

Evaluasi Overhaul terhadap Efisiensi Boiler Unit 1 PLTU Banjarsari

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Alif Adiyanto³

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Email: eriprabowo@itpln.ac.id, Trassanda2410505@ITPLN.AC.ID, alifadiyanto234@gmail.com

Abstract

The boiler is a major component in a steam power plant because it converts feedwater into high-pressure and high-temperature steam for turbine operation. Boiler efficiency decreases when heat-transfer surfaces are dirty, combustion support equipment is not optimal, or operating instruments are inaccurate. This article evaluates the effect of overhaul on Boiler Unit 1 at PLTU Banjarsari using performance-test data at 125 MW. Two calculation approaches are used: the direct method and the indirect or heat-loss method. The direct-method efficiency increased from 67.65% before overhaul to 70.05% after overhaul, indicating a 2.40 percentage-point improvement. The indirect-method efficiency increased from 83.55% to 87.21%, indicating a 3.66 percentage-point improvement. The most relevant technical improvements were cleaning of boiler tubes, repair of a leaking superheater drain pipe, and calibration of the feedwater flow meter. The dry flue-gas loss decreased from 5.034% to 2.765%, while specific coal consumption decreased from 0.611 kg/kWh to 0.590 kg/kWh. These results show that overhaul improves heat utilization and supports more economical boiler operation.

Keywords: boiler efficiency; overhaul; direct method; indirect method; heat loss; specific coal consumption

Abstrak

Boiler merupakan komponen utama PLTU karena berfungsi mengubah air pengisi menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi untuk menggerakkan turbin. Efisiensi boiler dapat menurun apabila permukaan perpindahan panas kotor, peralatan bantu pembakaran tidak optimal, atau instrumen operasi tidak akurat. Artikel ini mengevaluasi pengaruh overhaul terhadap Boiler Unit 1 PLTU Banjarsari menggunakan data performance test pada beban 125 MW. Perhitungan dilakukan dengan metode direct dan metode indirect atau heat loss. Efisiensi metode direct meningkat dari 67,65% sebelum overhaul menjadi 70,05% sesudah overhaul, sehingga terjadi kenaikan 2,40 poin persentase. Efisiensi metode indirect meningkat dari 83,55% menjadi 87,21%, sehingga terjadi kenaikan 3,66 poin persentase. Perbaikan teknis yang paling relevan adalah pembersihan tube boiler, perbaikan kebocoran pipa drain superheater, dan kalibrasi flow meter feedwater. Kehilangan panas gas buang kering turun dari 5,034% menjadi 2,765%, sedangkan specific coal consumption turun dari 0,611 kg/kWh menjadi 0,590 kg/kWh. Hasil ini menunjukkan bahwa overhaul mampu meningkatkan pemanfaatan panas dan mendukung operasi boiler yang lebih ekonomis.

Kata kunci: efisiensi boiler; overhaul; metode direct; metode indirect; heat loss; specific coal consumption

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sistem konversi energi termal yang banyak digunakan karena mampu menghasilkan daya listrik besar dengan bahan bakar batubara [1-5]. Pada PLTU, energi kimia bahan bakar diubah menjadi energi panas melalui proses pembakaran di furnace boiler. Panas tersebut diserap oleh air pengisi, kemudian menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin dan generator. Oleh karena itu, performa boiler sangat menentukan efisiensi pembangkitan secara keseluruhan [1,2,4]. Boiler Unit 1 PLTU Banjarsari beroperasi pada sistem pembangkit batubara berkapasitas besar. Pada operasi jangka panjang, kondisi boiler dapat mengalami penurunan akibat deposit pada tube, penurunan efektivitas perpindahan panas, kebocoran pada jalur uap atau drain, ketidakakuratan flow meter, dan perubahan karakteristik bahan bakar [6,8-13]. Penurunan performa tersebut dapat meningkatkan rugi panas, menurunkan temperatur main steam, menaikkan konsumsi batubara, serta menurunkan efisiensi boiler [7,9-14].

Overhaul dilakukan sebagai kegiatan pemeliharaan besar yang mencakup pemeriksaan, perbaikan, pembersihan, penggantian komponen, dan pengujian peralatan untuk memulihkan kinerja pembangkit [6,8,13].

Pada Boiler Unit 1 PLTU Banjarsari, pekerjaan overhaul meliputi identifikasi valve passing menggunakan thermography, lapping atau penggantian periodic blowdown valve, penggantian pipa drain superheater yang bocor, kalibrasi flow meter feedwater, serta kalibrasi dan setting safety valve pada main steam dan cold reheat [8]. Kegiatan tersebut diarahkan untuk mengembalikan kondisi peralatan mendekati kondisi desain dan memperbaiki pemanfaatan panas boiler [1,7,12,13]. Skripsi asal berjudul "Pengaruh Overhaul Terhadap Efisiensi Boiler Di Unit 1 PLTU Banjarsari" [8]. Untuk kebutuhan submit jurnal, artikel ini menggunakan judul yang berbeda tetapi tetap mempertahankan objek dan variabel penelitian. Fokus artikel diarahkan pada evaluasi kuantitatif efisiensi boiler sebelum dan sesudah overhaul dengan metode direct, metode indirect, komponen heat loss, dan specific coal consumption, sebagaimana umum digunakan dalam evaluasi performa boiler dan operasi pembangkit termal [7,10-15].

