

Evaluasi Overhaul terhadap Efisiensi Boiler Unit 3 PLTU Lontar

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Ajibrila Nabawi³

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

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

Abstract

The boiler is the main component of a steam power plant because it converts feedwater into high-temperature and high-pressure steam for turbine operation. Boiler efficiency is affected by combustion quality, coal characteristics, air supply, heat-transfer cleanliness, and the condition of auxiliary equipment. This study evaluates the effect of overhaul on the efficiency of Boiler Unit 3 at UJP PLTU Banten 3 Lontar. The calculation uses performance-test data before and after overhaul at a 294 MW load. Two methods are applied: the direct or input-output method and the indirect or heat-loss method based on ASME PTC 4. The direct-method efficiency increased from 79.51% before overhaul to 79.68% after overhaul, equivalent to a 0.17 percentage-point improvement. The indirect-method efficiency increased from 81.85% to 82.61%, equivalent to a 0.76 percentage-point improvement. The reduction in dry flue-gas loss, hydrogen-moisture loss, coal-moisture loss, and air-moisture loss indicates that overhaul improves boiler heat utilization, especially through tube cleaning, air-preheater cleaning, and restoration of combustion-supporting equipment. The results confirm that scheduled overhaul can improve boiler performance and should be maintained as part of plant reliability management.

Keywords: boiler efficiency; overhaul; direct method; indirect method; heat loss

Abstrak

Boiler merupakan komponen utama PLTU karena berfungsi mengubah air pengisi menjadi uap bertemperatur dan bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin. Efisiensi boiler dipengaruhi oleh kualitas pembakaran, karakteristik batubara, suplai udara, kebersihan permukaan perpindahan panas, serta kondisi peralatan bantu. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh overhaul terhadap efisiensi Boiler Unit 3 UJP PLTU Banten 3 Lontar. Perhitungan menggunakan data performance test sebelum dan sesudah overhaul pada beban 294 MW. Metode yang digunakan adalah metode direct atau input-output dan metode indirect atau heat loss berdasarkan standar ASME PTC 4. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi metode direct meningkat dari 79,51% sebelum overhaul menjadi 79,68% sesudah overhaul atau naik 0,17 poin persentase. Efisiensi metode indirect meningkat dari 81,85% menjadi 82,61% atau naik 0,76 poin persentase. Penurunan rugi panas gas buang kering, moisture hasil pembakaran hidrogen, moisture batubara, dan moisture udara menunjukkan bahwa overhaul memperbaiki pemanfaatan panas boiler, khususnya melalui pembersihan tube, pembersihan air preheater, serta pemulihan peralatan bantu pembakaran. Hasil ini menegaskan bahwa overhaul terjadwal mampu meningkatkan performa boiler dan perlu dipertahankan sebagai bagian dari manajemen keandalan pembangkit.

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

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit termal yang banyak digunakan karena mampu menghasilkan daya besar dengan biaya bahan bakar yang relatif kompetitif. Proses konversi energi pada PLTU diawali dari pembakaran batubara di boiler untuk menghasilkan panas, kemudian panas tersebut digunakan untuk mengubah air pengisi menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi [5,10,11]. Uap tersebut diarahkan ke turbin untuk menghasilkan energi mekanik, lalu energi mekanik dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Dalam rangkaian tersebut, boiler menjadi komponen yang sangat menentukan karena kualitas pembakaran dan kemampuan perpindahan panasnya mempengaruhi efisiensi siklus secara keseluruhan [7,10,11].

Efisiensi boiler didefinisikan sebagai kemampuan boiler dalam memanfaatkan energi panas bahan bakar menjadi energi berguna pada uap. Semakin besar energi yang diserap fluida kerja dan semakin kecil kerugian panas yang terjadi, semakin baik kinerja boiler [7,8]. Pada PLTU berbahan bakar batubara, efisiensi boiler

dipengaruhi oleh nilai kalor batubara, kandungan *moisture*, kadar karbon, kadar abu, *excess air*, temperatur gas buang, kebersihan permukaan perpindahan panas, serta kesiapan peralatan bantu seperti *forced draft fan*, *induced draft fan*, *primary air fan*, *air heater*, *sootblower*, *economizer*, *superheater*, *reheater*, dan sistem burner [1,4,5,10,11]. Jika salah satu parameter tidak optimal, panas hasil pembakaran tidak sepenuhnya diserap oleh fluida kerja sehingga efisiensi menurun.

Kinerja boiler dapat menurun akibat operasi jangka panjang. Permukaan tube dapat tertutup deposit, air preheater dapat mengalami *fouling*, *fan* dan *burner* mengalami penurunan performa, serta sistem pembakaran tidak lagi berada pada kondisi desain [1,3,6]. Untuk mengembalikan kondisi peralatan, dilakukan overhaul, yaitu kegiatan inspeksi, pembersihan, perbaikan, penggantian komponen, dan pengujian secara menyeluruh [3,6,9]. Pada Boiler Unit 3 UJP PLTU Banten 3 Lontar, overhaul dilakukan pada beberapa area penting, meliputi *safety valve*, *sootblower system*, *wall tube*, *superheater*, *reheater*, *economizer*, *coal feeder*, *burner device*, *primary air fan*, *induced draft fan*, *forced draft fan*, dan *air preheater*. Lingkup pekerjaan ini menunjukkan bahwa overhaul bukan hanya kegiatan perbaikan lokal, tetapi proses pemulihan performa boiler secara sistemik.

