

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tanggal 23 April 2016, Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia menandatangani Perjanjian Paris tentang Perubahan Iklim. Perjanjian ini mencakup berbagai ketentuan penting, seperti tujuan untuk membatasi kenaikan suhu global hingga 1,5°C atau di bawah 2°C, mendorong pencapaian emisi nol bersih dalam jangka panjang, kewajiban tindakan mitigasi domestik melalui *Nationally Determined Contributions* (NDC), serta kebutuhan evaluasi berkala untuk memastikan kepatuhan terhadap perjanjian utama tersebut (Indonesia, Pemerintah Pusat. 2016.).

Indonesia telah mengambil berbagai langkah untuk menurunkan emisi, termasuk di sektor energi melalui PP No. 79/2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Targetnya adalah mencapai 23% energi terbarukan pada 2025 dan 31% pada 2050 (Indonesia, Pemerintah Pusat. 2014). Namun, penerapan konversi energi surya di Indonesia menghadapi tantangan teknis dan ekonomi. Karena sifatnya yang *intermittent*, energi surya dapat mengganggu stabilitas jaringan. Solusi potensial adalah mengonversi energi surya menjadi energi termal dengan *Concentrating Solar Power* (CSP) dan mengintegrasikannya ke PLTU.

PLTU masih dominan karena biaya operasinya rendah, meski efisiensinya rata-rata, bahan bakar terbatas, dan emisinya tinggi. Integrasi panas surya dapat menjadi solusi potensial, mengatasi konflik antara PLTU dan teknologi CSP. Konsep ini disebut *Solar Aided Power Generation* (SAPG), sistem hibrida berbasis panas surya yang semakin diminati. (Qin et al., 2022)

Konsep integrasi ini pertama kali diusulkan oleh Zoschak dan Wu. (Li et al., 2022) Integrasi tenaga surya ke pembangkit listrik tenaga batu bara telah menarik perhatian signifikan karena potensinya dalam meningkatkan efisiensi, mengurangi emisi, dan menurunkan biaya operasional. Beberapa penelitian telah mengeksplorasi berbagai metode integrasi tenaga surya ke pembangkit listrik tenaga batu bara yang ada, menunjukkan manfaat dan kelayakan finansial dari sistem hibrida ini.

Shagdar et al. (2022) melakukan penilaian SAPG pada pembangkit listrik tenaga batu bara berkapasitas 300 MW. Dalam mode penghematan bahan bakar (*Fuel Save*), pembangkit tersebut dapat menghemat 8,82-ton batu bara per jam, sementara dalam mode peningkatan tenaga (*Power Boost*), dapat menghasilkan tambahan energi sebesar 20 MWh. Periode balik modal finansial untuk penerapan SAPG adalah 5,91 tahun. Wu dan Han (2023) dalam studi mereka mencapai efisiensi konversi panas surya menjadi listrik sebesar 37,1% dengan panas surya sebesar 54,45 MW, efisiensi tahunan 21,5%, dan biaya energi rata-rata sebesar \$0,129/kWh dengan memanfaatkan panas surya untuk memanaskan ulang uap dan menggantikan uap ekstraksi bertekanan tertinggi. Luas *aperture* optimal adalah 103.620 m², menghasilkan listrik surya tahunan sebesar 33,28 GWh.

Pada metode integrasi lain, Han et al. (2024) mempelajari sistem baru penghilangan NO_x berbasis surya untuk unit puncak 1000 MW yang beroperasi pada beban 50%. Sistem ini menggabungkan panas surya dengan *Selective Catalytic Reduction* (SCR) untuk menghilangkan NO_x. Sistem ini menghasilkan 14,6 MW tenaga surya dengan efisiensi 30,15%, meningkatkan suhu SCR de-NO_x, efisiensi penghilangan NO_x secara signifikan, dan menghasilkan manfaat tahunan bersih sebesar 24,01 juta CNY dengan biaya listrik rendah sebesar 0,56 CNY/kWh.