2. Metode Penelitian

2.1. Objek dan Data Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berdasarkan data operasi Boiler Unit 1 PLTU Banjarsari pada kondisi sebelum dan sesudah overhaul. Data diambil pada beban 125 MW sehingga perbandingan dilakukan pada kondisi pembebanan yang setara. Data yang digunakan meliputi parameter operasi, analisis batubara, kandungan gas buang, nilai kalor, coal flow, temperatur gas buang, temperatur lingkungan, ABMA loss, serta hasil perhitungan specific coal consumption.

Tabel 1. Data performance test sebelum dan sesudah overhaul

Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah
Beban unit	MW	125	125
Ambient temperature	degC	33,575	33,000
Average flue gas temperature	degC	137,75	133,73
Coal flow	t/h	76,39	73,75
CO ₂ in flue gas	%	3,245	8,07
CO in flue gas	%	0,001	0,001
O ₂ in flue gas	%	2,8	3,42
GCV coal	kcal/kg	4711,52	4556
Make up water	t/h	15,14	11,90
ABMA	%	0,33	0,33

Tabel 1 memperlihatkan penurunan coal flow dari 76,39 t/h menjadi 73,75 t/h pada beban yang sama. Temperatur gas buang rata-rata turun dari 137,75 degC menjadi 133,73 degC, sehingga panas yang terbuang melalui stack berkurang. Walaupun nilai kalor batubara setelah overhaul lebih rendah, yaitu dari 4711,52 kcal/kg menjadi 4556 kcal/kg, konsumsi batubara tetap menurun. Hal ini menunjukkan bahwa perbaikan kondisi boiler berperan terhadap pemanfaatan panas yang lebih baik.

2.2. Rumus Perhitungan

Metode direct menghitung efisiensi dari rasio antara energi berguna pada uap terhadap energi bahan bakar. Metode indirect menghitung efisiensi dengan mengurangkan total rugi panas dari 100%. Metode indirect lebih informatif karena dapat menunjukkan sumber kerugian panas, misalnya gas buang kering, moisture akibat hidrogen, moisture batubara, moisture udara, pembakaran tidak sempurna, serta rugi radiasi dan konveksi.

$$\text{eta}_d = [G_{ms} \times (h_g - h_f)] / [G_{fuel} \times \text{GCV}] \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{eta}_i = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6) \quad (2)$$

$$(O_2)t = 11,6C + 34,8(H_2 - O_2/8) + 4,35S \quad (3)$$

$$EA = O_2 / (21 - O_2) \times 100\% \quad (4)$$

$$SCC = \text{coal flow} / \text{gross power} \quad (5)$$

Pada persamaan tersebut, eta_d adalah efisiensi metode direct, eta_i adalah efisiensi metode indirect, G_{ms} adalah laju aliran main steam, h_g adalah entalpi main steam, h_f adalah entalpi feedwater, G_{fuel} adalah laju bahan bakar, GCV adalah gross calorific value, L1 sampai L6 adalah komponen kehilangan panas, EA adalah excess air, dan SCC adalah specific coal consumption. Rumus ditulis ringkas dan bernomor agar mudah dibaca dalam format Microsoft Word.

2.3. Tahapan Analisis

Tahapan analisis dimulai dari penyusunan data operasi sebelum dan sesudah overhaul, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan efisiensi metode direct. Tahap berikutnya adalah perhitungan udara teoritis, excess air, massa gas buang, heat loss L1 sampai L6, serta efisiensi metode indirect. Setelah itu dilakukan evaluasi perubahan nilai kalor batubara, coal flow, SCC, temperatur main steam, dan pengaruh kegiatan overhaul terhadap perbaikan kinerja boiler.

