

Review Teknologi Inovatif untuk Meningkatkan Efisiensi Termal dan Mengurangi Dampak Lingkungan pada PLTU

Maman Fathurakhman^{1*}, Dani Rusirawan²

¹Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung
Jl. Phh. Mustofa No. 23 Neglasari, Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

²Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung
Jl. Phh. Mustofa No. 23 Neglasari, Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

*Corresponding author: : fatureno820340@gmail.com

Abstract

This study explores innovative technologies aimed at enhancing thermal efficiency and reducing the environmental impact of coal-fired power plants (CFPPs). The main objective is to evaluate the potential integration of advanced technologies that support a cleaner and more sustainable energy transition for CFPPs. The technologies reviewed include the use of nanofluids in concentrated solar power (CSP) systems, supercritical power generation, and blended fuels with biodiesel and nanoparticles, which demonstrate improved energy efficiency and lower greenhouse gas (GHG) emissions. Co-firing with biomass and advanced combustion systems such as oxy-fuel circulating fluidized bed (CFB) enable CO₂ emission reductions through carbon-neutral fuel sources. Additionally, poly generation systems—integrating electricity, heating, cooling, and desalination—offer high overall efficiency with minimal emissions. The study employs a comprehensive literature review, performance comparisons, and life cycle assessment (LCA) to evaluate both technical and environmental aspects. Results indicate that nanotechnology and biomass integration can boost thermal efficiency by 10–15% and reduce CO₂ emissions by over 40% compared to conventional systems. Poly generation systems can achieve up to 80% total efficiency. This research highlights the need for integrated approaches in designing low-carbon, high-efficiency CFPP systems for a more sustainable energy future

Keywords: nanofluids, supercritical power plants, biomass co-firing, polygeneration systems, life cycle assessment.

Abstrak

Penelitian ini mengeksplorasi teknologi inovatif yang bertujuan meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi dampak lingkungan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Tujuan utama dari studi ini adalah mengevaluasi potensi penerapan teknologi-teknologi baru dalam mendukung transisi energi PLTU menuju sistem yang lebih bersih dan berkelanjutan. Teknologi yang dikaji meliputi penggunaan nanofluida pada sistem tenaga surya terkonsentrasi (CSP), pembangkit superkritis, serta campuran bahan bakar biodiesel dan nanopartikel yang terbukti meningkatkan efisiensi dan menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK). Co-firing biomassa dan pembakaran canggih seperti oxy-fuel CFB juga berperan dalam menurunkan emisi CO₂ melalui bahan bakar netral karbon. Sistem poligenerasi yang menggabungkan pembangkitan listrik, pemanasan, pendinginan, dan desalinasi menawarkan efisiensi energi tinggi dengan emisi rendah. Metode yang digunakan meliputi studi literatur, analisis komparatif performa teknologi, dan penilaian siklus hidup (Life Cycle Assessment/LCA). Hasil menunjukkan bahwa integrasi teknologi nanoteknologi dan biomassa dapat meningkatkan efisiensi hingga 10–15% serta menurunkan emisi CO₂ lebih dari 40%. Sistem poligenerasi bahkan mampu mencapai efisiensi total hingga 80%. Studi ini menekankan pentingnya pendekatan terintegrasi dalam modernisasi PLTU menuju sistem energi rendah karbon dan berdaya saing

Kata Kunci: nanofluida, pembangkit superkritis, co-firing biomassa, sistem poligenerasi, analisis siklus hidup.

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) telah menjadi elemen kunci dalam infrastruktur energi global, memberikan pasokan listrik yang stabil dan dapat diperbesar sesuai kebutuhan, serta mendukung pertumbuhan ekonomi dan

modernisasi industri di berbagai negara. Dengan cara mengubah energi panas dari pembakaran bahan bakar fosil atau biomassa menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi listrik, PLTU memiliki peran vital dalam memenuhi permintaan energi yang terus berkembang. Namun, meskipun berkontribusi besar terhadap

ketahanan energi dan perkembangan ekonomi, dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh operasional PLTU, terutama terkait dengan emisi gas rumah kaca (GRK), menjadi isu kritis yang memerlukan perhatian serius. Upaya global untuk mengurangi emisi CO₂ dan mengatasi perubahan iklim semakin mendorong perlunya solusi untuk mengurangi dampak lingkungan dari sektor ini.