Han et al. (2024) dalam penelitian lain mengintegrasikan energi surya terkonsentrasi dan tidak terkonsentrasi untuk pengeringan lignit. Metode ini mencapai efisiensi konversi energi surya yang tinggi dan memanfaatkan sinar matahari secara efektif, khususnya sinar difus. Untuk unit dasar 600 MW, sistem ini meningkatkan output energi listrik sebesar 26,8 MWh dengan efisiensi konversi energi surya menjadi listrik sebesar 35,83%. Perangkat pengumpul surya tidak terkonsentrasi yang berbiaya rendah menunjukkan kinerja termal yang sangat baik. Pendapatan tahunan bersih sistem baru ini sebesar 63,45 juta CNY, dengan biaya listrik surya sebesar 0,346 CNY/kWh.

Melanjutkan pengembangan ini, penelitian yang dilakukan bertujuan menerapkan manfaat integrasi energi surya pada pembangkit listrik tenaga batu bara 115 MW di Kalimantan Tengah, Indonesia. Dengan memanfaatkan energi surya

untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pembangkit listrik. Penelitian ini berfokus pada skenario *retrofit* terbaik dengan mengganti turbin uap ekstraksi di pemanas air umpan No. 7. Langkah ini diharapkan mengoptimalkan konversi energi surya, mengurangi konsumsi batu bara, dan menurunkan emisi, sekaligus meningkatkan kinerja ekonomi dan lingkungan serta mendukung ketahanan energi regional.

1.2 Perumusan Masalah

Pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia penting untuk mendukung target menjaga kenaikan suhu global di bawah 1,5°C. Energi surya termal memiliki potensi besar, namun terkendala biaya tinggi dan sifatnya yang tidak stabil. Di sisi lain, PLTU yang menyuplai lebih dari 40% listrik dunia menjadi sumber emisi karbon terbesar.

Penelitian ini mengkaji kelayakan teknis dan ekonomi integrasi energi surya sebagai sumber panas tambahan pada PLTU di Kalimantan Tengah, dengan fokus pada:

1. Seberapa besar *retrofit* energi surya meningkatkan efisiensi, menurunkan konsumsi batu bara, dan mengurangi emisi?
2. Bagaimana kelayakan ekonominya?
3. Bagaimana kontribusinya dalam pengurangan emisi dan mendukung energi berkelanjutan di Indonesia?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan beberapa latar belakang dan perumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis Kinerja PLTU setelah integrasi energi surya pada berbagai kondisi operasional (VWO, TMCR, 75%, 50% *load*) menggunakan indikator seperti *efisiensi termal*, *specific steam consumption*, *specific fuel consumption*, dan *solar-to-power efficiency*.
2. Menilai Kelayakan Ekonomi integrasi energi surya melalui analisis *Simple*

Payback Period (SPP) dan *Levelized Cost of Energy (LCOE)*.

3. Mengevaluasi Potensi Pengurangan Emisi dan kontribusinya dalam mendukung komitmen Indonesia pada Perjanjian Paris.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk kalangan akademis, profesional, masyarakat umum, dan pembuat kebijakan, diantaranya:

1. Bagi Akademisi: Menambah wawasan ilmiah tentang integrasi energi surya pada PLTU sebagai solusi hemat biaya untuk meningkatkan produksi listrik dari energi terbarukan.
2. Bagi Profesional: Memberikan data kuantitatif tentang potensi pengurangan emisi gas rumah kaca melalui integrasi energi terbarukan.
3. Bagi Masyarakat Umum: Menyajikan gambaran kelayakan teknis dan ekonomi dari integrasi energi surya dengan PLTU.
4. Bagi Pembuat Kebijakan: Menjadi rekomendasi untuk mendorong pengembangan energi terbarukan melalui integrasi energi surya pada PLTU di Indonesia.

