*, pengotoran, korosi, sistem perpindahan panas, pembangkit listrik termal

### Abstract

Fouling and corrosion within heat transfer systems of thermal power plants can significantly decrease operational efficiency and reduce equipment lifespan. Managing fouling has become a major concern, as it negatively impacts heat exchange performance and increases energy consumption. Typically, fouling occurs due to accumulation of ash or other deposits on heat transfer surfaces like reheaters. This buildup not only lowers thermal efficiency but also raises operational costs by necessitating more frequent cleaning and increasing the risk of damage to system components. The purpose of this study is to identify the key factors influencing fouling and corrosion, as well as to evaluate preventive strategies that can enhance system performance. A descriptive approach was applied by analyzing case studies from multiple thermal power plant units. The study focuses on variables such as pipe material, water quality, and maintenance practices. By reviewing data from prior research, comparisons were made to assess material durability and ways to optimize system efficiency. The findings reveal that maintaining good water quality and selecting appropriate pipe materials are critical in minimizing fouling and corrosion. These insights can help develop effective recommendations to improve heat transfer systems, leading to better efficiency and longer operational life for power plant equipment.

Keywords: *reheater*, fouling, corrosion, heat transfer system, thermal power plant

### 1. Pendahuluan

Energi sangat penting bagi aktivitas manusia dan kemajuan masyarakat, energi terbarukan yang dikenal karena keberlanjutannya dan jejak karbon yang sangat rendah dipandang penting untuk memenuhi tujuan lingkungan. Ada komitmen global yang berkembang untuk mengembangkan sumber energi ini diantaranya rencana implementasi untuk mempromosikan pengembangan energi baru berkualitas tinggi di era baru namun sifat sumber daya terbarukan yang tidak menentu ini menghadirkan tantangan bagi stabilitas jaringan dan penyediaan listrik yang handal. Masalah pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas di pembangkit listrik termal telah menjadi tantangan signifikan dalam pengelolaan efisiensi operasional. Pengotoran, yang umumnya disebabkan oleh akumulasi abu atau endapan

#### Info Makalah:

Dikirim : 12-31-25;

Revisi 1 : 03-11-25;

Diterima : 03-12-25.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : [sutionowatikoptr@gmail.com](mailto:sutionowatikoptr@gmail.com)

pada permukaan perpindahan panas seperti pemanas ulang (*reheater*), mengurangi efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan konsumsi energi. Kondisi ini menyebabkan tidak hanya penurunan kinerja termal tetapi juga biaya operasional yang lebih tinggi akibat kebutuhan pembersihan yang lebih sering dan potensi kerusakan komponen sistem. (Sivathanu & Subramanian, 2018). Dampak pengotoran diperparah oleh metode tradisional dalam mengelola peniupan jelaga, yang sering kali menggunakan jadwal konservatif

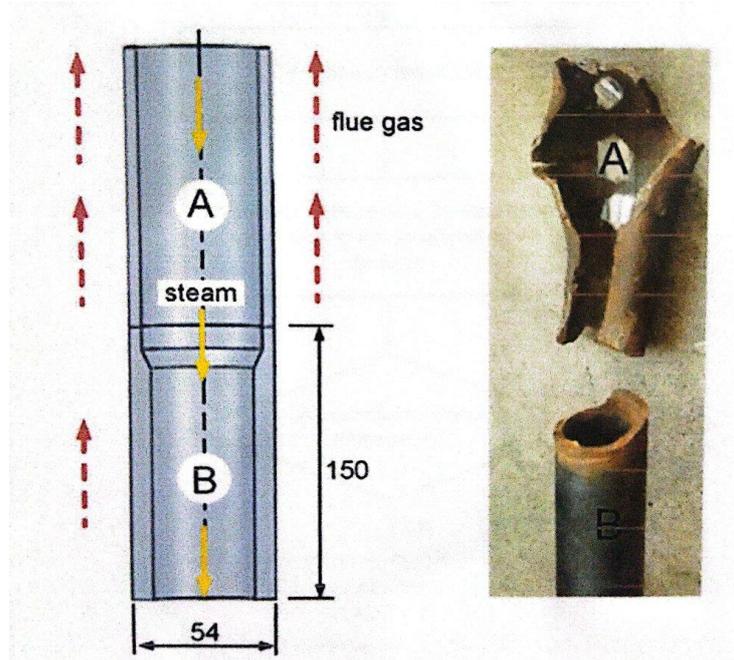
tanpa mempertimbangkan kondisi nyata dari tingkat pengotoran. Sebagai akibatnya, operasi peniupan jelaga yang terlalu sering dapat memboroskan sumber daya seperti uap dan menyebabkan erosi pada tabung. (Tallinn, 2023) Sebaliknya, peniupan jelaga yang tidak memadai dapat mempercepat penurunan efisiensi perpindahan panas dan bahkan merusak sistem lebih lanjut. Selain pengotoran, korosi yang disebabkan oleh pengotoran abu mengancam integritas mekanis dari *reheater* suhu rendah. Teknologi modern, seperti pemanas unggun terfluidisasi (*fluidized bed*), memberikan solusi parsial, namun, tantangan tetap ada dalam memprediksi secara akurat tingkat pengotoran dan korosi untuk mencegah kegagalan sistem (Khorampoor dkk., 2024).