3. Hasil dan Pembahasan

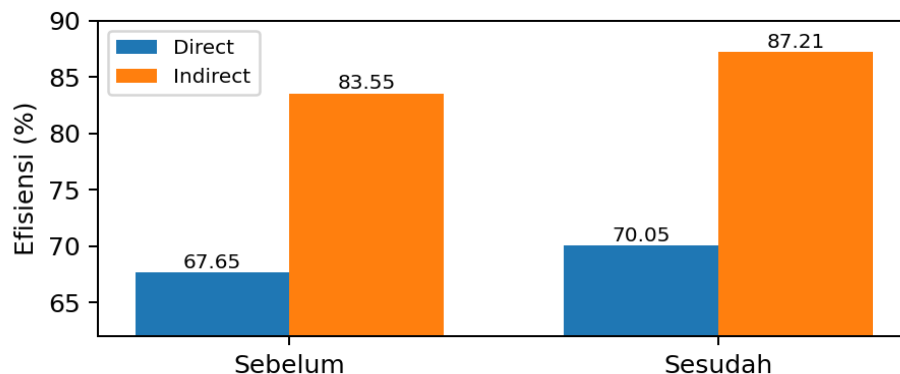
3.1. Efisiensi Boiler Metode Direct dan Indirect

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi boiler dengan metode direct meningkat dari 67,65% menjadi 70,05%. Peningkatan 2,40 poin persentase menunjukkan bahwa energi bahan bakar sesudah overhaul lebih efektif dikonversi menjadi energi berguna pada uap. Kenaikan ini berkaitan dengan peningkatan temperatur main steam dari 521,2 degC menjadi 537,68 degC setelah perbaikan kebocoran pipa drain superheater dan pembersihan tube boiler.

Efisiensi boiler dengan metode indirect meningkat dari 83,55% menjadi 87,21%. Peningkatan 3,66 poin persentase menunjukkan bahwa total kehilangan panas setelah overhaul lebih rendah. Perbedaan nilai antara metode direct dan indirect terjadi karena metode direct hanya menilai keseimbangan input-output, sedangkan metode indirect merinci kerugian panas. Untuk evaluasi pemeliharaan, metode indirect lebih kuat karena dapat menunjukkan komponen rugi panas yang mengalami perubahan.

Tabel 2. Ringkasan efisiensi boiler sebelum dan sesudah overhaul

Metode	Sebelum (%)	Sesudah (%)	Kenaikan
Direct / input-output	67,65	70,05	2,40 poin
Indirect / heat loss	83,55	87,21	3,66 poin



Grafik 1. Perbandingan efisiensi boiler sebelum dan sesudah overhaul

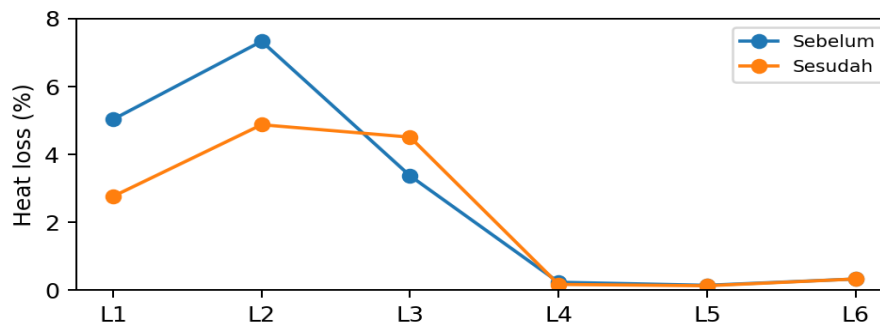
3.2. Analisis Heat Loss

Komponen kehilangan panas yang paling dominan sebelum overhaul adalah moisture dari pembakaran hidrogen sebesar 7,333%, gas buang kering sebesar 5,034%, dan moisture pada batubara sebesar 3,369%. Setelah overhaul, kehilangan panas gas buang kering turun signifikan menjadi 2,765%. Penurunan ini selaras dengan berkurangnya temperatur gas buang rata-rata, sehingga panas yang keluar melalui stack menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pembersihan tube dan pemulihan area perpindahan panas memberikan dampak langsung terhadap penyerapan kalor.

Kehilangan panas akibat moisture hidrogen turun dari 7,333% menjadi 4,875%. Kehilangan panas moisture udara turun dari 0,2346% menjadi 0,1703%, dan pembakaran tidak sempurna turun dari 0,1445% menjadi 0,1309%. Sebaliknya, moisture pada batubara naik dari 3,369% menjadi 4,509% karena kadar moisture bahan bakar sesudah overhaul lebih tinggi. Walaupun demikian, total loss turun dari 16,44% menjadi 12,7801%, sehingga efisiensi indirect meningkat.