1.5 Originalitas Penelitian

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan bagaimana upaya *retrofitting* energi surya dalam pembangkit listrik yang sudah ada. Ringkasan penelitian sebelumnya dapat dilihat dalam tabel 1. 1 berikut:

Tabel 1. 1 Ringkasan penelitian terdahulu

No.	Peneliti/tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
1.	Yongjing , <i>et al</i> (2022).	<i>Performance study of solar tower aided supercritical CO2 coal-fired power generation system with different schemes.</i>	Penelitian ini mengusulkan tiga skema integrasi energi surya pada pembangkit listrik batu bara S-CO2 300 MW, dengan penggunaan energi surya untuk menggantikan beban panas di berbagai komponen (recuperator suhu rendah, superheated, dan reheated). Hasil menunjukkan bahwa semua skema meningkatkan kinerja pembangkit, mengurangi konsumsi batu bara masing-masing sebesar 7,71 g/kWh, 9,95 g/kWh, dan 10,54 g/kWh, serta menurunkan emisi CO2 dibandingkan sistem tradisional.	Penelitian Yongjing, <i>et al.</i> (2022) melakukan analisa integrasi energi surya dengan pembangkit listrik batubara supercritical S-CO2 dengan kapasitas 300 MW sedangkan pada penelitian ini menggunakan parameter pada pembangkit listrik batubara subcritical 2x100 MW
2.	Warrick , <i>et al</i> (2013).	<i>A comparison of solar aided power generation (SAPG) and stand-alone concentrating solar power (CSP): A South African case study.</i>	Peneliti mensimulasikan pembangkit SAPG menggunakan data cuaca di Lephalale, Afrika Selatan, dan membandingkannya dengan pembangkit CSP di Upington. Dengan kolektor surya parabolic trough yang sama, SAPG menghasilkan listrik tahunan 25% lebih banyak dan 1,8 kali lebih hemat biaya	Penelitian Warrick, <i>et al.</i> (2013) melakukan simulasi hibridisasi energi surya dan PLTU dengan menggunakan data cuaca di Lephalae, Afrika Selatan. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan data cuaca di Kalimantan Tengah, Indonesia

			karena biaya konstruksinya hanya 72% dari CSP.	
3.	Prosin, et al. (2015)	<i>Hybrid solar and coal-fired steam power plant with air preheating using a centrifugal solid particle receiver</i>	Penelitian ini mengkaji hibridisasi energi surya pada pembangkit listrik tenaga uap berbasis boiler menggunakan sistem CST baru berbasis <i>solid particle receiver</i> (SPR). Metode pemanasan udara pembakaran ini meningkatkan kontribusi tenaga surya, efisiensi konversi surya ke listrik, dan penghematan bahan bakar berkat suhu operasi dan penyimpanan termal SPR yang lebih tinggi. Hasil menunjukkan bahwa metode ini lebih efisien dibandingkan hibridisasi lain, seperti <i>turbine bleed steam</i> (TBS), yang justru menurunkan efisiensi siklus daya.	Penelitian Prosin, et al. (2015) menggunakan <i>centrifugal solid particle receiver</i> untuk mengkonversikan energi surya sedangkan pada penelitian ini menggunakan <i>parabolic trough collector</i>
4.	Enkhbayar, et al. (2020)	<i>Performance analysis and techno-economic evaluation of 300 MW solar-assisted power generation system in the whole operation conditions.</i>	Penelitian ini menganalisis integrasi energi matahari dengan PLTU batubara 300 MW menggunakan kolektor <i>parabolic trough</i> untuk menggantikan <i>high-pressure heater</i> (HPH#1). Studi membandingkan mode operasi hemat bahan bakar (FS) dan	Penelitian Enkhbayar, et al (2020) melakukan analisa performa dan evaluasi tekno-ekonomi pada pembangkit listrik batubara SAPG 300 MW dengan integrasi mengganti <i>high pressure heater</i> (HPH#1) dengan medan surya