Selain permasalahan lingkungan, tantangan besar lainnya dalam operasional PLTU adalah efisiensi termal yang relatif rendah dibandingkan teknologi pembangkit listrik lainnya. Efisiensi termal mengacu pada seberapa besar energi panas dari bahan bakar yang berhasil dikonversi menjadi energi listrik yang berguna. Pada umumnya, efisiensi termal PLTU konvensional berada di kisaran 33–42%, artinya lebih dari separuh energi dari pembakaran bahan bakar terbuang dalam bentuk panas yang tidak dimanfaatkan. Rendahnya efisiensi ini tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga meningkatkan konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca per unit energi listrik yang dihasilkan. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi termal menjadi aspek krusial dalam upaya membuat PLTU lebih ramah lingkungan dan hemat energi. Berbagai pendekatan telah dikembangkan, seperti pengembangan desain turbin uap yang lebih efisien, penerapan siklus termodinamika lanjutan (seperti siklus superkritis dan ultra-superkritis), serta pemanfaatan kembali panas buang melalui teknologi kogenerasi atau pemanfaatan uap sisa. Peningkatan efisiensi ini tidak hanya berdampak pada pengurangan emisi, tetapi juga pada peningkatan keekonomian operasional pembangkit.

Salah satu tantangan utama yang dihadapi oleh PLTU adalah tingginya kontribusi terhadap kerusakan lingkungan. Ketergantungan pada batu bara dan bahan bakar fosil lainnya menyebabkan tingginya emisi karbon dioksida (CO₂), yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global. Selain itu, PLTU juga menghasilkan polutan berbahaya seperti sulfur oksida

(SO_x), nitrogen oksida (NO_x), dan partikel-partikel lain yang berdampak buruk pada kesehatan manusia dan ekosistem. Proses pendinginan yang digunakan dalam PLTU juga menyebabkan polusi termal yang merusak ekosistem perairan. Kondisi ini semakin memperkuat urgensi bagi sektor energi untuk mengimplementasikan solusi berkelanjutan yang dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk menilai perkembangan teknologi dan strategi yang dapat mengurangi dampak lingkungan PLTU. Pendekatan-pendekatan inovatif, seperti diversifikasi sumber bahan bakar, pemanfaatan panas buang, dan teknologi penangkapan karbon (carbon capture), diharapkan dapat membantu mengurangi emisi GRK dan polusi lainnya. Selain itu, tinjauan ini juga akan membahas aspek ekonomi dan kebijakan terkait penerapan teknologi hijau, serta kelayakan dan skalabilitasnya dalam berbagai konteks. Dengan fokus pada dampak lingkungan, penelitian ini juga mengakui keterbatasan, termasuk kurangnya perhatian pada aspek sosial dan politik yang mempengaruhi adopsi teknologi berkelanjutan. Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan yang lebih terperinci mengenai langkah-langkah yang perlu diambil agar PLTU dapat menjadi bagian dari sistem energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

2. Review Literatur

2.1. Teknologi Peningkatan Efisiensi Termal PLTU

Efisiensi termal merujuk pada kemampuan suatu sistem untuk mengkonversi energi panas menjadi energi yang berguna, seperti energi mekanik atau listrik. Dalam konteks pembangkit listrik, efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi dari bahan bakar yang digunakan dapat diubah menjadi energi listrik, sementara sisanya hilang dalam bentuk panas yang tidak dapat dimanfaatkan. Semakin tinggi efisiensi termal suatu pembangkit, semakin sedikit bahan bakar

yang dibutuhkan untuk menghasilkan jumlah listrik yang sama, yang mengarah pada penghematan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca.

Salah satu teknologi yang banyak diteliti untuk meningkatkan efisiensi termal adalah penggunaan nanofluida dalam sistem CSP (Concentrated Solar Power). Nanofluida, yang merupakan cairan dasar yang dicampur dengan nanopartikel (seperti oksida logam), memiliki konduktivitas termal yang jauh lebih tinggi dibandingkan cairan konvensional. Hal ini memungkinkan sistem CSP untuk lebih efisien dalam mengumpulkan dan mentransfer panas, yang akhirnya meningkatkan efisiensi termal sistem secara keseluruhan. Beberapa studi menunjukkan bahwa nanofluida dapat meningkatkan kemampuan pemindahan panas dalam sistem pembangkit listrik, meskipun penggunaan nanofluida juga menambah kebutuhan daya pemompaan. Peningkatan viskositas fluida menyebabkan kebutuhan energi untuk memompa menjadi lebih tinggi, yang pada gilirannya dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca (GRK), terutama CO₂, yang dihasilkan dari konsumsi energi tambahan dalam sistem pemompaan [1].