Tabel 3. Perbandingan heat loss metode indirect

Item	Sebelum (%)	Sesudah (%)	Keterangan
L1 - Gas buang kering	5,034	2,765	Turun
L2 - Moisture pembakaran H ₂	7,333	4,875	Turun
L3 - Moisture batubara	3,369	4,509	Naik
L4 - Moisture udara	0,2346	0,1703	Turun
L5 - Pembakaran tidak sempurna	0,1445	0,1309	Turun
L6 - Radiasi dan konveksi	0,33	0,33	Tetap
Total loss	16,44	12,7801	Turun



Grafik 2 . Perubahan komponen heat loss sebelum dan sesudah overhaul

3.3. Evaluasi Batubara dan Specific Coal Consumption

Nilai kalor batubara sebelum overhaul sebesar 4711,52 kcal/kg, sedangkan sesudah overhaul sebesar 4556 kcal/kg. Secara teori, penurunan nilai kalor dapat menurunkan energi yang tersedia per kilogram batubara. Namun, data menunjukkan coal flow turun dari 76,39 t/h menjadi 73,75 t/h dan SCC turun dari 0,611 kg/kWh menjadi 0,590 kg/kWh. Hal ini berarti pada beban yang sama, boiler sesudah overhaul membutuhkan batubara lebih sedikit per satuan energi listrik yang dihasilkan.

Tabel 4. Ringkasan nilai kalor, coal flow, dan SCC

Parameter	Sebelum Overhaul	Sesudah Overhaul
Nilai kalor batubara (kcal/kg)	4711,52	4556
Coal flow (t/h)	76,39	73,75
Specific coal consumption (kg/kWh)	0,611	0,590

Penurunan SCC dapat dijelaskan dari perbaikan perpindahan panas dan pemulihan kondisi peralatan. Setelah tube boiler lebih bersih, hambatan termal berkurang sehingga panas hasil pembakaran lebih efektif diserap oleh air dan uap. Perbaikan pipa drain superheater mencegah kehilangan uap atau penurunan temperatur yang sebelumnya mengganggu kestabilan main steam. Kalibrasi flow meter feedwater membantu akurasi pembacaan laju aliran sehingga kontrol operasi dan evaluasi kinerja menjadi lebih andal.

3.4. Pengaruh Kegiatan Overhaul terhadap Kinerja Boiler

Kegiatan overhaul berpengaruh terhadap efisiensi boiler karena menyasar sumber-sumber penurunan performa. Sebelum overhaul terdapat kebocoran pada pipa drain superheater yang menyebabkan temperatur main steam menurun. Setelah pipa tersebut diperbaiki, temperatur main steam meningkat dari 521,2 degC menjadi 537,68 degC. Kenaikan temperatur ini penting karena steam dengan temperatur lebih tinggi membawa entalpi lebih besar sehingga energi output boiler meningkat. Selain perbaikan superheater drain, kalibrasi flow meter feedwater juga berperan penting. Flow meter yang tidak akurat menyebabkan data laju aliran feedwater tidak dapat digunakan secara presisi untuk evaluasi kinerja. Setelah kalibrasi, pengukuran menjadi lebih andal, sehingga

pengendalian operasi dan perhitungan efisiensi dapat dilakukan dengan basis data yang lebih baik. Pada pembangkit, instrumen yang akurat sama pentingnya dengan peralatan mekanik karena keputusan operasi bergantung pada data tersebut.

Pembersihan tube boiler menurunkan tahanan perpindahan panas. Deposit atau kotoran yang menempel pada permukaan tube dapat berperan sebagai isolator, sehingga panas dari flue gas tidak optimal diserap oleh fluida kerja. Setelah pembersihan, panas dari pembakaran lebih banyak terserap dan temperatur gas buang menurun. Hal ini tercermin pada penurunan L1 dari 5,034% menjadi 2,765%. Dengan kata lain, penurunan heat loss gas buang kering menjadi bukti teknis bahwa kondisi permukaan perpindahan panas membaik setelah overhaul.

3.5. Implikasi Operasi dan Pemeliharaan

Peningkatan efisiensi boiler memberikan implikasi langsung terhadap operasi pembangkit. Penurunan SCC menunjukkan bahwa kebutuhan batubara per kWh berkurang. Jika tren ini dapat dipertahankan, biaya bahan bakar dapat ditekan dan beban kerja sistem penanganan batubara dapat menurun. Selain itu, penurunan temperatur gas buang berpotensi mengurangi energi yang terbuang ke lingkungan. Namun, peningkatan efisiensi tidak hanya bergantung pada overhaul, tetapi juga pada kualitas bahan bakar, pola operasi, sootblowing, dan stabilitas excess air. Untuk menjaga hasil overhaul, parameter operasi yang perlu dipantau secara berkala adalah temperatur gas buang, temperatur main steam, coal flow, O₂ dan CO₂ flue gas, excess air, feedwater flow, make up water, dan SCC. Jika temperatur gas buang mulai naik pada beban yang sama, kemungkinan terjadi fouling pada tube atau penurunan efektivitas sootblower. Jika SCC naik, evaluasi perlu diarahkan pada kualitas batubara, kalibrasi coal feeder, kondisi pembakaran, dan kinerja fan. Pemantauan tersebut penting agar tindakan korektif dapat dilakukan sebelum penurunan efisiensi menjadi besar.