Sebagai upaya untuk mengatasi masalah ini, diperlukan pendekatan berbasis teknologi yang mampu memberikan pemantauan dan estimasi pengotoran secara *real-time*. Penelitian terbaru mulai menjelajahi penggunaan metode berbasis model, seperti filter kalman ganda yang diperluas (*Dual Extended Kalman Filter* atau DEKF), untuk memberikan solusi yang lebih presisi dalam menganalisis tingkat pengotoran dan dampaknya pada efisiensi perpindahan panas. (Internasional dkk., 2021) Efisiensi sistem perpindahan panas di pembangkit listrik termal sering terhambat oleh pengotoran dan korosi, terutama pada pemanas ulang (*reheater*) suhu rendah. Permasalahan ini terjadi akibat akumulasi abu atau endapan pada permukaan perpindahan panas, yang menyebabkan penurunan drastis dalam kinerja termal. Dalam sistem yang bergantung pada operasi kontinu dan efisiensi tinggi, seperti pembangkit listrik, keterlambatan dalam mendeteksi dan menangani pengotoran dapat mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan, kerusakan perangkat keras, serta potensi pemadaman unit yang tidak direncanakan. (C. Wang dkk., 2022) Salah satu tantangan utama adalah ketidakmampuan metode konvensional untuk mendeteksi dan memprediksi pengotoran secara *real-time*. Sistem peniupan jelaga, misalnya, umumnya dijalankan berdasarkan jadwal tetap tanpa mempertimbangkan tingkat pengotoran aktual. Akibatnya, pengoperasian yang terlalu sering menyebabkan pemborosan sumber daya seperti uap, sementara frekuensi yang terlalu jarang mengakibatkan pengurangan efisiensi perpindahan panas dan memperburuk korosi (Chantasiriwan, 2023)

Lebih jauh, ketergantungan pada metode berbasis instrumen tradisional, seperti pengukuran suhu gas buang secara akustik, memiliki keterbatasan signifikan. Teknik ini hanya memberikan informasi lokal yang tidak mencerminkan kondisi pengotoran secara keseluruhan. Sementara itu, pendekatan berbasis model tradisional memerlukan data eksperimental yang besar dan sering kali bias karena keterbatasan parameter yang dapat diukur secara langsung. Tantangan ini menggarisbawahi perlunya metode baru yang lebih akurat untuk mendeteksi pengotoran dan memprediksi dampaknya pada efisiensi perpindahan panas. Pengembangan pendekatan berbasis model, seperti *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF), menawarkan potensi solusi yang signifikan. Teknologi ini dapat mengatasi keterbatasan pendekatan sebelumnya dengan menyediakan estimasi parameter pengotoran secara lebih presisi dan memungkinkan pengelolaan yang lebih efektif terhadap peniupan jelaga (Zima, 2019)

Artikel ini bertujuan untuk mengatasi tantangan pengelolaan pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas, khususnya pada pemanas ulang (*reheater*) suhu rendah di pembangkit listrik termal. Secara spesifik, bertujuan untuk merancang dan menerapkan metode berbasis model, seperti *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF), yang dapat memantau tingkat pengotoran secara *real-time*. Teknologi ini dirancang untuk memberikan estimasi parameter pengotoran yang akurat berdasarkan variabel operasi yang terukur, seperti suhu dan aliran massa gas buang. Pendekatan ini diharapkan dapat mengatasi keterbatasan metode konvensional yang cenderung bias dan kurang fleksibel dalam kondisi operasi nyata. Tujuan lain adalah untuk meningkatkan efektivitas peniupan jelaga dengan mengintegrasikan data prediksi pengotoran ke dalam pengaturan jadwal peniupan. Dengan cara ini, operasi peniupan dapat disesuaikan dengan kondisi aktual sistem, mengurangi pemborosan sumber daya seperti uap, serta menghindari erosi yang disebabkan oleh penguapan yang terlalu sering. (Xuan dkk., 2020) dari artikel ini kita dapat membandingkan kinerja DEKF dengan pendekatan konvensional seperti *Joint-Extended Kalman Filter* (JEKF) melalui simulasi dan validasi menggunakan data operasional pembangkit listrik. Hasil ini diharapkan dapat menunjukkan keunggulan DEKF dalam memperkirakan parameter model pengotoran dan efisiensi perpindahan panas

Dengan mengembangkan solusi berbasis teknologi yang lebih akurat, artikel ini dapat memberikan kontribusi praktis terhadap peningkatan efisiensi operasional pembangkit listrik termal. Hal ini mencakup pengurangan biaya operasional, pengurangan kerusakan perangkat keras, serta peningkatan keberlanjutan operasional seperti gambar berikut,