Selain itu, teknologi pembangkit superkritis dan ultra-superkritis merupakan alternatif yang menawarkan peningkatan efisiensi termal yang signifikan. Pada teknologi ini, air dipanaskan pada suhu dan tekanan yang sangat tinggi, mencapai kondisi superkritis, yang memungkinkan efisiensi konversi energi yang lebih besar. Dengan beroperasi pada kondisi ini, pembangkit dapat menghasilkan lebih banyak energi dari bahan bakar yang lebih sedikit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa teknologi superkritis dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 45%, sementara pembangkit konvensional hanya dapat mencapai sekitar 35% [2]. Meskipun efisiensi yang lebih tinggi sangat menguntungkan, teknologi ini menghadirkan tantangan dalam hal material canggih yang digunakan untuk menahan suhu dan tekanan ekstrem, yang memiliki

dampak lingkungan dari proses produksinya dan penggunaan energi dalam manufakturnya.

Penggunaan bahan bakar campuran biodiesel dan nanopartikel juga menunjukkan potensi yang sangat baik untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi. Biodiesel, yang terbuat dari minyak nabati atau lemak hewani, dikenal menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil tradisional. Penambahan nanopartikel seperti oksida logam dapat memperbaiki profil pembakaran biodiesel, mengurangi emisi partikulat dan CO₂, serta menghasilkan pembakaran yang lebih bersih. Beberapa studi menunjukkan bahwa campuran ini dapat mengurangi emisi partikulat halus yang berbahaya, yang sering terjadi pada pembakaran bahan bakar diesel konvensional [3]. Dengan mengurangi emisi polutan ini dan meningkatkan efisiensi pembakaran, teknologi ini tidak hanya memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan tetapi juga meningkatkan kinerja pembangkit listrik secara keseluruhan.

2.2. Teknologi Pengurangan Emisi PLTU

Salah satu metode yang menjanjikan untuk mengurangi emisi CO₂ dan dampak lingkungan dari pembangkit listrik adalah co-firing biomassa. Co-firing melibatkan pembakaran biomassa bersamaan dengan bahan bakar fosil, seperti batu bara, dalam pembangkit listrik. Biomassa memiliki keunggulan utama karena bersifat netral karbon, yang berarti jumlah CO₂ yang dilepaskan selama pembakaran setara dengan jumlah CO₂ yang diserap selama proses fotosintesis tanaman biomassa. Dengan demikian, teknologi ini dapat mengurangi emisi CO₂ bersih dari pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil. Namun, penerapan teknologi ini masih menghadapi beberapa tantangan, seperti masalah logistik rantai pasokan dan persaingan penggunaan lahan. Biomassa memerlukan proses pengumpulan dan distribusi yang efisien, serta penggunaan

lahan yang dapat bersaing dengan kebutuhan untuk produksi pangan atau konservasi lingkungan [4]. Oleh karena itu, pengelolaan yang lebih baik dalam hal sumber daya dan distribusi biomassa diperlukan untuk memaksimalkan pengurangan emisi ini.

Teknologi pembakaran canggih seperti Oxy-fuel Circulating Fluidized Bed (CFB) menawarkan solusi efektif dalam mengurangi emisi CO₂. Pada teknologi Oxy-fuel CFB, pembakaran dilakukan dalam atmosfer oksigen murni, yang menghasilkan konsentrasi CO₂ yang lebih tinggi dan mempermudah proses penangkapan CO₂. Teknologi ini juga mengurangi emisi polutan lainnya, seperti NO_x dan SO_x, yang biasanya dihasilkan selama pembakaran fosil. Selain itu, kombinasi sistem Oxy-fuel CFB dengan sel bahan bakar karbonat cair dapat menghasilkan pengurangan emisi CO₂ yang signifikan, dengan potensi pengurangan hingga 137.701 ton CO₂ per tahun dalam beberapa studi [5]. Namun, meskipun teknologi ini sangat efektif dalam penangkapan karbon, biaya awal untuk pembangunan dan operasional sistem ini masih sangat tinggi, yang menjadi hambatan utama dalam adopsinya secara luas.