Dalam artikel ini membahas evaluasi overhaul terhadap efisiensi boiler Unit 3 UJP PLTU Banten 3 Lontar dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu *metode direct* dan *metode indirect*. *Metode direct* digunakan untuk membandingkan energi output uap terhadap energi input bahan bakar, sedangkan *metode indirect* menelusuri rugi panas seperti gas buang kering, *moisture*, radiasi-konveksi, dan karbon tidak terbakar [3,7,8]. Artikel ini menyajikan kembali hasil penelitian tersebut dalam format jurnal teknik dengan fokus pada perubahan efisiensi, komponen *heat loss*, dan interpretasi teknis terhadap hasil sebelum dan sesudah overhaul.

2. Metode Penelitian

2.1. Objek dan Data Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis data performance test Boiler Unit 3 UJP PLTU Banten 3 Lontar. Lokasi penelitian berada di Jalan Raya Ir. Sutami, Desa Lontar, Kecamatan Kemiri, Kabupaten Tangerang, Banten. Data yang digunakan meliputi spesifikasi boiler, data scope pekerjaan overhaul, data performance test sebelum dan sesudah overhaul, data analisis bahan bakar, data gas buang, temperatur lingkungan, kelembaban udara, nilai kalor batubara, dan data ash. Data sebelum dan sesudah overhaul dibandingkan pada beban 294 MW agar perbandingan efisiensi berada pada kondisi operasi yang sebanding.

Tabel 1. Data utama performance test Boiler Unit 3 PLTU Lontar

Parameter	Satuan	Sebelum Overhaul	Sesudah Overhaul
Beban unit	MW	294	294
Coal flow	t/h	159,13	151,47
Main steam pressure	MPa	15,6238	15,451
Main steam temperature	degC	538	536
Feedwater temperature	degC	271	270
Main steam flow	t/h	986,5686	1003,7183
CO ₂ flue gas	%	17,20	18,22
O ₂ flue gas	%	1,855	1,905
Average flue gas temperature	degC	184,86	178,65
GCV coal	kcal/kg	4131	4413,5

Tabel 1 menunjukkan beberapa perubahan penting setelah overhaul. Coal flow turun dari 159,13 t/h menjadi 151,47 t/h, sedangkan main steam flow meningkat dari 986,5686 t/h menjadi 1003,7183 t/h. Temperatur gas buang rata-rata juga turun dari 184,86 degC menjadi 178,65 degC. Kombinasi penurunan aliran bahan bakar, peningkatan laju uap, dan penurunan temperatur gas buang menjadi indikasi awal bahwa pemanfaatan panas boiler setelah overhaul menjadi lebih baik.

2.2. Parameter Perhitungan Efisiensi

Perhitungan efisiensi boiler dilakukan dengan dua metode. Metode direct membandingkan energi berguna pada uap terhadap energi bahan bakar yang masuk. Metode ini sederhana, tetapi tidak menunjukkan sumber kerugian panas secara rinci. Metode indirect menghitung efisiensi dari total rugi panas, sehingga lebih informatif untuk menganalisis komponen penyebab penurunan efisiensi. Dalam penelitian ini, metode indirect

digunakan untuk menilai pengaruh rugi panas gas buang kering, moisture dari pembakaran hidrogen, moisture dalam batubara, moisture udara, pembakaran tidak sempurna, radiasi-konveksi, serta karbon tak terbakar pada fly ash dan bottom ash.

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

$$\eta = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad (2)$$

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

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

$$AAS = (1 + EA/100) \times \text{theoretical air} \quad (5)$$

Pada persamaan tersebut, η adalah efisiensi boiler, G_{ms} adalah laju aliran main steam, h_g adalah entalpi main steam, h_f adalah entalpi feedwater, G_{fuel} adalah laju aliran bahan bakar, GCV adalah nilai kalor batubara, L1 sampai L8 adalah komponen rugi panas, C adalah karbon, H2 adalah hidrogen, O2 adalah oksigen, S adalah sulfur, EA adalah excess air, dan AAS adalah massa udara aktual yang dipasok per kilogram bahan bakar. Penulisan rumus dibuat ringkas dan bernomor agar lazim digunakan dalam artikel jurnal teknik.

