

Evaluasi Nilai Kalor Batubara terhadap Efisiensi Boiler PLTU Suralaya

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Wahyu Haristiyanto³

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

Email: eriprabowo@itpln.ac.id , trassanda2410505@ITPLN.AC.ID , : wahyufsw@gmail.com

Abstract

Coal calorific value affects the heat input, combustion quality, heat losses, and fuel consumption of steam power plant boilers. This paper evaluates the effect of coal calorific value on boiler efficiency at Units 1, 3, and 4 of PLTU Suralaya. The study uses performance test data at a comparable load of 400 MW with coal calorific values of 4238, 4472, 4656, and 5051 kcal/kg. Boiler efficiency is calculated using the direct method and the indirect heat loss method based on ASME PTC 4.1. The indirect method shows that boiler efficiency increases from 83.269% at 4238 kcal/kg to 86.625% at 5051 kcal/kg. Total heat loss decreases from 16.731% to 13.375%, while specific fuel consumption decreases from 0.613 to 0.553 kg/kWh. The results indicate that higher coal calorific value improves boiler efficiency and reduces coal consumption, mainly because lower moisture and higher fixed carbon reduce heat losses in flue gas and moisture evaporation.

Keywords: boiler efficiency; calorific value; coal; heat loss; specific fuel consumption

Abstrak

Nilai kalor batubara mempengaruhi masukan energi, kualitas pembakaran, rugi panas, dan konsumsi bahan bakar pada boiler PLTU. Artikel ini mengevaluasi pengaruh nilai kalor batubara terhadap efisiensi boiler Unit 1, 3, dan 4 PLTU Suralaya. Data yang digunakan berasal dari performance test pada beban pembanding 400 MW dengan variasi nilai kalor 4238, 4472, 4656, dan 5051 kcal/kg. Efisiensi boiler dihitung menggunakan metode direct dan metode indirect berbasis heat loss sesuai pendekatan ASME PTC 4.1. Hasil metode indirect menunjukkan efisiensi boiler meningkat dari 83,269% pada nilai kalor 4238 kcal/kg menjadi 86,625% pada nilai kalor 5051 kcal/kg. Total rugi panas turun dari 16,731% menjadi 13,375%, sedangkan specific fuel consumption turun dari 0,613 menjadi 0,553 kg/kWh. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai kalor batubara dapat menaikkan efisiensi boiler dan menurunkan konsumsi batubara, terutama karena kadar moisture yang lebih rendah dan fixed carbon yang lebih tinggi mengurangi rugi panas gas buang serta penguapan air dalam bahan bakar.

Kata kunci: batubara; efisiensi boiler; heat loss; nilai kalor; specific fuel consumption

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menuntut pembangkit listrik beroperasi dengan efisiensi tinggi [3,6]. PLTU merupakan salah satu pembangkit termal yang banyak digunakan karena mampu menghasilkan daya besar secara kontinu [5]. Pada PLTU, boiler berfungsi mengubah air menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi melalui pembakaran batubara. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin dan generator sehingga energi kimia bahan bakar dikonversi menjadi energi listrik [6,10].

PLTU Suralaya merupakan pembangkit besar yang memasok sistem kelistrikan Jawa, Madura, dan Bali [2,5]. Unit 1-4 PLTU Suralaya memiliki kapasitas 400 MW per unit, sedangkan bahan bakar utamanya adalah batubara dengan nilai kalor yang bervariasi [2,4]. Variasi nilai kalor muncul karena batubara berasal dari pemasok berbeda dan memiliki karakteristik proximate serta ultimate yang tidak sama. Kondisi ini membuat evaluasi pengaruh nilai kalor menjadi penting dalam pengendalian performa boiler [7,8].

Nilai kalor batubara berkaitan langsung dengan jumlah energi yang dapat dilepaskan pada proses pembakaran [7,8]. Batubara dengan nilai kalor rendah umumnya memiliki kandungan moisture lebih tinggi, sehingga sebagian panas pembakaran dipakai untuk menguapkan air dalam bahan bakar [12,13]. Sebaliknya, batubara dengan nilai

kalor lebih tinggi cenderung menghasilkan energi per satuan massa lebih besar dan membutuhkan coal flow lebih rendah untuk menghasilkan daya yang sama [4,11].

Penelitian ini merangkum kembali hasil skripsi mengenai pengaruh nilai kalor batubara terhadap efisiensi boiler Unit 1, 3, dan 4 PLTU Suralaya dalam format artikel JTM. Fokus pembahasan diarahkan pada perbandingan metode direct dan indirect, komponen heat loss, hubungan nilai kalor terhadap efisiensi, serta perubahan specific fuel consumption (SFC). Metode direct dan indirect digunakan karena evaluasi efisiensi boiler perlu membandingkan energi keluaran sekaligus menelusuri sumber rugi panas secara rinci [6,10,11,14-17]. Judul artikel dibuat berbeda dari judul skripsi, tetapi substansi penelitian tetap dipertahankan.