Selain itu, integrasi sistem poligenerasi semakin banyak dipertimbangkan sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan. Sistem poligenerasi menggabungkan beberapa fungsi seperti pembangkit listrik, pemanasan, pendinginan, dan desalinasi dalam satu sistem yang terpadu. Pendekatan ini memungkinkan energi yang dihasilkan dimanfaatkan secara lebih efisien, dengan energi panas yang diperoleh digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pemanasan atau produksi air desalinasi. Salah satu keuntungan utama dari sistem poligenerasi adalah efisiensi eksergi yang sangat tinggi, mencapai lebih dari 80% dalam beberapa studi, serta rendahnya intensitas emisi CO₂. Teknologi ini memungkinkan pengurangan total emisi gas rumah kaca sambil memenuhi kebutuhan energi yang beragam

dalam satu sistem. Penelitian menunjukkan bahwa dengan mengintegrasikan pembangkit listrik dan desalinasi dalam satu sistem, emisi CO₂ dapat dikurangi hingga 40% dibandingkan dengan sistem konvensional [6]. Meski demikian, tantangan utama dari teknologi ini adalah kebutuhan untuk merancang dan mengelola sistem yang kompleks dan mahal, serta infrastruktur yang tepat untuk mendukungnya.

2.3. Teknologi Pemanfaatan Energi Terbarukan

Pencucian batu bara menggunakan jigging merupakan teknik yang semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan kualitas batu bara sebelum digunakan dalam pembangkit listrik, dengan tujuan mengurangi kotoran pembakaran dan meningkatkan efisiensi. Proses jigging memanfaatkan aliran air untuk memisahkan partikel batu bara berdasarkan perbedaan densitas, di mana batu bara yang lebih berat dipisahkan dari kontaminan ringan seperti tanah, pasir, dan mineral. Dibandingkan dengan metode flotasi tradisional yang mengandalkan bahan kimia, jigging tidak memerlukan bahan kimia tambahan dan lebih efisien dalam mengurangi kontaminasi yang dapat menyebabkan polusi saat pembakaran. Dengan menurunkan kandungan sulfur dan abu dalam batu bara, teknik ini membantu mengurangi emisi SO_x (sulfur oksida) dan NO_x (nitrogen oksida), yang berkontribusi terhadap polusi udara dan hujan asam [7]. Oleh karena itu, pencucian batu bara menggunakan jigging tidak hanya meningkatkan kualitas bahan bakar tetapi juga mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan pembangkit berbahan bakar batu bara.

Konsep CSP+ menggabungkan dua teknologi energi terbarukan, CSP (Concentrated Solar Power) dan PV (Photovoltaic), untuk meningkatkan kinerja sistem secara ekonomi dan lingkungan. CSP memanfaatkan cermin atau lensa untuk mengumpulkan dan memfokuskan sinar matahari menjadi energi panas, yang

kemudian digunakan untuk menghasilkan listrik. Sementara itu, PV mengubah cahaya matahari langsung menjadi listrik melalui panel surya. Dengan menggabungkan keduanya dalam sistem CSP+, sinar matahari dapat dimanfaatkan lebih efisien sepanjang hari, di mana CSP mengoptimalkan produksi energi saat intensitas sinar matahari tinggi, sedangkan PV tetap berfungsi dengan baik pada cahaya rendah, seperti pada pagi hari atau saat cuaca mendung. Integrasi ini memberikan keuntungan dalam mengurangi biaya operasional, meningkatkan keandalan energi, serta mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan dari pembangkit listrik [8].

Penangkapan karbon (carbon capture) adalah teknologi yang digunakan untuk menangkap dan menyimpan CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak, dan gas alam, yang umumnya digunakan dalam pembangkit listrik dan sektor industri. Teknologi ini penting untuk mengurangi dampak perubahan iklim, karena CO₂ merupakan gas rumah kaca yang berperan besar dalam pemanasan global. Proses carbon capture umumnya mencakup tiga tahap: menangkap CO₂ dari sumber emisi, mentransportasi gas yang tertangkap, dan menyimpannya dalam reservoir bawah tanah yang aman, seperti formasi geologi atau ladang minyak dan gas yang tidak lagi aktif. Teknologi ini tidak hanya mengurangi emisi CO₂ ke atmosfer, tetapi juga memungkinkan penggunaan kembali CO₂ dalam aplikasi industri seperti produksi bahan kimia atau pencetakan [9]. Walaupun memiliki potensi besar untuk menurunkan emisi, penerapan teknologi ini secara luas masih terkendala oleh biaya tinggi untuk infrastruktur dan operasional, serta tantangan dalam memastikan penyimpanan CO₂ yang aman dan permanen.