Gambar 1. Tabung *Superheater* Rusak Setelah Beroperasi Selama 115.360 jam

Penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi berbagai pendekatan untuk mengatasi pengotoran dan korosi pada pemanas ulang di pembangkit listrik termal (Oyedepo dkk.,2020). Namun, sejumlah celah dalam literatur tetap memengaruhi efektivitas solusi yang ada metode berbasis instrumen, seperti pengukuran suhu gas buang secara akustik, sering kali hanya memberikan data lokal yang tidak mencerminkan kondisi pengotoran secara keseluruhan. Pendekatan ini tidak mampu memberikan gambaran yang komprehensif dan *real-time* tentang tingkat pengotoran pada seluruh permukaan perpindahan panas

Pendekatan berbasis model tradisional, seperti model termal berbasis persamaan diferensial parsial, membutuhkan parameter eksperimen yang besar dan sering kali bias karena tidak tersedianya data pengukuran yang lengkap. (Yanping, 2020) Selain itu, metode ini memerlukan solusi numerik yang kompleks, yang membatasi penerapan praktis dalam kondisi operasi nyata. Meskipun teknologi modern seperti jaringan saraf tiruan telah diterapkan untuk memprediksi efisiensi perpindahan panas, teknologi ini juga memiliki kelemahan, seperti kebutuhan akan data pelatihan yang besar dan sulitnya menangani data yang tidak konsisten atau bervariasi. Teknologi berbasis filter Kalman, seperti *Joint-Extended Kalman Filter* (JEKF), juga memiliki keterbatasan dalam menghadapi kompleksitas sistem nonlinier yang dinamis (Yanping, 2020)

Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada simulasi dan analisis teoritis tanpa validasi ekstensif menggunakan data operasional nyata. Hal ini mengurangi keandalan hasil penelitian dalam aplikasi praktis. Selain itu, kebutuhan akan sistem monitoring yang *real-time* dan adaptif belum sepenuhnya terjawab oleh pendekatan yang ada. *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF) menawarkan solusi inovatif untuk menjawab celah ini. Metode ini mampu mengatasi kelemahan pada pendekatan berbasis model dan instrumen tradisional dengan menyediakan prediksi parameter pengotoran secara presisi dan *real-time*. Namun, aplikasi DEKF dalam pengelolaan pengotoran pada pemanas ulang masih belum dieksplorasi secara mendalam

Artikel ini menawarkan kontribusi baru dalam pengelolaan pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas di pembangkit listrik termal. Keunikan dari artikel ini terletak pada penerapan metode *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF) untuk mendeteksi dan memantau pengotoran secara *real-time*. Metode ini menghadirkan pendekatan yang lebih adaptif, presisi, dan efisien dibandingkan dengan metode konvensional seperti *Joint-Extended Kalman Filter* (JEKF) atau pendekatan berbasis instrumen tradisional

Integrasi Teknologi DEKF menjadi salah satu studi pertama yang mengaplikasikan teknologi DEKF untuk menganalisis tingkat pengotoran pada pemanas ulang (*reheater*) di pembangkit listrik termal. Teknologi ini memungkinkan pengelolaan data operasional secara lebih akurat dan efisien dibandingkan metode tradisional (X. Wang & Zhang, 2023) *Monitoring Real-Time*: DEKF menawarkan kemampuan *monitoring real-time* yang dapat memperbaiki prediksi tingkat pengotoran berdasarkan variabel terukur, seperti suhu dan aliran massa gas buang. Hal ini memberikan solusi yang inovatif untuk mengoptimalkan jadwal peniupan jelaga berdasarkan kondisi aktual sistem. Validasi dengan data operasional nyata: Studi ini memanfaatkan data operasional nyata untuk memvalidasi simulasi yang dilakukan. Ini menjadikan penelitian lebih relevan secara praktis dan aplikatif dibandingkan dengan studi yang hanya bergantung pada simulasi teoretis. Relevansi industri: permasalahan pengotoran dan korosi secara langsung

memengaruhi efisiensi dan biaya operasional pembangkit listrik. Artikel ini memberikan solusi praktis yang dapat membantu operator pembangkit listrik mengurangi pemborosan energi, memperpanjang masa pakai perangkat keras, dan meningkatkan efisiensi sistem perpindahan panas. Studi ini menjembatani celah dalam penelitian sebelumnya, dengan menggabungkan pendekatan berbasis model dan instrumen dalam satu sistem yang adaptif. Selain itu, penggunaan DEKF sebagai alat deteksi pengotoran memberikan kontribusi signifikan pada pengembangan teknologi *monitoring* termal berbasis model. (Nuklir, 2019) Dengan mengurangi frekuensi peniupan jelaga yang tidak diperlukan dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas, artikel ini juga memiliki dampak positif terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca, menjadikannya solusi yang lebih ramah lingkungan (Zheng dkk.,2021)

