

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara masih menjadi tulang punggung utama penyediaan energi listrik di Indonesia. Berdasarkan data Kementerian ESDM (2022), terdapat sedikitnya 253 unit PLTU yang tersebar di seluruh nusantara dengan kontribusi lebih dari 60% pasokan listrik nasional. Ketergantungan yang besar terhadap PLTU terjadi karena batubara masih dianggap sumber energi termurah, ketersediaannya melimpah, serta teknologi pembangkitnya telah mapan. Dalam proyek strategis nasional 35.000 MW yang dicanangkan oleh PLN, PLTU berperan sentral dalam mengejar target pertumbuhan pasokan listrik 7,5–10,5% per tahun, sejalan dengan proyeksi pertumbuhan ekonomi 5–7% per tahun. Namun, di tengah posisi strategisnya ini, PLTU Indonesia menghadapi tantangan serius dalam menjaga efisiensi operasionalnya, terutama terkait sistem pendinginan dan kondensor yang sangat bergantung pada kondisi suhu lingkungan perairan.

Sebagian besar PLTU Indonesia masih menggunakan teknologi *subcritical* dan *supercritical*, dengan rata-rata efisiensi termal hanya berkisar antara 30–40%. Angka ini jauh tertinggal dari teknologi *Ultra Supercritical* (USC) yang mampu mencapai efisiensi di atas 45% dengan tekanan operasi 254–357 bar dan temperatur uap utama mencapai 600–700 °C. Teknologi USC bekerja dengan prinsip termodinamika tekanan dan temperatur tinggi, sehingga konsumsi batubara per kWh menjadi lebih rendah dibandingkan pembangkit konvensional. Namun, keunggulan efisiensi ini sangat bergantung pada kemampuan sistem kondensor untuk menjaga tekanan vakum yang rendah dan stabil. Kondensor berperan mengubah uap bekas ekspansi turbin menjadi air kondensat, sehingga menciptakan kevakuman pada sisi buang turbin. Kevakuman yang tinggi memungkinkan turbin mengekstrak energi secara maksimal. Gangguan kecil pada sistem kondensor, khususnya akibat kenaikan temperatur air pendingin (*Cooling Water Inlet Temperature/CWIT*), dapat menyebabkan peningkatan tekanan buang

(*backpressure*), penurunan efisiensi ekspansi turbin, dan pada akhirnya penurunan efisiensi keseluruhan pembangkit.

Sistem pendinginan PLTU di Indonesia umumnya menggunakan air laut sebagai media utama karena ketersediaannya yang besar, terutama untuk PLTU pesisir berskala besar. Namun, suhu air laut sangat dipengaruhi oleh musim, waktu harian, lokasi geografis, dan fenomena iklim global seperti El Niño dan pemanasan laut jangka panjang. Kenaikan suhu air laut, walaupun hanya 1–3 °C dari kondisi desain, dapat mengganggu keseimbangan termal kondensor. Hal ini terjadi karena perbedaan temperatur antara uap turbin dan air pendingin (LMTD atau *Log Mean Temperature Difference*) menyusut, sehingga koefisien perpindahan panas menurun. Akibatnya, laju kondensasi melambat, tekanan vakum menurun, dan *backpressure* meningkat. Secara teknis, setiap kenaikan CWIT sebesar 1 °C dapat meningkatkan *Net Plant Heat Rate* (NPHR) sekitar 0,2–0,3%, tergantung kapasitas unit dan desain kondensor. Dalam unit berkapasitas besar (600–1000 MW), deviasi kecil ini dapat menyebabkan peningkatan konsumsi batubara dalam jumlah signifikan.