2.4. Teknologi Pendukung Sistem dan Desain Terpadu

Sistem multigenerasi (poligenerasi) adalah pendekatan yang mengintegrasikan berbagai fungsi energi dalam satu sistem

pembangkit yang sama, yang tidak hanya menghasilkan daya listrik, tetapi juga memenuhi kebutuhan pemanasan, pendinginan, dan desalinasi air. Sistem poligenerasi memanfaatkan energi yang dihasilkan dalam proses pembangkit untuk aplikasi lain, seperti pemanasan bangunan atau pengolahan air laut menjadi air tawar. Dengan demikian, sistem ini meningkatkan efisiensi energi keseluruhan dan mengurangi pemborosan energi. Salah satu keunggulan utama dari sistem poligenerasi adalah efisiensi eksergi yang tinggi, yang menggambarkan sejauh mana energi yang dihasilkan dimanfaatkan secara efektif. Artinya, lebih banyak energi yang digunakan untuk tujuan yang berbeda tanpa banyak energi yang terbuang. Sistem ini juga berperan dalam mengurangi emisi CO₂ karena penggunaan energi yang lebih efisien mengurangi ketergantungan pada pembangkit berbahan bakar fosil. Penelitian menunjukkan bahwa sistem poligenerasi yang mengintegrasikan pembangkit listrik dan desalinasi dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 40% dibandingkan dengan sistem pembangkit yang tidak terintegrasi [10]. Pendekatan berbasis analisis siklus hidup atau Life Cycle Assessment (LCA) adalah metode yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan dari berbagai teknologi pembangkit listrik sepanjang seluruh siklus hidup mereka. LCA mengidentifikasi dan mengevaluasi dampak lingkungan dari setiap tahap dalam proses, mulai dari ekstraksi bahan baku, pembangunan, operasi, hingga penghentian atau dekomisioning pembangkit. Pendekatan ini memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang trade-off antara efisiensi termal dan dampak lingkungan yang mungkin tidak terlihat hanya dari segi teknis. Trade-off dalam konteks ini merujuk pada kompromi yang harus dilakukan antara dua aspek yang saling bertentangan, seperti kinerja teknis (misalnya, efisiensi termal yang tinggi) dan dampak lingkungan (seperti emisi gas rumah kaca atau penggunaan sumber daya). Sebagai contoh, teknologi superkritis dapat menawarkan efisiensi termal yang lebih

tinggi, namun penggunaan material canggih yang diperlukan dalam pembuatannya dapat meningkatkan jejak karbon di tahap produksi material tersebut. Dengan demikian, LCA membantu mengidentifikasi aspek-aspek yang mungkin meningkatkan efisiensi teknis tetapi menambah dampak negatif terhadap lingkungan, dan sebaliknya, memberikan pandangan menyeluruh tentang keberlanjutan teknologi tersebut [11]. Oleh karena itu, trade-off menjadi pertimbangan penting dalam memilih teknologi yang tidak hanya efisien dari sisi operasional tetapi juga ramah lingkungan sepanjang siklus hidupnya.

Pendekatan sistem holistik berfokus pada pentingnya integrasi berbagai teknologi dalam desain pembangkit listrik untuk mengoptimalkan manfaat dan mengurangi kekurangan masing-masing teknologi. Dalam pendekatan ini, berbagai teknologi pembangkit listrik seperti CSP-PV (Concentrated Solar Power - Photovoltaic) atau CFB (Circulating Fluidized Bed) dengan biomassa digabungkan untuk menciptakan sistem yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Misalnya, CSP mengumpulkan energi panas dari matahari dengan menggunakan cermin atau lensa untuk menghasilkan listrik, sementara PV (Photovoltaic) mengubah cahaya matahari langsung menjadi listrik menggunakan panel surya. Integrasi antara keduanya memungkinkan pembangkit listrik berfungsi lebih efisien sepanjang hari, karena CSP bekerja optimal saat intensitas matahari tinggi, sementara PV tetap beroperasi pada kondisi cahaya rendah atau saat cuaca mendung. Kombinasi ini tidak hanya meningkatkan keandalan sistem, tetapi juga mengurangi emisi CO₂ secara signifikan, karena mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Demikian pula, penggunaan teknologi CFB dengan biomassa mengurangi emisi polutan seperti NO_x dan SO_x, serta mengurangi jejak karbon dengan menggunakan biomassa sebagai bahan bakar alternatif, yang lebih ramah