## 2. Metode

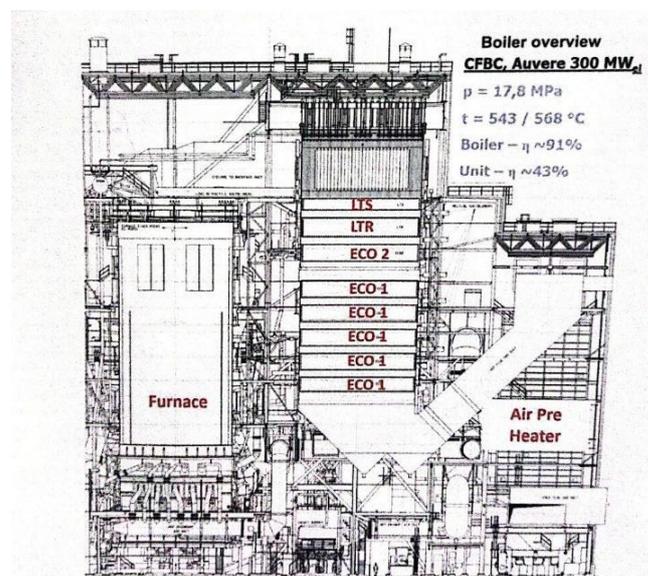
Artikel ini menggunakan studi literatur dengan desain penelitian sebelumnya yaitu deskriptif untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas pembangkit listrik termal. Artikel ini melihat pada Penelitian yang dilakukan beberapa unit pembangkit listrik termal yang menghadapi masalah pengotoran dan korosi dalam sistem perpindahan panas. Dengan menggabungkan eksperimen laboratorium dan observasi lapangan, artikel ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi dan pengelolaan pengotoran serta korosi, serta upaya untuk mengoptimalkan kinerja sistem. Populasi penelitian terdiri dari pembangkit listrik termal yang mengalami masalah pengotoran dan korosi, dengan sampel yang mencakup beberapa pembangkit yang mewakili kondisi tersebut. Variabel yang diuji mencakup jenis material pipa, kualitas air, dan pengelolaan pemeliharaan yang diterapkan pada sistem perpindahan panas. Variabel terikat yang dianalisis adalah tingkat pengotoran dan korosi yang mempengaruhi efisiensi dan kinerja sistem. Pengumpulan data dilakukan melalui berbagai metode, termasuk pada penelitian sebelumnya dilakukan pengukuran langsung menggunakan alat ukur ketebalan pipa dan mikroskop, serta dokumentasi terkait perawatan sistem.

Untuk analisis data, menggunakan teknik analisis kualitatif. Analisis kuantitatif dilakukan dengan uji statistik untuk mengukur hubungan antara variabel-variabel yang mempengaruhi tingkat pengotoran dan korosi, seperti jenis material pipa dan kualitas air. Analisis kualitatif dilakukan dengan menelaah data dan dokumentasi untuk memahami faktor-faktor pengelolaan pengotoran dan korosi dalam konteks yang lebih luas. Selain itu, metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk mengidentifikasi potensi kerusakan pada sistem dan menentukan prioritas perbaikan yang paling efektif.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Pengaruh *Double Reheat*

Artikel ini menyoroti berbagai tantangan dan solusi yang terkait dengan pengoperasian unit pembangkit listrik berbahan bakar batubara dan serpih minyak, termasuk efisiensi termal, stabilitas parameter operasi, serta pengelolaan pengotoran dan korosi dalam sistem pemanas. Salah satu temuan utama adalah bahwa fleksibilitas dan efisiensi unit pembangkit listrik dapat ditingkatkan melalui pemanfaatan teknologi pemanasan ulang ganda (*double-reheat*) dan boiler unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC). Teknologi CFBC terbukti lebih fleksibel dibandingkan dengan boiler terpulverisasi (PCC), terutama dalam menangani bahan bakar berkualitas rendah seperti serpih minyak dan batubara dengan kadar abu tinggi dengan gambar sebagai berikut



Gambar 2. Bagian Boiler CFBC

Salah satu karakteristik serpih minyak adalah kandungan klorin yang tinggi dalam bagian organik, yang dapat menyebabkan pengotoran dan korosi suhu tinggi pada komponen pemanas dengan rata – rata komposisi sebagai berikut