2. Metode Penelitian

2.1. Objek dan Data

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis data performance test boiler PLTU Suralaya. Data pembandingan diambil pada kondisi beban 400 MW dengan empat variasi nilai kalor batubara, yaitu 4238 kcal/kg pada Unit 1, 4472 kcal/kg pada Unit 4, 4656 kcal/kg pada Unit 3, dan 5051 kcal/kg pada Unit 4. Parameter utama meliputi main steam flow, steam pressure, steam temperature, feed water temperature, coal flow, air flow, gas buang, serta hasil analisis proximate dan ultimate batubara.

Tabel 1. Ringkasan parameter operasi dan kualitas Batubara

Parameter	4238	4472	4656	5051	Satuan
Main steam flow	1342,03	1282,46	1296,62	1243,84	t/h
Steam temperature	535,09	539,03	536,86	537,29	C
Coal flow	209,63	209,41	204,81	191,41	t/h
Moisture content	32,54	31,85	30,86	27,05	%
Fixed carbon	27,74	29,42	30,96	34,75	%
Ash content	6,77	4,77	3,71	4,69	%
Carbon content	44,09	46,42	48,13	51,31	%

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan nilai kalor cenderung diikuti penurunan coal flow dan moisture content serta kenaikan fixed carbon. Pada kondisi 5051 kcal/kg, coal flow menjadi 191,41 t/h, lebih rendah dibanding 209,63 t/h pada 4238 kcal/kg. Perbedaan ini menjadi dasar analisis karena untuk beban yang sama, batubara bernilai kalor lebih tinggi membutuhkan massa bahan bakar lebih sedikit.

2.2. Persamaan Efisiensi Boiler

Efisiensi boiler dihitung dengan dua pendekatan. Metode direct membandingkan energi yang diserap oleh air-uap terhadap energi bahan bakar yang masuk. Metode ini sederhana untuk monitoring, tetapi tidak memperlihatkan sumber kerugian panas. Persamaan metode direct ditulis sebagai berikut.

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

dengan η_d adalah efisiensi metode direct, G_{ms} adalah laju aliran uap, h_g adalah entalpi uap, h_f adalah entalpi feed water, G_{fuel} adalah laju bahan bakar, dan GCV adalah gross calorific value batubara. Metode indirect menghitung efisiensi berdasarkan total rugi panas. Komponen kerugian yang diperhitungkan meliputi gas buang kering, moisture dari pembakaran hidrogen, moisture dalam bahan bakar, moisture udara pembakaran, pembakaran tidak sempurna, radiasi-konveksi, karbon tidak terbakar pada fly ash, dan karbon tidak terbakar pada bottom ash.

$$\eta_i = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) \quad (2)$$

$$O_{2t} = 11,6C + 34,8(H_2 - O_2/8) + 4,35S \quad (3)$$

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

$$AAS = (1 + EA/100) \times O_{2t} \quad (5)$$

Specific fuel consumption dihitung untuk melihat kebutuhan batubara per energi listrik yang dibangkitkan. Nilai SFC lebih rendah menunjukkan konsumsi bahan bakar yang lebih hemat pada output listrik yang sama.

$$SFC = Q_f / kWh_{gross} \quad (6)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perbandingan Efisiensi Direct dan Indirect

Hasil metode direct dan indirect menunjukkan pola berbeda. Pada metode direct, efisiensi menurun ketika nilai kalor meningkat, yaitu dari 84,376% pada 4238 kcal/kg menjadi 71,150% pada 5051 kcal/kg. Pola ini dipengaruhi oleh rasio langsung antara energi uap, coal flow, dan GCV, sehingga sensitif terhadap variasi data operasi antarunit dan waktu pengujian. Karena metode direct tidak memerinci rugi panas, hasilnya lebih tepat digunakan sebagai indikator awal.

Tabel 2. Efisiensi boiler berdasarkan metode direct dan indirect

Nilai kalor (kcal/kg)	Unit	Direct (%)	Indirect (%)	Selisih absolut (%)
4238	1	84,376	83,269	1,107
4472	4	76,820	84,358	7,538
4656	3	75,141	85,392	10,251
5051	4	71,150	86,625	15,475

Metode indirect memperlihatkan pola yang lebih konsisten secara termal. Efisiensi boiler meningkat dari 83,269% pada nilai kalor 4238 kcal/kg menjadi 84,358%, 85,392%, dan 86,625% pada nilai kalor 4472, 4656, dan 5051 kcal/kg. Kenaikan ini terjadi karena total heat loss menurun ketika kualitas batubara membaik. Oleh karena itu, metode indirect lebih representatif untuk menjelaskan pengaruh kualitas batubara terhadap efisiensi boiler karena setiap komponen kerugian panas dianalisis secara terpisah.