Permasalahan semakin kompleks karena PLTU-PLTU modern seperti Jawa-7 (2×1050 MW USC) dirancang dengan kondisi acuan operasi (*boundary condition*) yang sangat spesifik, misalnya CWIT $29,2 \pm 0,24$ °C, suhu udara 26,9 °C, kelembapan relatif 81%, tekanan barometrik 1010,6 hPa, dan elevasi 1,8 m di atas permukaan laut. Seluruh kinerja jaminan (*guaranteed performance*) seperti net output 991 MW/unit dan net heat rate 2199,1 kcal/kWh dihitung berdasarkan kondisi ini. Namun, dalam kenyataannya, kondisi aktual operasi sering kali menyimpang akibat perubahan suhu air laut, terutama pada musim kemarau atau fenomena pemanasan laut. Penyimpangan beberapa derajat saja dapat menyebabkan *compliance gap* (selisih kinerja) yang signifikan antara hasil aktual dan nilai jaminan pabrikan. Selisih ini berdampak langsung pada peningkatan biaya bahan bakar, turunnya daya netto yang dapat dijual ke jaringan PLN, serta menurunnya efisiensi ekonomi pembangkit.

Masalah yang diteliti dalam kajian ini dapat dirumuskan ke dalam beberapa poin utama sebagai berikut: 1) meningkatnya temperatur air pendingin

masuk kondensor (Cooling Water Inlet Temperature/CWIT) pada PLTU berbahan bakar batubara di Indonesia akibat pengaruh musim, variabilitas harian, lokasi geografis, serta fenomena pemanasan laut, yang menyebabkan terganggunya proses kondensasi uap buang turbin; 2) menurunnya kemampuan kondensor dalam mempertahankan tekanan vakum yang rendah dan stabil ketika CWIT menyimpang dari kondisi desain, sehingga meningkatkan backpressure turbin dan menurunkan efisiensi ekspansi uap; 3) terjadinya peningkatan Net Plant Heat Rate dan konsumsi batubara sebagai konsekuensi langsung dari penurunan kinerja termal pembangkit, khususnya pada unit berkapasitas besar dengan teknologi supercritical dan Ultra Supercritical; 4) munculnya compliance gap antara kinerja aktual operasi dan nilai jaminan pabrikaan akibat ketidaksesuaian kondisi lingkungan aktual dengan boundary condition desain, yang berdampak pada penurunan daya netto terjual serta memburuknya efisiensi ekonomi dan keandalan operasi PLTU.

Penelitian terdahulu memperkuat temuan tersebut. Teguh NH dkk. (2021) menunjukkan bahwa pada PLTU 50 MW, kenaikan suhu air laut sebesar 2,5 °C menyebabkan penurunan efisiensi sebesar 0,33% dan peningkatan biaya operasi sekitar Rp 20,3 juta per hari. Untuk pembangkit besar, dampaknya jauh lebih besar. Sebagai ilustrasi kasar, pada PLTU 1000 MW dengan heat rate sekitar 2200 kcal/kWh, peningkatan heat rate 0,3% akibat kenaikan CWIT 1 °C bisa berarti tambahan konsumsi batubara sekitar 300–500 ton per hari, tergantung kualitas batubara. Dengan harga batubara domestik yang terus meningkat, kerugian ekonomi tahunan dapat mencapai puluhan hingga ratusan miliar rupiah hanya akibat deviasi suhu air pendingin.

Dampak kenaikan CWIT tidak hanya terbatas pada masalah termodinamika, tetapi juga merambat pada peningkatan auxiliary load. Demi menjaga kapasitas pendinginan, pompa air pendingin harus beroperasi dengan daya lebih tinggi. Beban internal ini semakin diperparah oleh konsumsi listrik dari unit pengendali lingkungan seperti FGD dan ESP, yang secara akumulatif menurunkan pasokan daya netto ke jaringan. Sinergi negatif antara penurunan efisiensi dan lonjakan pemakaian listrik internal ini secara langsung menaikkan

Biaya Pokok Produksi (BPP) listrik. Karena komponen bahan bakar mendominasi hingga 70–80% BPP PLTU, kenaikan heat rate sebesar 1% akan berdampak signifikan pada pembengkakan biaya operasional bulanan hingga skala miliaran rupiah..