2.3. Tahapan Analisis

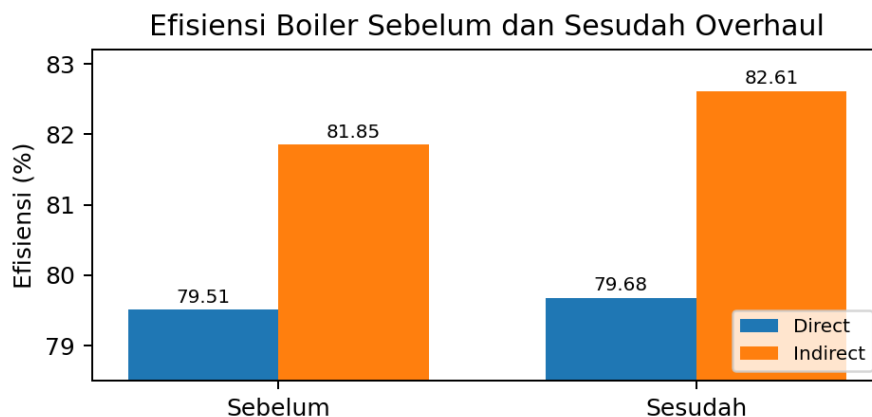
Analisis dimulai dari pengumpulan data operasi dan data bahan bakar, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan efisiensi metode direct. Tahap berikutnya adalah perhitungan kebutuhan udara teoritis, CO2 teoritis, excess air, massa udara aktual, massa gas buang kering, serta rugi panas L1 sampai L8. Nilai efisiensi indirect diperoleh dengan mengurangkan total rugi panas dari 100%. Hasil sebelum dan sesudah overhaul kemudian dibandingkan untuk melihat arah perubahan efisiensi, besarnya peningkatan, serta komponen rugi panas yang paling berpengaruh.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perbandingan Efisiensi Metode Direct

Berdasarkan perhitungan metode direct, efisiensi boiler sebelum overhaul sebesar 79,51%, sedangkan sesudah overhaul menjadi 79,68%. Peningkatan sebesar 0,17 poin persentase menunjukkan bahwa pada beban yang sama, boiler mampu menghasilkan uap dengan pemanfaatan energi bahan bakar yang sedikit lebih baik setelah overhaul. Walaupun kenaikan metode direct relatif kecil, perubahan tersebut penting karena boiler beroperasi pada kapasitas besar sehingga setiap peningkatan efisiensi dapat berdampak pada konsumsi batubara dan biaya operasi.

Peningkatan efisiensi metode direct dapat dikaitkan dengan pekerjaan overhaul yang dilakukan pada area perpindahan panas dan sistem pembakaran. Pembersihan water wall tube, superheater, reheater, dan economizer membantu mengurangi hambatan perpindahan panas akibat deposit. Pembersihan serta penyetelan air preheater membantu memperbaiki pemanasan udara pembakaran. Perbaikan pada burner, coal feeder, dan fan mendukung distribusi bahan bakar dan udara yang lebih stabil. Dengan kondisi tersebut, energi panas dari pembakaran dapat lebih efektif diserap oleh air dan uap.



Grafik 1. Perbandingan efisiensi boiler sebelum dan sesudah overhaul

3.2. Perbandingan Efisiensi Metode Indirect

Metode indirect menunjukkan peningkatan yang lebih besar. Efisiensi sebelum overhaul sebesar 81,85%, sedangkan sesudah overhaul sebesar 82,61%. Kenaikan 0,76 poin persentase menunjukkan bahwa total kehilangan panas setelah overhaul lebih rendah. Karena metode indirect menguraikan komponen rugi panas, hasil ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai bagian-bagian boiler yang membaik setelah pemeliharaan. Dengan kata lain, overhaul bukan hanya menaikkan output uap, tetapi juga mengurangi beberapa sumber kehilangan energi.

Tabel 2. Ringkasan efisiensi boiler sebelum dan sesudah overhaul

Metode	Sebelum Overhaul (%)	Sesudah Overhaul (%)	Kenaikan (poin %)
Direct / input-output	79,51	79,68	0,17
Indirect / heat loss	81,85	82,61	0,76

Perbedaan nilai antara metode direct dan indirect umum terjadi karena pendekatan perhitungannya berbeda. Metode direct sangat bergantung pada akurasi pengukuran aliran uap, entalpi, laju bahan bakar, dan GCV. Sementara itu, metode indirect bergantung pada analisis rugi panas dan karakteristik gas buang. Pada konteks evaluasi overhaul, metode indirect lebih informatif karena mampu menunjukkan komponen mana yang berubah sesudah pekerjaan pemeliharaan.

3.3. Analisis Rugi Panas

Komponen rugi panas yang dievaluasi meliputi gas buang kering (L1), moisture dari pembakaran hidrogen (L2), moisture dalam batubara (L3), moisture udara (L4), pembakaran tidak sempurna (L5), radiasi dan konveksi (L6), karbon tak terbakar pada fly ash (L7), serta karbon tak terbakar pada bottom ash (L8). Setelah overhaul, beberapa komponen rugi panas mengalami penurunan. Rugi panas gas buang kering turun dari 6,0075% menjadi 5,7555%. Penurunan ini berkaitan dengan turunnya temperatur gas buang rata-rata dari 184,86 degC menjadi 178,65 degC, yang menunjukkan bahwa lebih banyak panas gas buang berhasil dimanfaatkan.