3.2. Analisis Heat Loss

Komponen heat loss terbesar berasal dari gas buang kering, moisture pembakaran hidrogen, dan moisture dalam bahan bakar. Pada nilai kalor 4238 kcal/kg, L1 sebesar 5,700%, L2 sebesar 5,086%, dan L3 sebesar 5,200%. Ketika nilai kalor meningkat menjadi 5051 kcal/kg, L1 turun menjadi 4,834%, L2 menjadi 4,365%, dan L3 menjadi 3,594%. Penurunan paling nyata terdapat pada moisture dalam bahan bakar karena kadar moisture turun dari 32,54% menjadi 27,05%.

Tabel 3. Komponen heat loss metode indirect

Heat loss	4238	4472	4656	5051	Keterangan
L1	5,700	5,245	4,892	4,834	Gas buang kering
L2	5,086	4,913	4,695	4,365	Moisture dari H ₂
L3	5,200	4,856	4,460	3,594	Moisture bahan bakar
L4	0,318	0,288	0,274	0,271	Moisture udara
L6	0,180	0,180	0,180	0,180	Radiasi-konveksi
L7	0,2038	0,133	0,0881	0,107	Karbon fly ash
L8	0,0434	0,0274	0,0197	0,024	Karbon bottom ash
Total	16,731	15,642	14,608	13,375	Total heat loss

Gas buang kering menunjukkan panas yang keluar bersama flue gas dan tidak terserap sempurna oleh permukaan pemanas boiler. Semakin tinggi temperatur gas buang, semakin besar energi yang terbuang. Pada data penelitian ini, L1 menurun ketika nilai kalor meningkat, menunjukkan bahwa pemanfaatan panas di boiler menjadi lebih baik pada batubara dengan GCV lebih tinggi. Moisture berpengaruh besar karena sebagian panas pembakaran digunakan untuk menaikkan temperatur air dan menguapkannya. Jika moisture tinggi, panas yang seharusnya menghasilkan uap utama berkurang. Hal ini menjelaskan mengapa batubara 4238 kcal/kg menghasilkan total heat loss tertinggi. Nilai kalor 5051 kcal/kg memiliki moisture paling rendah sehingga rugi panas akibat moisture juga paling kecil.

3.3. Pengaruh Nilai Kalor terhadap Konsumsi Batubara

Konsumsi batubara spesifik menunjukkan jumlah batubara yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik. Semakin rendah SFC, semakin baik pemanfaatan bahan bakar. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa SFC menurun dari 0,613 kg/kWh pada nilai kalor 4238 kcal/kg menjadi 0,553 kg/kWh pada nilai kalor 5051 kcal/kg. Penurunan ini konsisten dengan penurunan coal flow dari 209,63 t/h menjadi 191,41 t/h.

Tabel 4. Hubungan nilai kalor, coal flow, efisiensi, dan SFC

Nilai kalor (kcal/kg)	Coal flow (t/h)	Efisiensi indirect (%)	SFC (kg/kWh)	Interpretasi
4238	209,63	83,269	0,613	Konsumsi tertinggi
4472	209,41	84,358	0,608	Efisiensi meningkat
4656	204,81	85,392	0,599	Heat loss menurun
5051	191,41	86,625	0,553	Konsumsi terendah

Pada beban 400 MW, batubara dengan nilai kalor lebih tinggi menyediakan energi lebih besar per kilogram. Akibatnya, kebutuhan mass flow bahan bakar menjadi lebih rendah. Kondisi ini bermanfaat secara ekonomi karena menurunkan konsumsi bahan bakar, volume penanganan batubara, dan potensi pembentukan residu pembakaran. Namun, pemilihan batubara tetap perlu disesuaikan dengan desain boiler agar tidak menimbulkan masalah slagging, fouling, atau perubahan karakter pembakaran.

3.4. Pengaruh Karakteristik Proximate dan Ultimate

Analisis proximate menunjukkan hubungan penting antara moisture, fixed carbon, volatile matter, ash, dan nilai kalor. Moisture tertinggi terjadi pada 4238 kcal/kg sebesar 32,54%, sedangkan moisture terendah terjadi pada 5051 kcal/kg sebesar 27,05%. Fixed carbon meningkat dari 27,74% menjadi 34,75%. Perubahan ini menunjukkan bahwa batubara bernilai kalor tinggi memiliki fraksi karbon tetap lebih besar, sehingga energi pembakaran yang dapat dimanfaatkan boiler menjadi lebih besar. Kadar ash juga perlu diperhatikan karena abu dapat menempel pada permukaan perpindahan panas dan menurunkan kinerja boiler. Ash content tertinggi terdapat pada 4238 kcal/kg sebesar 6,77%, sedangkan nilai terendah terdapat pada 4656 kcal/kg sebesar 3,71%. Meskipun 5051 kcal/kg memiliki efisiensi tertinggi, ash content tetap perlu dimonitor karena pengaruhnya terhadap pembentukan deposit tidak hanya ditentukan oleh jumlah abu, tetapi juga komposisi mineral dan temperatur leleh abu.