			peningkatan daya (PB). Hasil menunjukkan pengurangan konsumsi uap spesifik 0,19 kg/kWh, konsumsi panas spesifik 391 kJ/kWh, dan konsumsi bahan bakar ekuivalen spesifik 14,92 g/kWh. Pada mode FS, konsumsi batubara turun 8,82 ton/jam, sedangkan mode PB meningkatkan output energi 20 MW/jam. Pengurangan tahunan batubara dan emisi CO₂ masing-masing mencapai 32.150-ton dan 47.030 ton. Analisis ekonomi mencatat payback period 5,91 tahun dan LCOE 0,13 USD/kWh, menunjukkan kontribusi signifikan sistem terhadap efisiensi dan pengurangan emisi.	<i>parabolic trough collector</i> pada penelitian ini analisis dilakukan pada model pembangkit listrik SAPG batubara 2x100 MW
5.	Li, et al. (2020)	<i>Thermodynamic performance of a novel solar tower aided coal-fired power system.</i>	Penelitian ini mengusulkan integrasi energi surya pada reheater PLTU batubara dalam sistem STACP untuk meningkatkan efisiensi siklus regeneratif. Analisis termodinamika, lingkungan, dan ekonomi dilakukan pada mode peningkatan daya (PB) dan hemat bahan bakar (FS). Pada PLTU 300	Penelitian Li, et al (2020) melakukan simulasi hibridisasi energi surya dengan PLTU batubara 300 MW dengan integrasi pada <i>reheater</i> pada uap keluaran turbin dengan energi matahari sedangkan pada penelitian ini melakukan integrasi dengan menggantikan uap ekstraksi untuk <i>high</i>

			MWe, energi surya yang digunakan dalam mode PB dan FS masing-masing mencapai 81,82 MW dan 71,69 MW. Konsumsi batubara berkurang 35,98 g/kWh (PB) dan 34,99 g/kWh (FS), sementara emisi CO₂ turun 101,79 g/kWh (PB) dan 98,99 g/kWh (FS). Biaya tambahan lapangan surya mencapai 49,76 juta USD (PB) dan 43,60 juta USD (FS), dengan biaya listrik rata-rata 3,37 sen USD/kWh.	pressure heater (HPH) dengan energi surya
6.	Xu, <i>et al.</i> (2018)	<i>Energy, exergy and economic analyses of a novel solar-lignite hybrid power generation process using lignite pre-drying.</i>	Penelitian ini membahas pembangkit hibrid surya-batubara lignit dengan integrasi pra-pengeringan lignit menggunakan energi matahari dari flat-plate collector. Energi panas surya sebesar 57,1 MW meningkatkan nilai kalori lignit, efisiensi boiler, dan output listrik hingga 29,6 MW. Efisiensi energi dan eksergi naik masing-masing 0,5% dan 1,6%. Biaya listrik surya mencapai \$0,035/kWh, dengan potensi keuntungan tahunan \$36,4 juta, atau \$95,7 juta jika mempertimbangkan pengurangan emisi karbon dioksida.	Penelitian Xu, <i>et al.</i> (2018) melakukan simulasi hibridisasi energi surya dengan PLTU batubara lignit energi panas matahari yang dikumpulkan dari flat-plate collector kemudian dimanfaatkan untuk proses pra-pengeringan menggunakan udara sebagai media pengeringan. Sedangkan pada penelitian ini melakukan integrasi dengan menggantikan uap ekstraksi untuk high pressure heater (HPH) dengan energi surya.

Penelitian sebelumnya membuktikan manfaat integrasi energi surya pada pembangkit konvensional. Namun, konsep ini belum diterapkan di PLTU Kalimantan Tengah, sehingga dampaknya terhadap kinerja, emisi, dan kelayakan ekonomi belum diketahui. Penelitian ini mengeksplorasi potensi kontribusinya terhadap ketahanan energi dan target lingkungan di wilayah tersebut.



BAB II