Rugi panas karena moisture dari pembakaran hidrogen turun dari 6,9033% menjadi 6,5687%. Rugi panas moisture dalam batubara turun dari 4,5442% menjadi 4,3915%, sedangkan rugi panas moisture udara turun dari 0,4097% menjadi 0,3915%. Penurunan komponen tersebut mendukung peningkatan efisiensi metode indirect. Di sisi lain, rugi panas karbon tak terbakar pada fly ash meningkat dari 0,0377% menjadi 0,0624%, sementara bottom ash turun dari 0,0664% menjadi 0,0353%. Hal ini menunjukkan bahwa perbaikan overhaul tidak selalu menurunkan semua parameter rugi panas, tetapi secara total menghasilkan peningkatan efisiensi.

Tabel 3. Perbandingan rugi panas sebelum dan sesudah overhaul

Item	Sebelum (%)	Sesudah (%)	Selisih (%)
L1 - Gas buang kering	6,0075	5,7555	-0,2520
L2 - Moisture pembakaran H ₂	6,9033	6,5687	-0,3346
L3 - Moisture batubara	4,5442	4,3915	-0,1527
L4 - Moisture udara	0,4097	0,3915	-0,0182
L5 - Pembakaran tidak sempurna	0,0000	0,0000	0,0000
L6 - Radiasi dan konveksi	0,1800	0,1800	0,0000
L7 - Unburned carbon fly ash	0,0377	0,0624	+0,0247
L8 - Unburned carbon bottom ash	0,0664	0,0353	-0,0311

3.4. Pengaruh Pekerjaan Overhaul terhadap Boiler

Pekerjaan overhaul pada boiler Unit 3 mencakup beberapa aktivitas penting. Pada bagian safety valve dilakukan lapping seat disc, pemeriksaan seat dan disc, penggantian bonnet gasket, serta popping test. Pada area perpindahan panas dilakukan cleaning water jet untuk wall tube, superheater, reheater, dan economizer. Pada coal feeder dilakukan pembersihan, penggantian bearing, penggantian belt, adjustment, dan pemeriksaan gearbox. Pada burner device dilakukan pemeriksaan burner, penggantian nozzle, penggantian coal box, adjustment linkage, penggantian seal kit actuator, dan pemeriksaan damper. Pada fan dan air preheater dilakukan pembersihan, penggantian bearing, alignment, penggantian sealing system, serta adjust seal gap.

Dampak teknis dari pekerjaan tersebut adalah pemulihan jalur perpindahan panas dan sistem pembakaran. Pembersihan deposit pada tube mengurangi tahanan termal sehingga panas dari gas pembakaran dapat lebih efektif diserap oleh air dan uap. Pembersihan air preheater dan penyetelan seal membantu meningkatkan kualitas udara pembakaran karena udara masuk boiler dapat dipanaskan lebih optimal. Perbaikan pada fan menjaga suplai udara dan draft furnace agar lebih stabil. Perbaikan pada coal feeder dan burner membantu pembakaran menjadi lebih merata. Kombinasi pekerjaan tersebut menjelaskan mengapa rugi panas turun dan efisiensi boiler meningkat setelah overhaul.

Dari sisi operasi, peningkatan efisiensi indirect sebesar 0,76 poin persentase lebih mencerminkan penurunan total kerugian panas. Rugi panas gas buang kering, moisture akibat hidrogen, moisture batubara, dan moisture udara sama-sama menurun. Hal ini memperlihatkan bahwa kualitas pemanfaatan panas setelah overhaul lebih baik. Nilai direct yang hanya meningkat 0,17 poin persentase tetap konsisten dengan arah perbaikan, meskipun lebih kecil karena metode direct sangat sensitif terhadap data laju bahan bakar, laju uap, dan entalpi.

3.5. Interpretasi terhadap Keandalan Operasi

Overhaul perlu dipahami sebagai strategi menjaga keandalan sekaligus efisiensi. Pada unit pembangkit besar, penurunan efisiensi kecil dapat berdampak besar karena konsumsi bahan bakar berlangsung terus-menerus. Jika boiler mengalami fouling, hambatan perpindahan panas meningkat sehingga temperatur gas buang naik dan lebih banyak energi terbuang ke cerobong. Jika sistem udara pembakaran tidak optimal, pembakaran dapat bergeser dari kondisi desain sehingga meningkatkan rugi panas. Oleh sebab itu, jadwal overhaul tidak boleh hanya dipandang sebagai kewajiban pemeliharaan, tetapi juga sebagai instrumen pengendalian biaya operasi.

Hasil penelitian membuktikan bahwa overhaul pada Boiler Unit 3 PLTU Lontar memberikan efek positif. Akan tetapi, peningkatan yang diperoleh belum dapat dianggap sebagai kondisi akhir. Pemantauan berkala tetap perlu dilakukan terhadap temperatur gas buang, kadar O₂ dan CO₂, excess air, nilai kalor batubara, coal flow, main steam flow, performa sootblower, kondisi air preheater, dan kebersihan area perpindahan panas. Dengan pemantauan tersebut, tren penurunan efisiensi dapat diketahui lebih awal dan tindakan korektif dapat dilakukan sebelum terjadi penurunan performa yang lebih besar.