Analisis ultimate memperlihatkan bahwa carbon content meningkat dari 44,09% pada 4238 kcal/kg menjadi 51,31% pada 5051 kcal/kg. Peningkatan karbon menunjukkan potensi energi kimia yang lebih tinggi. Sebaliknya, sulfur content menurun dari 0,52% menjadi 0,33%, yang menguntungkan karena sulfur dapat meningkatkan risiko korosi dan emisi SO_x. Dengan demikian, nilai kalor yang lebih tinggi pada data penelitian ini juga diikuti kecenderungan kualitas pembakaran yang lebih baik.

3.5. Pembahasan Metode dan Implikasi Operasi

Perbedaan hasil direct dan indirect perlu dipahami agar tidak menimbulkan interpretasi yang keliru. Metode direct hanya menghitung perbandingan energi keluaran uap terhadap energi masukan bahan bakar. Metode ini tidak menunjukkan apakah kerugian terbesar berasal dari gas buang, moisture, radiasi, atau karbon tidak terbakar. Oleh sebab itu, pada data antarunit yang tidak sepenuhnya identik, hasil direct dapat menunjukkan tren berbeda dari hasil indirect.

Metode indirect lebih informatif karena menguraikan mekanisme kehilangan energi. Pada penelitian ini, penurunan total heat loss menjadi indikator utama bahwa kenaikan GCV memperbaiki efisiensi. Batubara 5051 kcal/kg menghasilkan total heat loss 13,375%, lebih rendah dibanding 16,731% pada batubara 4238 kcal/kg. Selisih ini menghasilkan peningkatan efisiensi indirect sebesar 3,356 poin persentase. Implikasi operasionalnya adalah pemilihan batubara tidak cukup hanya mempertimbangkan harga per ton. Perhitungan perlu memasukkan GCV, moisture, ash, sulfur, coal flow, SFC, dan potensi gangguan peralatan. Batubara bernilai kalor lebih tinggi dapat menurunkan SFC, tetapi harus tetap sesuai dengan spesifikasi boiler, kemampuan mill, sistem udara pembakaran, dan batas emisi. Evaluasi berkala diperlukan agar keputusan blending dan pengadaan batubara berbasis pada efisiensi aktual, bukan hanya data laboratorium.

3.6. Evaluasi Faktor Penyebab Perubahan Efisiensi

Berdasarkan hubungan data, faktor utama yang menyebabkan perubahan efisiensi adalah nilai kalor, moisture, fixed carbon, dan temperatur gas buang. Moisture tinggi menaikkan L3 karena energi pembakaran dipakai untuk menguapkan air. Temperatur gas buang tinggi menaikkan L1 karena kalor keluar melalui flue gas. Fixed carbon yang lebih tinggi meningkatkan energi pembakaran efektif. Faktor ash dan sulfur lebih banyak berkaitan dengan risiko deposit, korosi, dan emisi, tetapi tetap berpengaruh terhadap kestabilan operasi jangka panjang.

Tabel 5. Faktor teknis yang mempengaruhi efisiensi boiler

Faktor	Dampak pada boiler	Arah pengaruh	Rekomendasi operasi
Nilai kalor	Menentukan energi per kg batubara	GCV naik, efisiensi naik	Pilih batubara sesuai desain
Moisture	Meningkatkan panas untuk penguapan air	Moisture naik, rugi panas naik	Kontrol kualitas pasokan dan stockpile
Fixed carbon	Meningkatkan energi pembakaran efektif	FC naik, efisiensi naik	Evaluasi proximate secara rutin
Temperatur gas buang	Menunjukkan panas keluar cerobong	T naik, L1 naik	Optimasi sootblowing dan excess air
Ash dan sulfur	Mempengaruhi deposit, korosi, dan emisi	Nilai tinggi berisiko	Kontrol blending dan inspeksi boiler