Tabel 5. Matriks pengendalian pasca-overhaul

Indikator	Kemungkinan penyebab	Tindakan pengendalian
Temperatur gas buang naik	Fouling tube, sootblower kurang efektif	Optimasi sootblower dan inspeksi surface pemanas
SCC meningkat	Nilai kalor turun atau pembakaran tidak optimum	Cek GCV, coal feeder, dan excess air
Main steam temperature turun	Kebocoran drain atau penyerapan panas menurun	Inspeksi superheater dan jalur drain
Data feedwater tidak stabil	Flow meter tidak akurat	Kalibrasi flow meter dan validasi data operasi
CO meningkat	Pembakaran tidak sempurna	Evaluasi burner, udara primer, dan distribusi batubara

Matriks pengendalian pada Tabel 5 dapat digunakan sebagai dasar evaluasi rutin pasca-overhaul. Prinsip utamanya adalah menjadikan hasil performance test setelah overhaul sebagai baseline. Apabila terdapat penyimpangan dari baseline, metode indirect dapat digunakan untuk mencari komponen rugi panas yang berubah. Dengan pendekatan tersebut, pemeliharaan tidak hanya bersifat korektif, tetapi juga preventif dan berbasis kondisi.

3.6. Evaluasi Proximate dan Ultimate Batubara

Perubahan karakteristik batubara perlu diperhatikan karena efisiensi boiler tidak hanya ditentukan oleh kondisi peralatan. Data ultimate menunjukkan kandungan karbon turun dari 60,37% menjadi 31%, sedangkan kandungan hidrogen turun dari 5,59% menjadi 3,82%. Penurunan kandungan karbon dan hidrogen secara umum dapat menurunkan potensi pelepasan energi kimia bahan bakar. Hal ini terlihat dari turunnya GCV dari 4711,52 kcal/kg menjadi 4556 kcal/kg. Meskipun demikian, efisiensi sesudah overhaul tetap meningkat. Kondisi ini menegaskan bahwa pemulihan peralatan boiler dapat mengimbangi sebagian penurunan kualitas batubara. Kadar moisture batubara meningkat dari 24,4% menjadi 31,8%. Kadar air yang tinggi biasanya meningkatkan kehilangan panas karena sebagian energi pembakaran digunakan untuk menguapkan air. Hal tersebut terlihat pada L3 yang naik dari 3,369% menjadi 4,509%. Namun kenaikan L3 tidak menyebabkan efisiensi total turun karena komponen kerugian lain, khususnya L1 dan L2, mengalami penurunan yang lebih besar. Dengan demikian, evaluasi efisiensi harus dibaca secara menyeluruh, bukan hanya dari satu parameter bahan bakar.

Kadar ash turun dari 4,81% menjadi 4,4%. Penurunan abu dapat membantu mengurangi potensi fouling dan slagging pada permukaan perpindahan panas, meskipun efeknya juga dipengaruhi oleh komposisi mineral abu dan kondisi pembakaran. Kadar sulfur berubah dari 0,49% menjadi 0,46%, sehingga potensi korosi akibat senyawa

sulfur relatif menurun. Parameter-parameter ini penting untuk menentukan strategi sootblowing, inspeksi tube, serta pengendalian temperatur gas buang agar kerusakan dan penurunan efisiensi dapat dicegah. Dari sisi operasi, data batubara menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi sesudah overhaul bukan disebabkan oleh peningkatan nilai kalor, karena nilai kalor justru lebih rendah. Oleh sebab itu, faktor peralatan memiliki peran kuat. Pembersihan tube memperbaiki heat transfer, perbaikan drain superheater meningkatkan temperatur uap, dan kalibrasi flow meter meningkatkan validitas kontrol. Hal ini menjadikan overhaul sebagai tindakan penting untuk mempertahankan efisiensi ketika kualitas batubara berubah-ubah.

3.7. Evaluasi Metode Direct dan Indirect

Metode direct dan indirect memberikan nilai efisiensi yang berbeda karena keduanya memiliki pendekatan perhitungan yang tidak sama. Metode direct menilai efisiensi dari hubungan energi masuk bahan bakar dan energi keluar pada uap. Metode ini mudah diterapkan, tetapi sangat sensitif terhadap akurasi data flow dan entalpi. Jika pembacaan flow meter tidak akurat, hasil direct dapat menyimpang. Karena itu, kalibrasi flow meter feedwater yang dilakukan saat overhaul menjadi penting tidak hanya untuk operasi, tetapi juga untuk validitas evaluasi performa. Metode indirect menilai efisiensi dari sisi kehilangan panas. Kelebihannya adalah kemampuan untuk mengidentifikasi komponen rugi panas yang dominan. Dalam penelitian ini, metode indirect memperlihatkan bahwa penurunan L1 dan L2 merupakan faktor utama peningkatan efisiensi. L1 turun karena temperatur gas buang menurun, sedangkan L2 turun karena efek perhitungan moisture hidrogen dan parameter pembakaran setelah overhaul. Oleh karena itu, metode indirect lebih berguna untuk menentukan tindak lanjut pemeliharaan.