3.6. Analisis Data Bahan Bakar dan Gas Buang

Perubahan efisiensi boiler tidak dapat dipisahkan dari perubahan karakteristik bahan bakar dan gas buang. Setelah overhaul, nilai GCV batubara meningkat dari 4131 kcal/kg menjadi 4413,5 kcal/kg. Kenaikan nilai kalor ini mendukung proses pembakaran karena energi kimia yang tersedia per kilogram bahan bakar menjadi lebih tinggi. Pada saat yang sama, coal flow turun dari 159,13 t/h menjadi 151,47 t/h. Kombinasi nilai kalor yang lebih tinggi dan penurunan laju batubara memperlihatkan bahwa energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan beban 294 MW dapat dicapai dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah. Walaupun perubahan nilai kalor merupakan karakteristik bahan bakar dan bukan semata-mata hasil overhaul, kondisi peralatan pasca-overhaul membantu memanfaatkan energi tersebut dengan lebih efektif.

Kandungan moisture batubara berubah dari 27,435% menjadi 28,49%. Secara teori, kenaikan moisture dapat meningkatkan rugi panas karena sebagian energi pembakaran digunakan untuk menguapkan air dalam bahan bakar. Namun, hasil perhitungan menunjukkan rugi panas L₃ justru turun dari 4,5442% menjadi 4,3915%. Kondisi ini dapat terjadi karena efek total dari nilai kalor, temperatur gas buang, dan parameter operasi lain setelah overhaul lebih dominan daripada peningkatan moisture. Selain itu, pembersihan air preheater dan perbaikan sistem udara dapat memperbaiki kualitas pemanasan udara primer sehingga proses pengeringan batubara di mill menjadi lebih baik.

Pada sisi gas buang, kandungan CO tercatat 0% baik sebelum maupun sesudah overhaul. Hal ini menunjukkan bahwa pembakaran tidak sempurna tidak menjadi sumber kerugian utama pada data pengujian. Kandungan O₂ gas buang meningkat tipis dari 1,855% menjadi 1,905%, sedangkan CO₂ meningkat dari 17,20% menjadi 18,22%. Peningkatan CO₂ dengan CO tetap nol dapat dibaca sebagai indikasi pembakaran yang tetap baik, meskipun evaluasi detail tetap harus mempertimbangkan excess air, distribusi udara, kondisi burner, dan kualitas batubara. Parameter gas buang yang paling jelas berubah adalah temperatur rata-rata, yaitu turun 6,21 degC setelah overhaul. Penurunan ini mendukung berkurangnya L₁, karena kerugian panas gas buang kering sangat dipengaruhi oleh selisih temperatur gas buang dan temperatur ambien.

Tabel 4. Ringkasan parameter bahan bakar dan gas buang

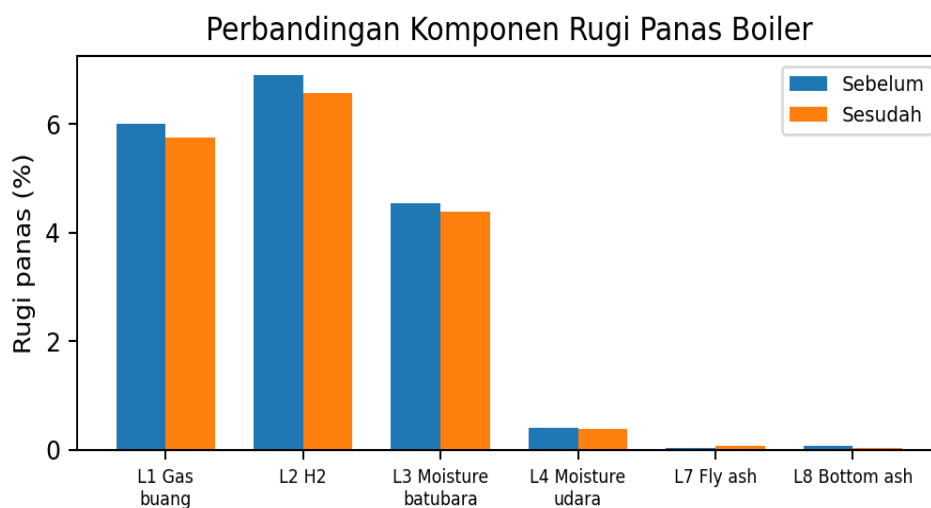
Parameter	Satuan	Sebelum OH	Sesudah OH	Catatan teknis
Coal flow	t/h	159,13	151,47	Turun setelah overhaul
GCV batubara	kcal/kg	4131	4413,5	Nilai kalor lebih tinggi
Moisture batubara	%wt	27,435	28,49	Naik, tetapi L3 tetap turun
Ash content	%wt	9,94	6,02	Menurun pada data sesudah OH
CO ₂ gas buang	%	17,20	18,22	Naik setelah overhaul
O ₂ gas buang	%	1,855	1,905	Naik tipis
CO gas buang	%	0	0	Tidak ada indikasi CO
Temperatur gas buang rata-rata	degC	184,86	178,65	Turun 6,21 degC