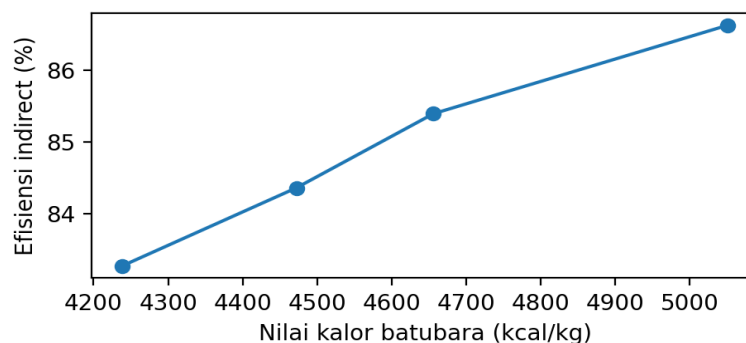
Kinerja boiler juga dipengaruhi oleh kondisi peralatan. Permukaan pemanas yang kotor, performa air heater, kondisi pulverizer, dan distribusi udara pembakaran dapat mengubah temperatur gas buang serta kualitas pembakaran. Karena penelitian membandingkan beberapa unit dan periode, interpretasi hasil harus menempatkan nilai kalor sebagai faktor dominan, tetapi bukan satu-satunya faktor operasi. Hal ini menjadi alasan penggunaan metode indirect yang mampu memperlihatkan komponen kerugian panas secara lebih detail.

3.7. Relevansi Hasil terhadap Format Artikel JTM

Artikel ini menyederhanakan uraian skripsi menjadi pembahasan yang lebih fokus untuk pembaca jurnal teknik. Data operasi yang panjang diringkas menjadi tabel parameter utama, sedangkan rumus ditulis ulang dalam format persamaan bernomor. Pembahasan tidak lagi menampilkan seluruh langkah perhitungan manual, tetapi menghubungkan data utama dengan interpretasi termal, sehingga artikel lebih ringkas dan tetap replikatif. Penyajian 7 halaman juga menuntut seleksi substansi. Bagian yang dipertahankan adalah tujuan penelitian, metode direct dan indirect, tabel hasil efisiensi, heat loss, SFC, serta analisis faktor penyebab. Judul artikel tidak sama dengan judul skripsi, tetapi tetap merepresentasikan substansi penelitian, yaitu evaluasi nilai kalor batubara terhadap efisiensi boiler PLTU Suralaya.

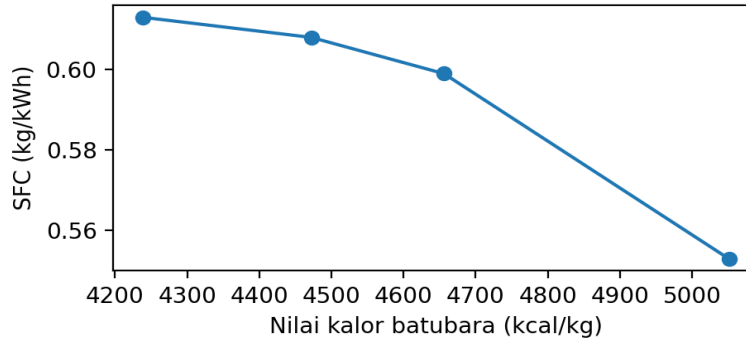
3.8. Visualisasi Tren Efisiensi dan Konsumsi Bahan Bakar

Tren hasil perhitungan perlu divisualisasikan agar hubungan antarparameter lebih mudah dibaca. Pada metode indirect, kenaikan nilai kalor menunjukkan hubungan positif terhadap efisiensi boiler. Nilai efisiensi meningkat bertahap dari 83,269% sampai 86,625%. Perubahan ini selaras dengan penurunan total heat loss sehingga menunjukkan bahwa pembakaran batubara bernilai kalor tinggi mampu mengurangi porsi energi yang hilang melalui gas buang dan moisture.



Gambar 1. Tren efisiensi boiler metode indirect terhadap nilai kalor

Gambar 1 memperlihatkan bahwa efisiensi metode indirect meningkat secara bertahap mengikuti kenaikan nilai kalor batubara. Kecenderungan ini lebih sesuai dengan teori pembakaran boiler dibandingkan hasil metode direct karena perhitungan indirect mempertimbangkan rugi panas aktual. Pada kondisi ini, GCV yang lebih tinggi disertai moisture lebih rendah sehingga panas laten penguapan air dalam batubara berkurang.



Gambar 2. Tren SFC terhadap nilai kalor batubara

Gambar 2 memperlihatkan bahwa SFC menurun ketika nilai kalor meningkat. Penurunan dari 0,613 kg/kWh menjadi 0,553 kg/kWh menunjukkan adanya penghematan kebutuhan batubara per satuan energi listrik. Secara operasi, tren ini penting karena SFC berhubungan langsung dengan biaya bahan bakar, beban peralatan coal handling, dan jumlah residu pembakaran yang harus ditangani.