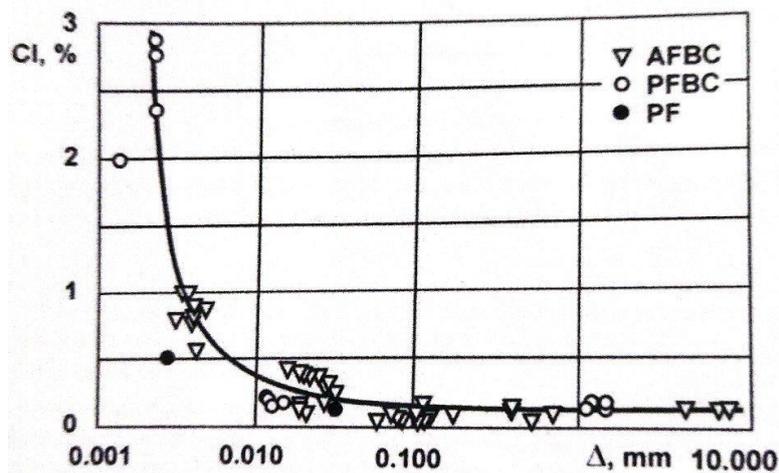
Tabel 1. Rata – Rata Komposisi Unsur Minyak

| Organik | Rata %    | Jangkauan | Tanah liat                        | Rata% | jangkauan | Karbonat                       | Rata% | Jangkauan  |
|---------|-----------|-----------|-----------------------------------|-------|-----------|--------------------------------|-------|------------|
| C       | 20,0-30,3 | 20,0-30,3 | SiO <sub>2</sub>                  | 15,2  | 13,5-18,6 | CaO                            | 21,3  | 14,4-24,,7 |
| H       | 2,5-3,8   | 2,5-3,8   | CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,2   | 0,2-0,3   | MgO                            | 2,9   | 2,0-3,4    |
| S       | 0,5-0,7   | 0,5-0,7   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 4,1   | 3,6-5,0   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,1   | 0,1        |
| N       | 0,1       | 0,1       | TiO                               | 0,7   | 0,6-0,9   | Co <sub>2</sub>                | 19,9  | 13,5-23,1  |
| HAL     | 3,0       | 2,6-3,9   | MgO                               | 0,2   | 0,2       |                                |       |            |
| CL      | 0,23      | 0,1-0,3   | Na <sub>2</sub> O                 | 0,1   | 0,1       |                                |       |            |
|         |           |           | K <sub>2</sub> O                  | 0,2   | 0,2-0,3   |                                |       |            |

Dari sisi efisiensi, penelitian menunjukkan bahwa kombinasi biomassa dengan bahan bakar serpih minyak dalam boiler CFBC meningkatkan fleksibilitas bahan bakar sekaligus menurunkan emisi sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>). Emisi ini hampir mendekati nol berkat penangkapan sulfur oleh kalsium oksida dalam abu serpih minyak. Penelitian juga mencatat pentingnya kontrol suhu uap dalam sistem termal pemanasan ulang ganda. Penerapan skema kontrol baru berbasis model dinamis telah terbukti mengurangi fluktuasi suhu uap pemanas ulang, menurunkan tingkat konsumsi bahan bakar, serta meningkatkan efisiensi termal secara keseluruhan. (Zima, 2019) Penelitian ini memaparkan mekanisme teknis dan teoritis yang mendasari pengelolaan tantangan operasional pada pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara, terutama dengan penerapan teknologi pemanas ulang ganda (*double-reheat*) dan boiler unggul terfluidisasi bersirkulasi (CFBC). Analisis ini mencakup aspek kandungan bahan bakar, perilaku abu, serta pengendalian suhu uap dalam sistem termal. (Oyedepo dkk., 2020)

### 3.2. Pengaruh Kandungan Klorin dan Alkali dalam Serpih Minyak

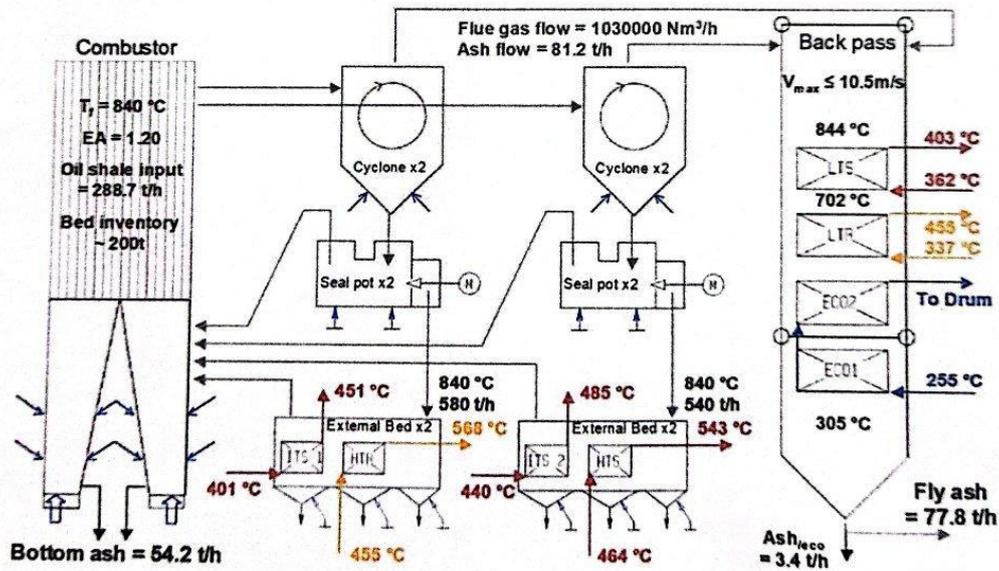
Serpih minyak sebagai bahan bakar memiliki kandungan klorin tinggi dalam bagian organik (hingga 0,75%), yang berdampak pada pembentukan endapan korosif pada permukaan pemanas. Logam alkali, seperti natrium dan kalium, bereaksi dengan klorin selama pembakaran untuk membentuk senyawa seperti kalium klorida (KCl), yang selanjutnya dapat menyebabkan korosi suhu tinggi pada tabung pemanas.