3.7. Keterkaitan Overhaul dengan Komponen Heat Loss

Penurunan L1 atau rugi panas gas buang kering merupakan salah satu indikator paling penting dalam evaluasi boiler. Semakin tinggi temperatur gas buang keluar boiler, semakin besar panas yang tidak terserap oleh fluida kerja. Setelah overhaul, pembersihan surface pemanas seperti wall tube, superheater, reheater, dan economizer membantu memperbaiki penyerapan panas. Deposit abu dan slagging yang menempel pada permukaan tube dapat bertindak sebagai isolator termal. Ketika lapisan ini dibersihkan, tahanan perpindahan panas menurun sehingga energi dari gas pembakaran lebih efektif dipindahkan ke air dan uap.

Penurunan L2 berkaitan dengan moisture yang terbentuk dari pembakaran hidrogen. Komponen ini dipengaruhi oleh kandungan hidrogen bahan bakar, temperatur gas buang, dan panas spesifik uap. Setelah overhaul, nilai L2 turun 0,3346 poin persentase, yang merupakan penurunan terbesar di antara komponen rugi panas yang tercatat. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi operasi setelah overhaul mengurangi energi yang terbawa keluar bersama uap air hasil pembakaran. Penurunan L3 dan L4 juga memperkuat kesimpulan bahwa rugi panas terkait moisture menjadi lebih terkendali setelah peralatan dibersihkan dan sistem udara pembakaran dikembalikan mendekati kondisi kerja yang baik.

Komponen L7 mengalami kenaikan dari 0,0377% menjadi 0,0624%. Peningkatan ini disebabkan oleh perubahan nilai GCV fly ash dari 157 kcal/kg menjadi 457,47 kcal/kg. Meskipun naik, kontribusi L7 terhadap total kerugian masih relatif kecil dibandingkan L1, L2, dan L3. Sementara itu, L8 turun dari 0,0664% menjadi 0,0353% karena nilai GCV bottom ash setelah overhaul lebih rendah. Kenaikan salah satu komponen minor tidak mengubah kesimpulan umum karena total kerugian panas tetap menurun, sehingga efisiensi indirect meningkat.



Grafik 2. Perbandingan komponen rugi panas utama sebelum dan sesudah overhaul

3.8. Implikasi Pemeliharaan dan Rekomendasi Operasi

Peningkatan efisiensi yang diperoleh dari overhaul perlu dipertahankan melalui pengawasan operasi harian. Parameter yang perlu dipantau secara konsisten meliputi main steam flow, main steam temperature,

feedwater temperature, coal flow, GCV, flue gas temperature, O₂ flue gas, CO₂ flue gas, dan kondisi sootblower. Jika temperatur gas buang mulai meningkat pada beban yang sebanding, hal tersebut dapat menjadi indikasi awal fouling pada permukaan perpindahan panas atau penurunan efektivitas air preheater. Jika O₂ gas buang berubah signifikan, evaluasi perlu dilakukan pada excess air, damper, burner tilt, serta kinerja FD fan, PA fan, dan ID fan. Sootblower perlu dijaga efektivitasnya karena berfungsi membersihkan deposit pada surface pemanas saat unit beroperasi. Apabila sootblower tidak bekerja optimal, deposit dapat tumbuh lebih cepat sehingga efisiensi turun sebelum jadwal overhaul berikutnya. Pengendalian kualitas batubara juga penting. Nilai kalor, moisture, ash, dan sulfur perlu dipantau karena perbedaan kualitas batubara akan mempengaruhi heat input, pembentukan deposit, serta komposisi gas buang. Pada saat kualitas batubara menurun, operator perlu menyesuaikan udara pembakaran dan pengoperasian sootblower agar kerugian panas tidak meningkat berlebihan.

Dari sisi pemeliharaan, scope overhaul yang terbukti relevan adalah pembersihan water jet pada tube boiler, pemeriksaan sootblower, perawatan coal feeder, penggantian komponen burner, alignment fan, penggantian bearing, dan penyetelan seal air preheater. Kegiatan ini sebaiknya didokumentasikan bersama hasil performance test setelah unit kembali beroperasi. Dengan demikian, setiap overhaul tidak hanya dinilai dari selesainya pekerjaan mekanik, tetapi juga dari dampaknya terhadap indikator kinerja seperti efisiensi direct, efisiensi indirect, temperatur gas buang, excess air, dan konsumsi batubara. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kegiatan overhaul memberikan manfaat yang terukur namun tetap membutuhkan pengendalian operasi lanjutan. Kenaikan efisiensi 0,17 poin pada metode direct dan 0,76 poin pada metode indirect menjadi bukti bahwa kondisi boiler membaik. Namun, hasil tersebut juga memperlihatkan bahwa efisiensi dipengaruhi oleh banyak faktor yang saling terkait. Karena itu, tindakan pemeliharaan harus dipadukan dengan optimasi pembakaran, monitoring kualitas bahan bakar, dan evaluasi heat loss secara berkala agar peningkatan yang diperoleh tidak cepat hilang selama periode operasi berikutnya.