lingkungan dibandingkan batu bara [12]. Pendekatan sistem holistik ini menunjukkan bahwa desain yang mengintegrasikan berbagai teknologi dapat memberikan solusi energi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis terhadap berbagai teknologi inovatif untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menunjukkan adanya potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi termal sekaligus memitigasi dampak lingkungan. Namun, setiap teknologi menghadirkan trade-off yang kompleks antara keunggulan teknis, biaya, dan jejak lingkungan. Upaya peningkatan efisiensi termal sendiri merupakan pilar utama dalam modernisasi PLTU, karena efisiensi yang lebih tinggi secara langsung mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi. Dalam hal ini, teknologi pembangkit superkritis dan ultra-superkritis (USC) menjadi standar emas, dengan kemampuan mencapai efisiensi termal netto hingga 45-47%, jauh melampaui pembangkit subkritis konvensional [13-14]. Peningkatan ini dicapai dengan operasi pada tekanan dan temperatur sangat tinggi, namun memerlukan material canggih yang jejak karbonnya selama fase manufaktur dan ekstraksi harus diperhitungkan. Sementara itu, pada sistem Concentrated Solar Power (CSP), pemanfaatan nanofluida sebagai fluida kerja terbukti meningkatkan laju perpindahan panas berkat konduktivitas termal yang lebih tinggi, yang berpotensi mengurangi biaya modal penukar panas. Akan tetapi, peningkatan viskositas menuntut daya pemompaan lebih besar, yang dapat meningkatkan konsumsi energi parasitik dan secara tidak langsung menambah emisi [15-16].

Di samping efisiensi, fokus utama lainnya adalah pengurangan emisi polutan dan jejak karbon. Salah satu strategi mitigasi pada sumbernya adalah melalui peningkatan kualitas bahan bakar, di mana teknik pemisahan gravitasi seperti jigging untuk

mencuci batu bara menunjukkan efektivitas tinggi dalam mengurangi kandungan sulfur dan abu sebelum pembakaran, sehingga langsung menekan emisi SO_x dan partikulat [18-20]. Pendekatan lain adalah co-firing biomassa, yang diakui sebagai salah satu jalur dekarbonisasi berbiaya rendah dengan memanfaatkan infrastruktur PLTU yang ada untuk menggantikan sebagian batu bara, sehingga mengurangi emisi CO₂ bersih [21-22]. Untuk mitigasi yang lebih mendalam, teknologi Oxy-fuel CFB (Circulating Fluidized Bed) menggunakan oksigen murni untuk pembakaran, menghasilkan gas buang yang didominasi CO₂ sehingga sangat menyederhanakan proses penangkapan karbon. Teknologi ini juga menekan pembentukan NO_x, meskipun biaya modal untuk unit pemisahan udara (Air Separation Unit) menjadi tantangan investasi awal yang besar [22-23].

Studi menunjukkan bahwa solusi paling efektif sering kali bukan berasal dari satu teknologi tunggal, melainkan dari integrasi beberapa sistem secara sinergis. Contohnya adalah integrasi CSP dan Photovoltaic (CSP-PV), yang menggabungkan keandalan CSP dengan penyimpanan energi termal dan efisiensi PV saat puncak matahari. Kombinasi ini mengatasi masalah intermitensi energi terbarukan dan memaksimalkan pemanfaatan energi surya sepanjang hari untuk menyediakan pasokan listrik yang stabil [19-20]. Demikian pula, pendekatan holistik seperti mengimplementasikan co-firing biomassa pada pembangkit USC akan memberikan manfaat ganda, yakni efisiensi termal superior dari USC sekaligus pengurangan emisi karbon dari biomassa. Hal ini menggarisbawahi pentingnya desain sistem yang mempertimbangkan berbagai aspek secara terpadu, tidak hanya fokus pada satu tujuan tunggal.