Gambar 3. Kandungan Klorin Dalam Abu Serpih Minyak Tergantung Ukuran Tertentu

### 3.3. Perilaku Abu dan Tantangan Operasional

Abu yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar serpih minyak menunjukkan volatilitas tinggi, yang mengakibatkan peningkatan risiko pengotoran (*slagging*) dan korosi. Dalam boiler CFBC, suhu pembakaran yang relatif rendah (di bawah 900°C) membantu menjaga stabilitas mineral abu, mengurangi *slagging*, dan memastikan abu tetap dalam bentuk aslinya tanpa pelapukan atau dekomposisi. Namun, pengelolaan abu terbang yang kaya klorin memerlukan perhatian khusus karena dapat membentuk lapisan endapan yang sulit dihilangkan seperti gambar berikut,



Gambar 4. Distribusi Aliran Abu Auvere CFBC

### 3.4. Optimalisasi Sistem Termal dengan Teknologi Pemanasan Ulang Ganda

Pada pembangkit listrik dengan pemanasan ulang ganda, kontrol suhu uap sangat penting untuk menjaga stabilitas parameter termal dan efisiensi operasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu uap utama lebih sensitif terhadap regulasi gas buang, sementara suhu uap pemanas ulang lebih dipengaruhi oleh kontrol *damp* gas. Dengan menggunakan skema kontrol berbasis model dinamis, fluktuasi suhu dapat diminimalkan, sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar rata-rata hingga  $0,8\text{--}1,9\text{ g/kWh}$  dan menurunkan suhu logam hingga  $12^\circ\text{C}$  selama operasi transien.

### 3.5. Implikasi Mekanisme Pengotoran dan Korosi

Penempatan komponen pemanas seperti *superheater* dan *reheater* pada zona abu unggun terfluidisasi membantu mengurangi kontak dengan gas buang agresif, sehingga meminimalkan risiko pengotoran dan korosi. Penggunaan siklon yang didinginkan juga efektif dalam menjaga suhu gas buang tetap rendah saat memasuki bagian konvektif *boiler*, yang secara signifikan mengurangi pembentukan endapan abu (Oyedepo dkk.,2020)

Penelitian ini tidak hanya mengungkapkan tantangan teknis yang unik dalam pengelolaan pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara, tetapi juga menawarkan solusi inovatif yang dibandingkan dengan pendekatan dari studi sebelumnya. Perbandingan ini menunjukkan bagaimana teknologi baru memberikan efisiensi dan fleksibilitas yang lebih tinggi, sekaligus memperkuat validitas temuan dengan mengacu pada literatur terkait.

### 3.6. Perbandingan Efisiensi dan Pengelolaan Energi

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa *boiler* pemanasan ulang ganda memberikan efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan *boiler* konvensional. Penelitian oleh Wang et al. (2022) menemukan bahwa peningkatan efisiensi termal hingga  $6,23\%$  dapat dicapai melalui optimasi sistem kontrol dalam pembangkit listrik berbahan bakar batubara dengan pemanasan ulang ganda. Temuan ini diperkuat oleh analisis dalam makalah Konist (2023), yang menyoroti bagaimana teknologi unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC) secara efektif menangani bahan bakar berkualitas rendah seperti serpih minyak dan menghasilkan emisi  $\text{SO}_2$  yang sangat rendah (Internasional dkk.,2021)

### 3.7. Kontrol Suhu dan Stabilitas Operasional

Pendekatan skema kontrol baru yang disajikan dalam penelitian ini dibandingkan dengan metode tradisional yang lebih reaktif. Ray et al. (2014) menekankan pentingnya mempertimbangkan penghancuran eksergi dalam proses transien untuk meningkatkan stabilitas kontrol suhu. Sebaliknya, penelitian ini menunjukkan bahwa skema kontrol berbasis model dinamis lebih efektif dalam merespons perubahan parameter operasional, mengurangi fluktuasi suhu, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar.

### 3.8. Pengelolaan Risiko Operasional

Masalah pengotoran dan korosi pada *boiler* telah menjadi perhatian dalam berbagai penelitian sebelumnya. Misalnya, penelitian oleh Zhao et al. (2022) membahas bagaimana pengaturan uap ekstraksi dapat mengurangi

dampak korosi pada komponen *boiler*. Dalam penelitian ini, solusi seperti penempatan komponen pemanas pada zona abu unggun terfluidisasi dan penggunaan siklon yang didinginkan memberikan pendekatan baru yang lebih efisien untuk meminimalkan risiko pengotoran dan korosi.