Permasalahan ini kian mendesak akibat tren kenaikan suhu permukaan laut di Indonesia yang mencapai 0,2–0,4 °C per dekade berdasarkan data BMKG dan IPCC. Akibatnya, desain termal PLTU dari dekade lalu tidak lagi kompatibel dengan kondisi operasi aktual. Tanpa mitigasi dan adaptasi, penyimpangan suhu pendingin ini akan terus mendegradasi efisiensi dan membengkakkan biaya operasi tahunan. Lebih jauh lagi, kondisi ini berpotensi mengganggu keandalan sistem ketenagalistrikan nasional, menipiskan margin cadangan daya, dan mengancam stabilitas finansial PLN di tengah bergulirnya transisi energi serta target pengurangan emisi global.

1.2 Perumusan Masalah

Kenaikan suhu air pendingin laut (*Cooling Water Inlet Temperature/CWIT*) dari kondisi desain dapat memengaruhi sistem kondensor, menurunkan efisiensi termal, serta meningkatkan biaya operasi PLTU batubara berskala besar. Perubahan ini berdampak langsung pada performa turbin, parameter perpindahan panas, serta deviasi terhadap kinerja jaminan pabrikan. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah kenaikan suhu air pendingin laut (*Cooling Water Inlet Temperature/CWIT*) dari kondisi desain menyebabkan perubahan kinerja sistem kondensor dan peningkatan tekanan buang turbin?
2. Bagaimana dampak perubahan suhu air pendingin terhadap efisiensi termal PLTU dan *Net Plant Heat Rate* (NPHR)?
3. Seberapa besar deviasi kinerja aktual terhadap nilai jaminan pabrikan (*guaranteed performance*) akibat kenaikan suhu air laut?
4. Berapa besar dampak ekonomi dari kenaikan suhu air pendingin terhadap biaya operasi dan kehilangan daya jual?

5. Strategi teknis apa yang dapat diterapkan untuk meminimalkan kerugian efisiensi dan biaya akibat kenaikan suhu air pendingin laut?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara teknis dan kuantitatif dampak kenaikan suhu air pendingin laut terhadap kinerja termal dan ekonomi PLTU batubara berskala besar. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh kenaikan suhu air pendingin laut (CWIT) dari kondisi desain terhadap perubahan kinerja sistem kondensor dan tekanan buang turbin.
2. Mengevaluasi dampak perubahan suhu air pendingin laut terhadap efisiensi termal PLTU dan Net Plant Heat Rate (NPHR).
3. Menganalisis besarnya deviasi kinerja aktual pembangkit terhadap nilai jaminan pabrikan (guaranteed performance) akibat kenaikan suhu air pendingin laut.
4. Menganalisis implikasi ekonomi yang ditimbulkan oleh kenaikan suhu air pendingin laut terhadap biaya operasi pembangkit dan potensi kehilangan daya jual.
5. Merumuskan strategi teknis operasional yang dapat diterapkan untuk meminimalkan penurunan efisiensi dan peningkatan biaya akibat kenaikan suhu air pendingin laut.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat dari sisi akademis dan manfaat praktis. Manfaat praktis penelitian ini terdiri dari manfaat operasional dan manfaat ekonomi bagi Perusahaan. Detail manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademik/Teoretis

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan kajian sistem termal PLTU dengan memperjelas hubungan antara kenaikan CWIT, kinerja kondensor, efisiensi termal, dan NPHR. Hasilnya dapat menjadi referensi

ilmiah untuk penelitian lanjutan terkait optimasi sistem pendinginan dan dampak perubahan iklim terhadap kinerja pembangkit.

2. Manfaat Teknis/Operasional

Penelitian ini memberikan informasi kuantitatif yang membantu mengidentifikasi sumber penurunan efisiensi akibat kenaikan CWIT serta mendukung penerapan langkah mitigasi operasional, seperti optimasi debit pendingin dan pembersihan kondensor, guna menjaga performa unit saat kondisi lingkungan berubah.

3. Manfaat Ekonomi dan Strategis

Penelitian ini memberikan gambaran kerugian ekonomi akibat kenaikan CWIT melalui perhitungan *fuel cost penalty* dan *opportunity loss*, serta menjadi dasar pertimbangan manajemen dalam perencanaan efisiensi biaya, pengendalian BPP listrik, dan strategi adaptasi jangka panjang terhadap perubahan suhu laut.