Mengingat setiap teknologi memiliki keunggulan dan kelemahan yang saling terkait, di mana solusi yang tampak bersih pada tahap operasional mungkin memiliki dampak signifikan pada tahap manufaktur, maka diperlukan sebuah kerangka evaluasi

yang menyeluruh. Di sinilah Life Cycle Assessment (LCA) memegang peran krusial. LCA bukan sekadar alat analisis tambahan, melainkan sebuah kerangka kerja analitis yang esensial untuk mengevaluasi dampak lingkungan secara holistik, mulai dari ekstraksi bahan mentah, manufaktur, operasional, hingga dekomisioning. Dengan LCA, para pengambil keputusan dapat secara kuantitatif membandingkan trade-off antara kinerja teknis, biaya ekonomi, dan dampak lingkungan dari berbagai skenario teknologi, memastikan bahwa jalur yang dipilih benar-benar mengarah pada sistem energi yang lebih berkelanjutan dalam jangka panjang [24-25].

4. Kesimpulan dan Saran

Inovasi teknologi memegang peranan penting dalam upaya meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi dampak lingkungan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Teknologi seperti co-firing biomassa, sistem poligenerasi, penggunaan nanofluida, dan penangkapan karbon (carbon capture) telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus menekan emisi gas rumah kaca. Selain itu, integrasi teknologi seperti CSP-PV dan kombinasi CFB dengan biomassa memiliki potensi besar dalam menciptakan pembangkit listrik yang lebih ramah lingkungan. Meski demikian, tantangan seperti tingginya biaya implementasi, kompleksitas teknologi, dan dampak lingkungan dari penggunaan material canggih masih menjadi kendala yang perlu segera diatasi.

Untuk menjawab tantangan tersebut, diperlukan langkah-langkah strategis guna mendukung transformasi PLTU menjadi lebih berkelanjutan. Pertama, pengembangan teknologi berkelanjutan perlu difokuskan pada peningkatan efisiensi operasional, penurunan biaya implementasi, dan inovasi material yang lebih ramah lingkungan. Penelitian lanjutan dibutuhkan untuk mengoptimalkan rantai pasokan biomassa serta menjadikan teknologi penangkapan karbon lebih terjangkau.

Kedua, kerangka kebijakan yang mendukung, seperti penerapan harga karbon, pemberian subsidi untuk teknologi bersih, serta insentif penggunaan energi terbarukan, harus diperkuat. Kebijakan ini dapat mendorong investasi dan mempercepat adopsi teknologi hijau.

Selain itu, kolaborasi lintas sektor antara akademisi, industri, dan pemerintah menjadi kunci dalam mengembangkan solusi terintegrasi, seperti pengelolaan limbah, pembangkitan listrik, dan penangkapan karbon. Pendekatan multidisiplin ini akan lebih efektif dalam mengatasi keterbatasan teknologi. Penggunaan metode analisis holistik seperti Life Cycle Assessment (LCA) dan analisis tekno-ekonomi juga perlu diterapkan untuk memastikan inovasi yang dihasilkan memberikan manfaat optimal dengan dampak lingkungan yang minimal. Terakhir, edukasi masyarakat tentang pentingnya transisi energi hijau dan manfaat dari teknologi ramah lingkungan harus ditingkatkan untuk mendapatkan dukungan publik yang lebih luas.

Langkah-langkah ini diharapkan dapat menjadi panduan dalam mengembangkan pembangkit listrik yang lebih ramah lingkungan serta mendukung transisi energi global menuju sistem yang lebih bersih dan berkelanjutan. Dengan penerapan teknologi inovatif dan dukungan kebijakan yang memadai, PLTU dapat menjadi bagian penting dari solusi energi hijau di masa depan.

Referensi

- [1] Conversano, A., Sogni, D., Lombardelli, G., di Bona, D., Viganò, F., & Consonni, S. (2024). Energy and environmental assessment of solid recovered fuels valorisation: Waste-to-Chemicals options vs co-combustion in cement plants. *Waste Management*, *190*, 432–442.
- [2] Costa, D., de Regel, S., Espadas-Aldana, G., Laget, H., Kishore, R., Meuret, Y., & Duerinckx, F. (2024). Environmental and economic impacts of photovoltaic integration in concentrated solar power plants. *Solar Energy*, *274*.
- [3] Gürbüz, E. Y., Güler, O. V., & Keçebaş, A. (2022). Environmental impact assessment of a real geothermal driven power plant with two-stage ORC using enhanced exergo-environmental analysis. *Renewable Energy*, *185*, 1110–1123.
- [4] Hosseini, S. M., Aslani, A., & Kasaeian, A. (2023). Life cycle cost and environmental assessment of CO₂ utilization in the beverage industry: A natural gas-fired power plant equipped with post-combustion CO₂ capture. *Energy Reports*, *9*, 414–436.
- [5] Mehtari, N., Kahani, M., & Zamen, M. (2023). Energy, environmental, and economic analysis of a new configuration multi-stage flash distillation unit coupled with steam power plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, *50*.
- [6] Panbechi, B., Hajinezhad, A., Yousefi, H., Moosavian, S. F., & 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*.
- [7] Pokson, C., & Chaiyat, N. (2024). Energy and environmental assessment of a novel multigeneration plant powered by infectious medical waste. *Sustainable Chemistry for the Environment*, *6*.
- [8] Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 161). Elsevier Ltd.