Walaupun nilai indirect lebih tinggi daripada direct, arah perubahannya konsisten, yaitu sama-sama meningkat setelah overhaul. Konsistensi arah ini memperkuat kesimpulan bahwa overhaul memberikan dampak positif terhadap boiler. Jika salah satu metode menunjukkan kenaikan tetapi metode lain menunjukkan penurunan, maka diperlukan validasi data tambahan. Pada kasus ini, kedua metode menunjukkan perbaikan sehingga kesimpulan teknis dapat diterima. Dalam format jurnal teknik, penyajian kedua metode perlu dibuat ringkas namun tetap jelas. Metode direct cukup ditampilkan sebagai pembandingan input-output, sedangkan metode indirect perlu disertai tabel komponen heat loss. Dengan cara tersebut, pembaca dapat memahami bukan hanya besarnya efisiensi, tetapi juga alasan teknis mengapa efisiensi berubah setelah overhaul.

3.8. Rekomendasi Pemeliharaan Berbasis Data

Berdasarkan hasil penelitian, pemeliharaan boiler sebaiknya tidak hanya dilakukan berdasarkan interval waktu, tetapi juga berdasarkan tren indikator operasi. Parameter yang dapat dijadikan indikator awal adalah temperatur gas buang, SCC, nilai O₂, nilai CO, temperatur main steam, dan make up water. Kenaikan temperatur gas buang pada beban yang sama dapat menunjukkan penurunan kemampuan penyerapan panas. Kenaikan SCC dapat mengindikasikan penurunan kualitas pembakaran atau perubahan kualitas batubara. Pemeriksaan kebocoran pada sistem drain dan valve perlu diprioritaskan karena kebocoran kecil dapat menurunkan temperatur uap dan mengurangi energi output. Pada penelitian ini, kebocoran pipa drain superheater menjadi salah satu temuan penting. Setelah dilakukan perbaikan, temperatur main steam meningkat secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa inspeksi thermography dan pemeriksaan valve passing perlu dilakukan secara rutin, terutama sebelum performance test.

Sootblower harus dievaluasi dari sisi efektivitas, frekuensi operasi, dan dampaknya terhadap temperatur gas buang. Jika sootblower tidak bekerja optimal, deposit pada permukaan tube akan bertambah dan meningkatkan L1. Sebaliknya, sootblowing yang terlalu sering juga dapat meningkatkan konsumsi steam bantu dan berpotensi mempercepat erosi. Karena itu, strategi sootblowing perlu disesuaikan dengan tren temperatur gas buang dan kondisi abu batubara. Data heat loss dapat digunakan sebagai dasar prioritas tindakan. Jika L1 meningkat, prioritas diarahkan pada kebersihan permukaan perpindahan panas, air heater, economizer, dan jalur gas buang. Jika L3 meningkat, evaluasi diarahkan pada moisture batubara, pengeringan di mill, dan kualitas udara primer. Jika L5 meningkat, pemeriksaan harus dilakukan pada burner, distribusi udara, fineness batubara, dan excess air. Dengan pembacaan seperti ini, tindakan pemeliharaan menjadi lebih tepat sasaran. Setelah overhaul, hasil performance test sebaiknya dijadikan baseline baru. Baseline ini digunakan untuk membandingkan data operasi harian atau mingguan. Ketika terdapat deviasi, tim operasi dan pemeliharaan dapat segera menentukan apakah penyebabnya berasal dari bahan bakar, instrumen, kondisi peralatan, atau pola operasi. Pendekatan berbasis data seperti ini dapat memperpanjang periode operasi optimum dan mengurangi risiko penurunan efisiensi yang tidak terdeteksi.

3.9. Implikasi terhadap Biaya Operasi

Penurunan SCC dari 0,611 kg/kWh menjadi 0,590 kg/kWh memiliki implikasi ekonomis. Selisih 0,021 kg/kWh tampak kecil, tetapi pada unit pembangkit yang beroperasi terus-menerus, perbedaan ini dapat menjadi penghematan batubara yang signifikan. Pada beban 125 MW, penurunan konsumsi spesifik berarti jumlah batubara yang diperlukan untuk menghasilkan energi listrik yang sama menjadi lebih rendah. Dampaknya adalah penurunan biaya bahan bakar dan beban kerja sistem coal handling. Selain biaya bahan bakar, overhaul juga berpotensi menekan biaya akibat kerusakan lanjutan. Tube yang kotor, valve yang passing, dan instrumen yang tidak akurat dapat menyebabkan operasi menyimpang dari kondisi desain. Jika kondisi tersebut dibiarkan, kerusakan dapat meluas dan memerlukan perbaikan yang lebih mahal. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi setelah overhaul harus dilihat sebagai manfaat teknis sekaligus manfaat ekonomis.