Pendekatan yang diusulkan dalam penelitian ini juga memberikan panduan untuk pengembangan teknologi pembangkit listrik yang lebih fleksibel dan berkelanjutan. Penelitian sebelumnya oleh (U. Tallinn., 2022) menunjukkan bahwa kontrol perlambatan kondensat dapat meningkatkan fleksibilitas operasional pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Temuan ini relevan dengan skema kontrol yang dioptimalkan dalam penelitian ini, yang mengintegrasikan koreksi sinyal awal untuk mengurangi laju konsumsi bahan bakar dan menjaga stabilitas suhu uap selama proses transien. (Khorampoor dkk., 2024)

### 3.9. Implikasi Operasional

Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai dampak operasional dari penerapan teknologi unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC) dan sistem pemanasan ulang ganda (*double-reheat*) pada pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara. Implikasi operasional yang diidentifikasi mencakup aspek efisiensi, pengurangan risiko operasional, serta keberlanjutan lingkungan.

#### 3.9.1. Fleksibilitas Bahan Bakar

Teknologi CFBC menawarkan fleksibilitas yang signifikan dalam menangani bahan bakar berkualitas rendah seperti serpih minyak, biomassa, dan batubara dengan kadar abu tinggi. Suhu pembakaran yang rendah pada CFBC memungkinkan mineral dalam abu tetap stabil, mengurangi pengotoran (*slagging*) dan pembentukan kerak. Fleksibilitas ini memungkinkan pembangkit listrik untuk memanfaatkan berbagai campuran bahan bakar, termasuk biomassa, sebagai cara untuk mengurangi emisi karbon (González dkk., 2006).

#### 3.9.2. Pengelolaan Korosi dan Pengotoran

Penempatan *superheater* dan *reheater* pada zona abu unggun terfluidisasi di boiler CFBC mengurangi kontak dengan gas buang agresif yang kaya akan klorin dan senyawa alkali. Langkah ini secara signifikan mengurangi risiko korosi suhu tinggi dan pengotoran pada permukaan pemanas. Selain itu, penggunaan siklon yang didinginkan menjaga suhu gas buang tetap rendah sebelum memasuki bagian konvektif, yang meminimalkan pembentukan endapan abu yang sulit dihilangkan.

#### 3.9.3. Peningkatan Efisiensi Operasional

Skema kontrol baru yang diusulkan pada penelitian ini telah menunjukkan peningkatan efisiensi operasional. Sistem ini berhasil mengurangi konsumsi bahan bakar rata-rata sebesar 0,8–1,9 g/kWh selama operasi transien dan menurunkan suhu logam hingga 12°C, yang mengurangi risiko kegagalan komponen. Selain itu, stabilitas suhu uap utama dan pemanas ulang membantu mempertahankan efisiensi termal yang optimal selama operasi pembangkit listrik.

#### 3.9.4. Dampak terhadap Keberlanjutan Lingkungan

Teknologi CFBC, dengan kemampuan untuk menangkap sulfur dalam abu, menghasilkan emisi SO<sub>2</sub> yang mendekati nol tanpa memerlukan sorbent tambahan. Hal ini sejalan dengan target pengurangan emisi karbon dan peningkatan keberlanjutan energi. Selain itu, pemanfaatan bahan bakar biomassa sebagai campuran memberikan kontribusi positif terhadap pengurangan jejak karbon pembangkit listrik (C. Wang dkk., 2020).

### Kesimpulan

Artikel ini memberikan wawasan penting tentang optimasi sistem pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara, dengan menyoroti efisiensi dan fleksibilitas operasional yang dapat dicapai melalui penerapan teknologi unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC) dan pemanasan ulang ganda. Teknologi CFBC dan pemanasan ulang ganda secara signifikan meningkatkan efisiensi termal dan stabilitas sistem, dengan penurunan konsumsi bahan bakar hingga 1,9 g/kWh selama operasi transien serta pengurangan fluktuasi suhu uap. Pendekatan ini berhasil meminimalkan pengotoran dan korosi melalui pengelolaan kandungan klorin dalam abu serpih minyak serta pengaturan suhu gas buang dan menggunakan metode perawatan (DEKF). Dengan emisi SO<sub>2</sub> yang mendekati nol dan fleksibilitas bahan bakar yang memungkinkan penggunaan biomassa, teknologi ini memberikan dampak positif terhadap keberlanjutan lingkungan dan mendukung target pengurangan emisi karbon. Namun, keterbatasan seperti ketergantungan pada data simulasi, fokus pada teknologi tertentu, serta kurangnya analisis dampak jangka panjang dan ekonomi, menunjukkan bahwa masih ada ruang untuk pengembangan lebih lanjut.

### Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lapangan dalam kondisi operasional nyata untuk memvalidasi hasil simulasi, terutama pada pembangkit listrik dengan variasi bahan bakar yang lebih luas.

2. Model kontrol yang lebih sederhana dan ekonomis perlu dikembangkan untuk mendukung penerapan luas, terutama di daerah dengan keterbatasan teknologi dan sumber daya.
3. Penelitian lebih lanjut tentang efek jangka panjang terhadap komponen sistem, seperti *superheater* dan *reheater*, diperlukan untuk memastikan durabilitas teknologi ini dalam berbagai skenario operasional.
4. Teknologi ini dapat dikembangkan lebih lanjut agar sesuai dengan jenis pembangkit listrik lainnya, seperti *boiler* terpulverisasi (PCC) atau pembangkit berbahan bakar cair dan gas.

Analisis ekonomi yang mendalam diperlukan untuk mengevaluasi biaya dan manfaat implementasi teknologi ini. Selain itu, dampak lingkungan jangka panjang, termasuk potensi pengurangan emisi karbon, harus dievaluasi untuk mendukung tujuan keberlanjutan global.).

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam artikel ini, Terutama dosen pembimbing yaitu bapak Dani Rusirawan, Ph.D. Tidak lupa, kami juga mengucapkan terima kasih kepada keluarga yang selalu memberikan dukungan moral dan motivasi. Semoga hasil *review* penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan sistem perpindahan panas dalam pembangkit listrik termal dan meningkatkan efisiensi operasional di masa depan.

### Daftar Pustaka

- Chantasiriwan, S. (2023). Machine Translated by Google *Kemajuan Ilmu Termal dan Teknik*. 46.
- González, M. M. P., García, F. J. F., Ramón, I. S., & Roces, H. S. (2006). Experimental thermal behavior of a power plant reheater. *Energy*, 31(5), 665–676. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.04.009>
- Internasional, J., Panas, P., Daneshazarian, R., Antoun, S., & Dworkiny, S. B. (2021). Machine Translated by Google *Jurnal Internasional Perpindahan Panas dan Massa* Machine Translated by Google. 173, 22–27.
- Khorampoor, S., Sanaye, S., & Sanaye, S. K. S. (2024). Machine Translated by Google *Laporan Energi Pembakaran gas alam yang efisien dan pengurangan NOx : Aplikasi baru dari sirkulasi udara pembakaran ( OFA ) dan resirkulasi gas buang ( FGR ) secara simultan 250 MW lawan pembakaran boiler PLTU* Machine Translat. 12, 2573–2587.
- Nuklir, T. (2019). *Teknik Nuklir dan Desain*. 341(November 2018), 368–376.
- Oyedepo, S. O., Fakeye, B. A., Mabinuori, B., Babalola, P. O., Leramo, R. O., Kilanko, O., Dirisu, J. O., Udo, M., Efemwenkikie, U. K., & Oyebanji, J. A. (2020). *Bahan bakar Analisis termodinamika dan pengoptimalan kinerja pemanasan ulang - Pembangkit listrik turbin uap regeneratif dengan pemanas air umpan*. 280.
- Sivathanu, A. K., & Subramanian, S. (2018). *Praktik Teknik Kontrol*. 73(September 2017), 91–99.
- Tallinn, U. T. (2023). Machine Translated by Google *Investigasi pengotoran dan korosi pada reheater suhu rendah di Ketel CFBC Alar Konist*. 338(September 2022).
- Wang, C., Liu, Z., Mengyang, K., Yongliang, Z., Liu, M., & Yan, J. (2022). Machine Translated by Google *Teknik Termal Terapan dengan pemanasan ulang ganda dengan mengoptimalkan kontrol suhu uap : Dari*. 217, 1–17.
- Wang, C., Qiao, Y., Liu, M., & Zhao, Y. (2020). *Energi Terapan*. 260.
- Wang, X., & Zhang, K. (2023). Machine Translated by Google *Ilmu Korosi Perilaku oksidasi uap tabung baja T92 untuk pemanas ulang suhu tinggi setelah layanan jangka panjang dalam boiler ultra-superkritis*. 221(April).
- Xuan, C., Lia, X., Liua, X., Berlisensi, J., Tenaga, U., & Cina, L. (2020). *Teknik Termal Terapan*. 178.
- Yanping, Z. (2020). Machine Translated by Google *Laporan Energi Analisis kinerja skema pemanfaatan superheat ekstraksi turbin pembangkit listrik yang dibangun*. 6, 2200–2210.
- Zheng, Z. B., Zhang, J., Matahari, X., Jianwei, Z., & Dia, H. (2021). *Analisis Kegagalan Teknik*. 121(November 2020).
- Zima, W. (2019). *Energi Simulasi peningkatan cepat laju aliran massa uap pada outlet boiler daya superkritis* Machine Translated by Google. 173, 995–1005.