3.9. Keterbatasan Analisis

Analisis ini menggunakan data performance test sebelum dan sesudah overhaul pada satu beban operasi, yaitu 294 MW. Dengan demikian, hasil perbandingan paling kuat berlaku untuk kondisi beban tersebut. Untuk memperoleh gambaran yang lebih menyeluruh, evaluasi lanjutan dapat dilakukan pada beberapa variasi beban, misalnya beban rendah, menengah, dan tinggi. Selain itu, variasi kualitas batubara antarperiode perlu diperhitungkan karena nilai kalor dan moisture bahan bakar berubah antara data sebelum dan sesudah overhaul. Meskipun demikian, penggunaan dua metode perhitungan memberikan dasar yang cukup kuat untuk menyimpulkan bahwa arah perubahan efisiensi setelah overhaul adalah positif.

3.10. Matriks Pengendalian Setelah Overhaul

Agar peningkatan efisiensi yang diperoleh setelah overhaul dapat dipertahankan, diperlukan matriks pengendalian parameter operasi. Matriks ini menghubungkan gejala operasi, kemungkinan penyebab, dan tindakan pemeliharaan yang dapat dilakukan. Pada boiler batubara, penurunan efisiensi umumnya tidak muncul sebagai satu gejala tunggal, tetapi sebagai kombinasi kenaikan temperatur gas buang, kenaikan coal flow, perubahan O₂ flue gas, penurunan temperatur main steam, dan perubahan respons fan. Oleh karena itu, evaluasi pasca-overhaul sebaiknya dilakukan secara periodik dengan membandingkan data aktual terhadap baseline hasil performance test.

Tabel 5. Matriks pengendalian operasi boiler pasca-overhaul

Indikator	Kemungkinan penyebab	Tindakan pengendalian
Temperatur gas buang naik	Fouling pada tube, sootblower kurang efektif, APH kotor	Optimasi sootblower, inspeksi surface pemanas, evaluasi APH
Coal flow naik pada beban sama	Nilai kalor turun, pembakaran tidak optimum	Cek GCV, kalibrasi coal feeder, evaluasi excess air
O ₂ flue gas tidak stabil	Distribusi udara tidak merata, damper atau fan tidak optimal	Periksa damper, fan loading, dan setting burner
Main steam flow turun	Penyerapan panas menurun atau kontrol pembakaran tidak stabil	Evaluasi heat balance dan kondisi tube boiler

Rugi panas L1 meningkat	Panas gas buang tidak termanfaatkan optimal	Periksa kebersihan economizer, air heater, dan area gas path
Unburned carbon meningkat	Pembakaran kurang sempurna atau pulverizer tidak optimal	Cek fineness batubara, burner, dan distribusi udara primer

Matriks tersebut dapat digunakan sebagai alat bantu awal bagi operator dan tim pemeliharaan. Jika temperatur gas buang meningkat secara bertahap, tindakan yang paling cepat adalah mengevaluasi pola sootblowing dan memeriksa apakah deposit pada surface pemanas mulai menebal. Jika coal flow meningkat pada beban yang sama, evaluasi harus mencakup nilai kalor batubara dan kalibrasi coal feeder. Jika O2 flue gas tidak stabil, kemungkinan masalah berada pada distribusi udara pembakaran, pengaturan damper, atau respons fan. Dengan pendekatan ini, tindakan korektif dapat dilakukan sebelum penurunan efisiensi menjadi besar.

Performance test setelah overhaul juga sebaiknya dijadikan baseline baru. Baseline ini penting karena kondisi unit setelah pembersihan dan perbaikan komponen menjadi acuan terbaik untuk membandingkan performa pada bulan-bulan berikutnya. Setiap penyimpangan dari baseline perlu dianalisis menggunakan heat loss method karena metode tersebut mampu menunjukkan sumber kehilangan panas secara lebih spesifik. Apabila metode direct hanya memperlihatkan efisiensi total, metode indirect dapat menunjukkan apakah kerugian berasal dari gas buang kering, moisture, pembakaran tidak sempurna, radiasi-konveksi, atau karbon tak terbakar. Dari sudut pandang manajemen pemeliharaan, hasil penelitian ini mendukung penerapan condition-based monitoring yang dipadukan dengan jadwal overhaul. Overhaul tetap diperlukan sebagai pemeliharaan besar, tetapi interval dan lingkup pekerjaan dapat dibuat lebih presisi jika tren heat loss, temperatur gas buang, dan konsumsi bahan bakar dipantau secara rutin. Dengan demikian, biaya pemeliharaan tidak hanya diarahkan untuk memperbaiki kerusakan, tetapi juga untuk menjaga indikator efisiensi yang berdampak langsung pada biaya produksi listrik.