1.5 Originalitas Penelitian

Originalitas penelitian merupakan hasil perbaikan dari gap penelitian terdahulu. Beberapa penelitian terdahulu yang menjadi rujukan penelitian ini seperti pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 State of The Art Research

No.	Peneliti/ tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analisis
1.	Teguh NH, dll. (2021)	<i>Effect of Seawater Temperature Rising to the Performance of Norther Gorontalo Small Scale Power Plant</i>	Hasil penelitian mengindikasikan bahwa variasi temperatur air laut memengaruhi performa PLTU secara signifikan. Pada PLTU berkapasitas 50 MW, kondisi tersebut berpotensi	Penelitian menjelaskan pengaruh tersebut dalam pembangkit dengan skala kecil Peneliti akan mencoba dengan kapasitas

No.	Peneliti/ tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analisis
			meningkatkan biaya operasi hingga Rp20,3 juta per hari.	pembangkit USC 1050 MW.

No.	Peneliti/ tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analisis
2	M. Djazim Syaifullah (2015)	Suhu Permukaan Laut Perairan Indonesia dan Hubungannya dengan Pemanasan Global	Dengan menggunakan dua cara analisis yaitu analisis temporal dan analisis spasial, didapatkan hasil bahwa selama 32 tahun telah terjadi peningkatan suhu permukaan lautan di wilayah Indonesia yang bervariasi antara +2.5 C dan -3 C di wilayah perairan Indonesia.	impact yang terjadi akibat dari peningkatan suhu air laut yang telah mengalami kenaikan terhadap efisiensi PLTU USC.
3	Atoni, H Kisman, dkk (2015)	Pengaruh Variasi Temperatur Air Pendingin Kondensor Terhadap Tekanan Pada Beban Tetap	Variasi temperatur air pendingin kondensor memengaruhi daya keluaran turbin. Peningkatan temperatur air pendingin meningkatkan temperatur kondensasi dan tekanan balik turbin sehingga daya output menurun, sedangkan penurunan temperatur air pendingin	Data temperatur air pendingin masuk kondensor diperoleh dari sistem Distributed Control System (DCS) dan digunakan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap daya keluaran turbin serta efisiensi

			meningkatkan daya output turbin.	PLTU USC.
4	Pattanayak et al. (2019)	<i>Thermal performance assessment of steam surface condenser in coal-fired power plant</i>	Studi ini melakukan pemodelan dan validasi lapangan pada PLTU berkapasitas 210 MW. Hasilnya menunjukkan bahwa kenaikan 1 °C pada temperatur air pendingin menyebabkan peningkatan tekanan kondensor sekitar 0,59 kPa, peningkatan heat rate sebesar 0,36%, dan penurunan daya bersih sekitar 33 MW. Penelitian ini secara kuantitatif menjelaskan hubungan antara CWIT, laju aliran air pendingin, efektivitas kondensor, dan kinerja pembangkit.	Penelitian ini berfokus pada PLTU subcritical skala menengah sehingga hasilnya belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik termodinamika PLTU USC berkapasitas besar. Selain itu, pengaruh variabilitas suhu dan salinitas air laut, penormalan terhadap kondisi desain (boundary condition), serta analisis penalti ekonomi akibat deviasi CWIT belum dikaji. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk mengevaluasi hubungan CWIT dengan deviasi kinerja terhadap guaranteed performance dan dampak

				ekonominya pada PLTU USC 1050 MW.
5	Abdulateef (2023)	<i>Evaluating the Thermal Performance of Steam Condenser Heat Exchanger in a Coal-Fired Power Plant System</i>	Penelitian menunjukkan bahwa CWIT dan laju aliran air pendingin berpengaruh signifikan terhadap tekanan kondensor dan kinerja perpindahan panas. Peningkatan laju aliran air pendingin dapat memperbaiki kevakuman dan menurunkan tekanan kondensor, namun laju yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan efektivitas perpindahan panas akibat berkurangnya Log Mean Temperature Difference (LMTD).	Penelitian ini berfokus pada aspek termal dan hidrodinamika kondensor tanpa mengkaji pengaruhnya terhadap efisiensi siklus, NPHR, dan daya netto pembangkit. Selain itu, konsumsi daya bantu pompa air pendingin belum diperhitungkan, sehingga evaluasi efisiensi bersih dan dampak ekonominya belum komprehensif. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang mengintegrasikan performa kondensor, kebutuhan energi tambahan, dan perubahan heat rate, khususnya pada sistem pendingin air laut