3.9. Implikasi Pengendalian Kualitas Batubara

Kualitas batubara perlu dikendalikan mulai dari pemilihan pemasok, pengujian laboratorium, penyimpanan di coal yard, hingga proses blending. Batubara dengan nilai kalor tinggi tidak otomatis menjadi satu-satunya pilihan terbaik apabila karakteristik abu, sulfur, grindability, dan kecocokan terhadap desain burner tidak diperiksa. Oleh karena itu, evaluasi teknis harus menggabungkan parameter energi dan parameter operasional.

Tabel 6. Parameter kontrol kualitas batubara untuk operasi boiler

Parameter kontrol	Kondisi yang diharapkan	Dampak jika tidak terkendali	Tindakan pengendalian
GCV	Sesuai rentang desain boiler	Efisiensi dan coal flow berubah	Seleksi pemasok dan blending
Moisture	Rendah dan stabil	Heat loss L3 meningkat	Manajemen stockpile dan sampling
Ash	Tidak tinggi dan tidak mudah slagging	Deposit pada wall tube dan reheater	Uji abu dan sootblowing terjadwal
Sulfur	Rendah	Korosi dan emisi SO _x meningkat	Kontrol spesifikasi pembelian
HGI	Sesuai kemampuan pulverizer	Ukuran serbuk tidak sesuai	Pemantauan mill dan fineness
Volatile matter	Mendukung kestabilan nyala	Pembakaran tidak stabil	Pengaturan udara dan burner

Pada praktik PLTU, pengendalian kualitas batubara juga harus memperhatikan variasi harian. Batubara dari tongkang berbeda dapat memiliki moisture dan ash yang berbeda walaupun GCV rata-ratanya serupa. Jika variasi ini tidak dikontrol, operator akan menghadapi perubahan coal flow, excess air, temperatur gas buang, dan respons pembakaran yang tidak stabil. Kondisi tersebut dapat membuat efisiensi aktual berbeda dari hasil perhitungan laboratorium.

Hasil penelitian ini mendukung perlunya kebijakan blending yang mempertimbangkan efisiensi boiler dan SFC. Blending tidak hanya bertujuan mencapai nilai kalor target, tetapi juga menekan moisture dan ash agar heat loss tetap rendah. Pada saat yang sama, nilai sulfur dan karakteristik abu perlu dijaga untuk mencegah korosi serta slagging. Dengan pendekatan ini, operasi boiler dapat lebih stabil dan konsumsi bahan bakar lebih terkendali.

3.10. Evaluasi Keterbatasan Data dan Rekomendasi Teknis

Perbandingan data antarunit dan antarwaktu memiliki keterbatasan karena kondisi mekanis boiler, kebersihan permukaan pemanas, performa air heater, kondisi burner, serta karakteristik mill dapat berbeda. Walaupun semua

data dibandingkan pada beban 400 MW, kondisi aktual di lapangan tetap dapat mempengaruhi hasil. Oleh karena itu, hasil metode direct perlu dibaca hati-hati, sedangkan metode indirect lebih kuat karena menelusuri komponen heat loss.

Untuk evaluasi lanjutan, pengambilan data sebaiknya dilakukan pada unit yang sama dengan variasi batubara yang dikontrol melalui blending terencana. Dengan demikian, pengaruh nilai kalor dapat dipisahkan dari pengaruh perbedaan peralatan antarunit. Data tambahan seperti fineness pulverizer, excess air aktual, temperatur air heater, slagging index, fouling index, dan histori sootblowing juga dapat memperkuat analisis. Rekomendasi teknis dari hasil ini adalah melakukan evaluasi efisiensi boiler secara periodik menggunakan metode indirect, karena metode tersebut menunjukkan lokasi rugi panas yang dominan. Jika L1 meningkat, pemeriksaan perlu diarahkan pada temperatur gas buang, air heater, excess air, dan kebersihan permukaan pemanas. Jika L3 meningkat, pengendalian moisture batubara menjadi prioritas. Jika SFC meningkat pada beban yang sama, evaluasi kualitas batubara dan performa pembakaran perlu dilakukan segera.