Selain itu, keterlibatan lintas fungsi antara operator, pemeliharaan mekanik, laboratorium batubara, dan bagian efisiensi sangat penting. Operator menyediakan data operasi harian, laboratorium memastikan karakteristik bahan bakar, tim mekanik menindaklanjuti kondisi peralatan, sedangkan bagian efisiensi melakukan evaluasi perhitungan. Kolaborasi ini membuat keputusan pemeliharaan lebih akurat karena penyebab penurunan efisiensi dapat dipisahkan antara faktor bahan bakar, faktor operasi, dan faktor kondisi peralatan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan, overhaul terbukti meningkatkan efisiensi Boiler Unit 3 UJP PLTU Banten 3 Lontar. Efisiensi metode direct meningkat dari 79,51% menjadi 79,68%, atau naik sebesar 0,17 poin persentase. Efisiensi metode indirect meningkat dari 81,85% menjadi 82,61%, atau naik sebesar 0,76 poin persentase. Kenaikan metode indirect lebih besar karena penurunan rugi panas dapat terlihat secara lebih rinci pada komponen gas buang kering, moisture dari pembakaran hidrogen, moisture batubara, dan moisture udara.

Pekerjaan overhaul yang meliputi pembersihan tube boiler, superheater, reheater, economizer, air preheater, serta perbaikan fan dan sistem pembakaran memberikan kontribusi terhadap pemulihan performa boiler. Overhaul sebaiknya dilaksanakan secara rutin sesuai jadwal pemeliharaan, disertai pemantauan parameter operasi agar efisiensi boiler dapat dipertahankan pada kondisi optimal.

Secara teknis, indikator yang paling perlu dipantau setelah overhaul adalah temperatur gas buang, coal flow, O2 flue gas, CO2 flue gas, main steam flow, dan kecenderungan rugi panas L1 sampai L8. Apabila temperatur gas buang kembali meningkat pada beban yang relatif sama, maka inspeksi kebersihan surface pemanas dan efektivitas sootblower perlu dilakukan lebih awal. Apabila coal flow meningkat, evaluasi harus diarahkan pada kualitas batubara, setting pembakaran, serta kondisi coal feeder dan pulverizer.

Hasil artikel ini juga menunjukkan bahwa metode indirect lebih kuat untuk menganalisis hasil overhaul karena mampu memperlihatkan sumber kerugian panas secara terpisah. Oleh karena itu, pengujian performa setelah overhaul sebaiknya tidak hanya melaporkan efisiensi total, tetapi juga menyajikan rincian heat loss agar tindakan korektif berikutnya lebih tepat sasaran. Dengan basis data tersebut, interval pemeliharaan dapat disesuaikan berdasarkan kecenderungan kondisi peralatan, bukan hanya berdasarkan jadwal tetap.

Untuk penelitian berikutnya, evaluasi dapat diperluas pada beberapa variasi beban dan beberapa periode operasi setelah overhaul. Perbandingan multibeban akan membantu memisahkan pengaruh overhaul dari pengaruh variasi kualitas batubara dan pola operasi harian. Selain itu, analisis ekonomi terhadap penghematan batubara akibat peningkatan efisiensi juga dapat ditambahkan agar manfaat overhaul dapat dinilai dari sisi teknis dan biaya produksi listrik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi PLN, serta pihak UJP PLTU Banten 3 Lontar yang telah menyediakan data dan dukungan teknis sehingga penelitian ini dapat disusun menjadi artikel jurnal.

Daftar Rujukan

- 1) E. Nugroho, Optimalisasi Kinerja Soot Blower pada Boiler PLTU Tanjung Jati B, Yogyakarta, 2013.
- 2) Nurmalita, Analisis Efisiensi Energi pada PLTU PT Energi Alamraya Semesta, Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2012.
- 3) S. F. dan P. Ramadhan, Analisa Efisiensi Boiler dengan Metode Heat Loss Sebelum dan Sesudah Overhaul PT Indonesia Power UJP PLTU Lontar Unit 3, Jurnal Power Plant, 2017, pp. 218-227.
- 4) M. F. Ramadhan, Analisis Nilai Excess Air terhadap Efisiensi Boiler pada PLTU Batubara Unit Pembangkitan Pelabuhan Ratu 3 x 350 MW, Jakarta: STT-PLN, 2018
- 5) PT PLN, Modul Training Boiler, Palabuhan Ratu, 2012.
- 6) PT PLN, Modul Operasi Pembakaran, Palabuhan Ratu, 2013.
- 7) Bureau of Energy Efficiency, Energy Performance Assessment of Boilers.
- 8) ASME, Performance Test Code for Fired Steam Generators, ASME PTC 4, 2013.
- 9) 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
- 10) M. M. El-Wakil, Powerplant Technology, New York: McGraw-Hill, 1984.
- 11) P. K. Nag, Power Plant Engineering, New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2008.