Namun, manfaat ekonomi harus dihitung dengan memperhatikan biaya overhaul, durasi shutdown, harga batubara, faktor kapasitas, dan jam operasi tahunan. Artikel ini berfokus pada evaluasi teknis, sehingga analisis ekonomi rinci belum dilakukan. Penelitian lanjutan dapat menghitung penghematan batubara tahunan berdasarkan selisih SCC dan membandingkannya dengan biaya pelaksanaan overhaul. Dengan demikian, keputusan pemeliharaan dapat didukung oleh analisis teknis dan ekonomi.

3.10. Keterbatasan Analisis dan Validasi Hasil

Analisis dalam artikel ini menggunakan satu titik beban, yaitu 125 MW. Perbandingan pada satu beban memiliki kelebihan karena kondisi operasi sebelum dan sesudah overhaul lebih mudah disejajarkan. Namun, hasil tersebut belum menggambarkan performa boiler pada seluruh rentang operasi. Boiler dapat memiliki karakteristik heat loss yang berbeda pada beban rendah, beban menengah, dan beban tinggi. Oleh sebab itu, evaluasi lanjutan sebaiknya menggunakan beberapa titik beban agar pengaruh overhaul dapat dibaca lebih komprehensif. Keterbatasan berikutnya adalah variasi kualitas batubara. Data menunjukkan bahwa nilai kalor, kadar karbon, kadar hidrogen, kadar moisture, dan kadar abu berubah antara kondisi sebelum dan sesudah overhaul. Perubahan kualitas bahan bakar dapat mempengaruhi efisiensi secara langsung, sehingga hasil perhitungan tidak dapat dianggap hanya berasal dari faktor peralatan. Meskipun demikian, fakta bahwa efisiensi meningkat ketika GCV turun menunjukkan bahwa pemulihan peralatan memberikan kontribusi nyata terhadap perbaikan performa.

Validasi hasil dapat dilakukan dengan membandingkan beberapa indikator yang saling berkaitan. Efisiensi direct meningkat, efisiensi indirect meningkat, temperatur gas buang turun, SCC turun, dan temperatur main steam naik. Arah perubahan indikator tersebut konsisten dengan hipotesis bahwa overhaul memperbaiki kinerja boiler. Apabila hanya satu indikator yang membaik, kesimpulan perlu lebih hati-hati. Dalam penelitian ini, beberapa indikator utama bergerak ke arah positif sehingga hasil evaluasi cukup kuat. Untuk menjaga kualitas pelaporan jurnal, data yang berasal dari skripsi perlu diringkas tanpa menghilangkan substansi teknis. Tabel yang terlalu panjang dapat dipadatkan menjadi parameter utama, sedangkan rumus perlu ditulis dalam bentuk yang lazim dibaca. Pembahasan juga perlu diarahkan pada hubungan sebab-akibat, misalnya pembersihan tube menurunkan L1, perbaikan drain superheater menaikkan temperatur main steam, dan kalibrasi flow meter memperbaiki validitas perhitungan.

Dengan pendekatan tersebut, artikel tidak hanya menjadi ringkasan skripsi, tetapi berubah menjadi naskah jurnal yang lebih fokus. Tujuan utama format jurnal adalah menunjukkan masalah, metode, hasil, pembahasan, dan kontribusi teknis secara ringkas. Oleh karena itu, bagian-bagian administratif skripsi seperti lembar pengesahan, daftar isi, dan lampiran tidak dimasukkan, sedangkan data inti, rumus, tabel hasil, dan interpretasi teknis tetap dipertahankan. Secara praktis, artikel ini dapat digunakan sebagai acuan awal untuk evaluasi overhaul pada boiler PLTU lain dengan pola operasi serupa. Parameter yang dipakai, yaitu direct efficiency, indirect efficiency, heat loss, SCC, dan temperatur gas buang, merupakan indikator yang umum tersedia pada performance test pembangkit. Apabila data tersebut dikumpulkan secara konsisten, perbandingan antarperiode pemeliharaan dapat dilakukan lebih objektif dan keputusan pemeliharaan menjadi lebih berbasis data.

4. Kesimpulan

Overhaul terbukti meningkatkan efisiensi Boiler Unit 1 PLTU Banjarsari. Efisiensi metode direct meningkat dari 67,65% menjadi 70,05%, atau naik 2,40 poin persentase. Efisiensi metode indirect meningkat dari 83,55% menjadi 87,21%, atau naik 3,66 poin persentase. Penurunan total heat loss dari 16,44% menjadi 12,7801% menunjukkan bahwa pemanfaatan panas setelah overhaul menjadi lebih baik.