				berskala besar.
6	Kurniawati et al. (2020)	<i>Analysis of the effect of cooling water condenser to power plant cycle using Cycle-Tempo</i>	Studi ini melakukan simulasi pada PLTU 350 MW untuk mengevaluasi dampak perubahan temperatur air pendingin terhadap siklus termal pembangkit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur air pendingin meningkatkan tekanan kondensor dan menurunkan efisiensi siklus secara signifikan. Sebagai solusi, direkomendasikan penambahan debit air pendingin sebesar 15–21% untuk setiap kenaikan temperatur 1 °C guna mempertahankan efisiensi sistem pada level mendekati kondisi awal.	Meskipun memberikan informasi penting terkait hubungan antara CWIT dan kinerja siklus, penelitian ini masih terbatas pada analisis simulasi dan pada unit non-USC. Variabel operasional nyata, seperti daya bantu pompa pendingin, deviasi efisiensi aktual, dan dampak biaya operasional, belum dimasukkan. Selain itu, pendekatan ini belum mengaitkan hasil simulasi dengan kondisi desain dan performa terjamin. Diperlukan kajian berbasis data operasi nyata untuk

				menghasilkan evaluasi teknis dan ekonomi yang lebih realistis pada PLTU berskala besar dengan pendingin air laut.
7	Ibrahim et al. (2022)	<i>Adverse Effects of Condenser Cooling Seawater Temperature Rise on Power Plant Performance</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa kenaikan CWIT sebesar 1 °C dapat menurunkan daya keluaran sebesar 0,41% dan efisiensi sebesar 0,16% pada sistem pendingin air laut. Kombinasi antara peningkatan suhu, fouling, dan salinitas dapat menyebabkan penurunan daya hingga 6–8% dan efisiensi hingga 2–3%. Studi ini menekankan pentingnya faktor kebersihan kondensor dan karakteristik air laut terhadap performa termal sistem.	Fokus penelitian ini adalah sistem pembangkit nuklir yang menggunakan air laut sebagai pendingin, sehingga karakteristiknya memiliki kesamaan dengan PLTU dalam hal proses kondensasi, tetapi berbeda dalam desain siklus termal dan kondisi operasional. Penelitian ini belum secara spesifik meneliti sistem PLTU USC dan belum mengintegrasikan pengaruh faktor lingkungan laut seperti fouling,

				variasi salinitas, dan kenaikan CWIT terhadap parameter desain dan performa aktual pembangkit besar. Kajian lanjutan diperlukan untuk memahami dampak gabungan faktor lingkungan terhadap deviasi performa dan penalti biaya pada sistem PLTU modern di wilayah tropis.
8	Wang et al. (2024)	<i>Research on enhancing power plant net power by OCWS operation optimization</i>	Penelitian ini mengembangkan metode optimasi operasi sistem pendingin terbuka (OCWS) pada PLTU 2×330 MW untuk memaksimalkan daya bersih melalui pengaturan laju pompa air pendingin dan tekanan backpressure. Pendekatan ini terbukti dapat meningkatkan efisiensi dan daya netto serta menurunkan konsumsi energi sistem	Studi ini berfokus pada strategi optimasi operasional, namun konteksnya adalah sistem air tawar pada unit kapasitas menengah. Aplikasi pada sistem pendingin air laut berskala besar dengan teknologi USC belum dibahas, padahal kondisi

			pendingin melalui pengaturan set point operasi yang optimal.	lingkungan laut memiliki dinamika yang berbeda, termasuk suhu, salinitas, dan beban fouling yang fluktuatif. Selain itu, penelitian ini belum mengintegrasikan hasil optimasi dengan analisis deviasi performa terhadap kondisi desain serta evaluasi dampak ekonomi jangka panjang akibat variasi CWIT dan konsumsi daya bantu.
--	--	--	---	---