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
- [9] Romero-García, A. G., Mora-Morales, C., Chargoy-Amador, J. P., Ramírez-Corona, N., Sánchez-Ramírez, E., & Segovia-Hernández, J. G. (2022). Implementing CO2 capture process in power plants: Optimization procedure and environmental impact. *Chemical Engineering Research and Design*, 180, 232–242.
- [10] Win, S. Y., Opaprakasit, P., & Papong, S. (2023). Environmental and economic assessment of carbon capture and utilization at coal-fired power plant in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 414.
- [11] Yan, M., Zhang, Y., Chauhan, B. S., Siddiqui, M. R., Albani, A., & Tian, R. (2024). A comprehensive thermo-economic-environmental study of an eco-friendly process incorporated with a natural gas-fed combined power plant for a novel multigeneration application. *Journal of Cleaner Production*, 434(December 2023), 139959.
- [12] Achkari Begdouri, O., & el Fadar, A. (2023). Effectiveness of the use of nanofluids in concentrated solar power plants – Electrical and environmental assessment. *Renewable Energy Focus*, 45, 10–20.
- [13] Agbor, E., Zhang, X., & Kumar, A. (2014). A review of biomass co-firing in North America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 930-943.
- [14] Roni, M. S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., Lein, W., & Johnson, S. (2017). Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1089-1101.
- [15] Tamura, M., Gotou, T., Ishii, H., & Riechelmann, D. (2020). Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2 MW-thermal pulverised coal firing furnace. *Applied energy*, 277, 115580.
- [16] Weidmann, M., Honoré, D., Verbaere, V., Boutin, G., Grathwohl, S., Godard, G., ... & Scheffknecht, G. (2016). Experimental characterization of pulverized coal MILD flameless combustion from detailed measurements in a pilot-scale facility. *Combustion and Flame*, 168, 365-377.
- [17] Kim, M. W., Kim, G. M., & Jeon, C. H. (2024). Low-carbon fuel reburning for CO2 and NOx reduction in pulverized coal firing system. *Journal of the Energy Institute*, 114, 101638.
- [18] Dwari, R. K., & Rao, K. H. (2007). Dry beneficiation of coal—a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 28(3), 177-234.
- [19] Chen, Y., Tang, J., Li, H., Chen, J., Cui, Z., & Xu, Z. (2023). Recent Advances in Jigging Used for Mineral Separation. *Recent Patents on Engineering*, 17(5), 36-55.
- [20] Roni, M. S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., Lein, W., & Johnson, S. (2017). Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1089-1101.
- [21] Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Boardman, R. D., Yancey, N. A., & Sokhansanj, S. (2011). A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods. 2011 Louisville, Kentucky, August 7-10, 2011, 1.
- [22] Toftegaard, M. B., Brix, J., Jensen, P. A., Glarborg, P., & Jensen, A. D. (2010). Oxy-fuel combustion of solid

- fuels. *Progress in energy and combustion science*, 36(5), 581-625.
- [23] Normann, F., Andersson, K., Johnsson, F., & Leckner, B. (2011). NO_x reburning in oxy-fuel combustion: A comparison between solid and gaseous fuels. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, S120-S126.
- [24] Ju, X., Xu, C., Hu, Y., Han, X., Wei, G., & Du, X. (2017). A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161, 305-327.
- [25] Zhai, R., Chen, Y., Liu, H., Wu, H., & Yang, Y. (2018). Optimal Design Method of a Hybrid CSP-PV Plant Based on Genetic Algorithm Considering the Operation Strategy. *International Journal of Photoenergy*, 2018(1), 8380276.