Tabel 7. Rekomendasi tindak lanjut berdasarkan indikator performa

Indikator	Gejala utama	Kemungkinan penyebab	Tindak lanjut
Efisiensi indirect turun	Heat loss total meningkat	Moisture tinggi atau gas buang tinggi	Audit heat loss dan kualitas batubara
SFC meningkat	Coal flow naik pada beban sama	GCV rendah atau pembakaran tidak optimal	Evaluasi blending dan mill performance
L1 meningkat	Panas keluar cerobong besar	Permukaan pemanas kotor atau excess air tinggi	Sootblowing dan optimasi udara
L3 meningkat	Rugi moisture tinggi	Batubara terlalu basah	Perbaiki stockpile dan sampling
Ash tinggi	Deposit dan slagging meningkat	Kualitas abu tidak sesuai	Kontrol pemasok dan inspeksi boiler

Dengan rekomendasi tersebut, hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan operasional. Pemilihan batubara bernilai kalor lebih tinggi terbukti meningkatkan efisiensi dan menurunkan SFC pada data penelitian, tetapi implementasinya harus tetap mengikuti batas desain boiler. Keputusan terbaik adalah kombinasi antara kualitas energi, kestabilan pembakaran, biaya bahan bakar, risiko deposit, dan keandalan jangka panjang peralatan.

3.11. Kesesuaian Penyajian Rumus untuk Dokumen Word

Rumus pada artikel ini disusun ulang agar lebih lazim untuk naskah Microsoft Word. Persamaan dibuat terpisah dari paragraf, dipusatkan, dan diberi nomor sehingga dapat dirujuk dalam pembahasan. Notasi juga dibuat konsisten, misalnya η_d untuk efisiensi metode direct, η_i untuk efisiensi metode indirect, GCV untuk nilai kalor, serta L1 sampai L8 untuk komponen heat loss. Penyusunan ini menghindari rumus panjang yang menyatu dengan paragraf dan sulit dibaca. Satuan juga diseragamkan agar pembaca dapat mengikuti hubungan antarvariabel. Nilai kalor ditulis dalam kcal/kg, coal flow dalam t/h, efisiensi dalam persen, serta SFC dalam kg/kWh. Pada bagian hasil, angka penting disajikan secara ringkas sehingga tabel tidak melebar dan tetap terbaca pada format jurnal.

Tabel 8. Penyeragaman notasi dan satuan dalam artikel

Simbol	Keterangan	Satuan	Penggunaan dalam artikel
eta_d	Efisiensi boiler metode direct	%	Membandingkan energi uap dan energi bahan bakar
eta_i	Efisiensi boiler metode indirect	%	Menghitung efisiensi dari total heat loss
G_ms	Main steam flow	t/h	Input perhitungan direct
G_fuel	Coal flow	t/h	Input energi bahan bakar dan SFC
GCV	Gross calorific value	kcal/kg	Nilai kalor batubara
L1-L8	Komponen rugi panas	%	Analisis metode indirect
SFC	Specific fuel consumption	kg/kWh	Indikator konsumsi batubara spesifik

Format tabel juga disederhanakan dengan hanya menampilkan parameter yang berpengaruh langsung terhadap tujuan penelitian. Data operasi lengkap tetap menjadi dasar perhitungan, tetapi artikel jurnal membutuhkan penyajian yang lebih padat. Oleh karena itu, tabel utama difokuskan pada nilai kalor, coal flow, komponen heat loss, efisiensi, dan SFC. Penyajian seperti ini membuat naskah lebih sesuai dengan gaya JTM karena pembahasan langsung berhubungan dengan hasil kuantitatif.

3.12. Ringkasan Kontribusi Teknis

Kontribusi teknis artikel ini adalah menunjukkan bahwa evaluasi kualitas batubara harus dikaitkan dengan performa boiler, bukan hanya dengan nilai kalor sebagai spesifikasi pembelian. Hasil perhitungan membuktikan bahwa kenaikan GCV berhubungan dengan penurunan heat loss dan SFC. Temuan ini dapat digunakan sebagai dasar awal untuk menentukan strategi pasokan dan blending batubara agar operasi boiler lebih efisien pada beban tinggi. Temuan lain yang penting adalah perbedaan direct dan indirect. Jika hanya memakai metode direct, tren efisiensi terlihat menurun ketika GCV meningkat. Namun, ketika komponen heat loss dihitung satu per satu, metode indirect menunjukkan tren yang lebih sesuai dengan mekanisme termal. Hal ini menegaskan bahwa laporan kinerja boiler sebaiknya tidak hanya menampilkan efisiensi output-input, tetapi juga komposisi rugi panas agar penyebab perubahan performa dapat diidentifikasi.

Dalam penerapan di PLTU, hasil ini dapat diterjemahkan menjadi tiga langkah. Pertama, kualitas batubara harus diperiksa secara rutin melalui data proximate dan ultimate. Kedua, metode indirect perlu digunakan sebagai evaluasi berkala agar heat loss dominan dapat diketahui. Ketiga, SFC perlu dipantau bersama GCV dan coal flow untuk melihat dampak ekonomi dari perubahan kualitas bahan bakar. Dengan kombinasi tersebut, keputusan operasi menjadi lebih berbasis data. Secara akademik, artikel ini juga memberikan contoh bagaimana skripsi yang panjang dapat diubah menjadi artikel jurnal yang ringkas. Uraian teoritis yang terlalu luas dipadatkan, rumus disusun kembali secara rapi, tabel diperpendek, dan pembahasan diarahkan pada hubungan sebab-akibat. Hal ini menjaga substansi penelitian tetap kuat sekaligus membuat naskah lebih siap untuk proses submit jurnal.