Perbaikan pipa drain superheater, pembersihan tube boiler, dan kalibrasi flow meter feedwater menjadi faktor teknis utama yang mendukung peningkatan efisiensi. Temperatur main steam meningkat dari 521,2 degC menjadi 537,68 degC, heat loss gas buang kering turun dari 5,034% menjadi 2,765%, dan SCC turun dari 0,611 kg/kWh menjadi 0,590 kg/kWh. Overhaul perlu dilaksanakan secara rutin dan dilanjutkan dengan pemantauan heat loss, SCC, temperatur gas buang, serta kualitas batubara agar efisiensi boiler tetap terjaga.

Saran Operasional

Berdasarkan hasil evaluasi, pengujian performa boiler sebaiknya dilakukan secara berkala setelah unit kembali beroperasi pasca-overhaul. Pengujian tersebut perlu menggunakan format data yang sama agar tren efisiensi dapat dibandingkan antarperiode. Parameter yang harus diprioritaskan adalah coal flow, main steam temperature, feedwater flow, flue gas temperature, O₂, CO, dan nilai kalor batubara. Keseragaman format data akan memudahkan analisis direct dan indirect tanpa banyak koreksi tambahan. Tim operasi perlu menjadikan nilai SCC pasca-overhaul sebagai acuan awal. Apabila SCC mulai meningkat pada beban yang relatif sama, maka perlu dilakukan pemeriksaan terhadap kualitas batubara, performa mill, setting burner, dan kebersihan tube. Kenaikan SCC tidak boleh langsung dianggap sebagai akibat kualitas batubara karena dapat pula disebabkan oleh penurunan heat transfer atau penyimpangan instrumen.

Tim pemeliharaan perlu memprioritaskan inspeksi area yang pada penelitian ini terbukti berpengaruh terhadap efisiensi, yaitu superheater drain, flow meter feedwater, sootblower, dan tube boiler. Pemeriksaan valve passing menggunakan thermography dapat dijadikan kegiatan rutin sebelum overhaul besar. Dengan demikian, kebocoran kecil yang menurunkan temperatur main steam dapat ditemukan lebih cepat. Penelitian berikutnya disarankan menambahkan perhitungan penghematan biaya berdasarkan selisih SCC, jam operasi tahunan, dan harga batubara. Analisis ekonomi tersebut akan memperlihatkan manfaat overhaul secara lebih komprehensif, tidak hanya dari sisi peningkatan efisiensi tetapi juga dari sisi pengurangan biaya produksi listrik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi PLN, dosen pembimbing, dan pihak PLTU Banjarsari yang telah menyediakan data serta dukungan teknis untuk penyusunan artikel ini.

Daftar Rujukan

- 1) M. Raut, S. Kumbhare, and R. Thakur, *Energy Performance Assessment of Boiler*, 2014.
- 2) M. K. Bora and N. Nakkeeran, *Performance Analysis from the Efficiency Estimation of Coal Fired Boiler*, 2014.
- 3) U.S. Department of Energy, *Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry*, 2004.
- 4) T. Srinivas, *Efficiency of a Coal Fired Boiler in a Typical Thermal Power Plant*, *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2017.
- 5) PT PLN, *Buku Pembelajaran Pembangkit Listrik*, 2019.
- 6) A. Nabawi, *Pengaruh Overhaul Terhadap Efisiensi Boiler Unit 3 UJP PLTU Banten 3 Lontar*, Skripsi, 2019.
- 7) ASME, *Performance Test Code for Fired Steam Generators*, ASME PTC 4, 2008.
- 8) A. Adiyanto, *Pengaruh Overhaul Terhadap Efisiensi Boiler Di Unit 1 PLTU Banjarsari*, Skripsi, Institut Teknologi PLN, 2020.
- 9) Krishnanunni, et al., *Evaluation of Heat Losses in Fire Tube Boiler*, *International Journal*, 2012.
- 10) Pravitasari, Malino, and Novitasari, *Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung*, 2017.
- 11) Kurniawan, Gunawan, and Maluegha, *Kajian Efisiensi Termal dari Boiler di PLTU Amurang Unit 1*, 2015.
- 12) Subramaniam, *Boiler Efficiency Evaluation Using Heat Loss Method*, *International Journal of Science and Research*, 2016.
- 13) S. Suntivarakorn and W. Treedet, *Improvement of Boiler Efficiency Using Heat Recovery and Automatic Combustion Control System*, *Energy Procedia*, 2016.
- 14) Syahputera, Kamal, and Ekayuliana, *Specific Fuel Consumption Analysis in Thermal Power Plant Operation*, 2018.
- 15) Putra TS, Prabowo E, Ramadani F. *Pengaruh Overhaul Terhadap Kinerja High Pressure Heater Unit 3 PLTU Banten Lontar*. *JTM: JURNAL TEKNIK MESIN*. 2026 Feb 1;2(1):10-5.