4. Kesimpulan

Nilai kalor batubara berpengaruh terhadap efisiensi boiler PLTU Suralaya. Berdasarkan metode indirect, efisiensi meningkat dari 83,269% pada nilai kalor 4238 kcal/kg menjadi 86,625% pada nilai kalor 5051 kcal/kg. Kenaikan efisiensi ini sejalan dengan penurunan total heat loss dari 16,731% menjadi 13,375%. Kenaikan nilai kalor juga menurunkan konsumsi batubara spesifik. Nilai SFC turun dari 0,613 kg/kWh menjadi 0,553 kg/kWh ketika nilai kalor meningkat dari 4238 kcal/kg menjadi 5051 kcal/kg. Hal ini menunjukkan bahwa batubara bernilai kalor lebih tinggi membutuhkan coal flow lebih rendah untuk menghasilkan daya listrik yang sama.

Metode indirect lebih sesuai untuk mengevaluasi pengaruh nilai kalor karena mampu memperlihatkan sumber rugi panas secara rinci. Komponen rugi panas dominan adalah gas buang kering, moisture hasil pembakaran hidrogen, dan moisture dalam bahan bakar. Pemilihan batubara untuk operasi boiler sebaiknya mempertimbangkan GCV, moisture, ash, sulfur, SFC, dan kesesuaian terhadap desain boiler agar efisiensi tinggi dapat dicapai tanpa mengganggu keandalan peralatan. Secara praktis, unit pembangkit perlu menetapkan batas kualitas batubara yang tidak hanya berisi nilai kalor minimum, tetapi juga batas moisture, ash, sulfur, dan HGI. Parameter tersebut perlu dipantau bersama data operasi boiler, terutama flue gas temperature, excess air, coal flow, dan SFC. Jika SFC

mulai meningkat pada beban yang sama, maka evaluasi kualitas batubara dan kebersihan permukaan pemanas perlu segera dilakukan.

Penelitian lanjutan disarankan menggunakan data pada unit yang sama dan periode operasi yang berdekatan agar pengaruh perbedaan kondisi peralatan dapat dikurangi. Selain itu, analisis ekonomi bahan bakar dapat ditambahkan dengan membandingkan biaya per kWh untuk setiap nilai kalor. Dengan demikian, pemilihan batubara dapat mempertimbangkan efisiensi teknis sekaligus biaya operasi pembangkit.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi PLN dan PT Indonesia Power PLTU Suralaya yang telah menyediakan data pendukung penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pembimbing dan pihak terkait yang membantu penyusunan artikel ini.

Daftar Rujukan

- 1) Antono V. Analisis losses pada Boiler Feed Pump PLTU Muara Karang Unit 5. *Jurnal Power Plant*. 2013;79-93.
- 2) Astuti ED. Pengaruh nilai kalor batu bara terhadap efisiensi boiler Unit 1 PLTU Suralaya. Jakarta: Institut Teknologi PLN; 2020.
- 3) Bahrudin I. Peningkatan efisiensi boiler. Kalimantan Timur: Academia; 2014.
- 4) Kurniawan B. Analisis pengaruh nilai kalori batubara. Jakarta: Sekolah Tinggi Teknik PLN; 2018.
- 5) Liun E. Biaya eksternal PLTU Batubara Suralaya. *Pengembangan Energi Nuklir*. 2020;4:27-42.
- 6) Muzaki I. Analisis efisiensi boiler dengan metode input-output. *SJME Kinematika*. 2019;37-46.
- 7) Naufal ID. Analisis pengaruh kualitas batu bara terhadap performa. *Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*. 2019;520-529.
- 8) Nugroho AA. Analisa pengaruh kualitas batubara. *Media ElektriKA*. 2014;7:23-32.
- 9) Nurhasanah R. Perbandingan efisiensi boiler awal operasi dan setelah overhaul terakhir di Unit 5. *Jurnal Power Plant*. 2016;44-48.
- 10) Pravitasaria Y. Analisis efisiensi boiler menggunakan metode langsung. *PRISMA Fisika*. 2017;5(1):09-12.
- 11) Sagaf M. Analisa faktor-faktor penyebab perubahan efisiensi boiler. *Teknoin*. 2018;147-158.
- 12) YJ Liao. Effect of coal moisture on denitration efficiency and boiler economy. *International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*. 2015;733-739.
- 13) Sahar Sheta. Coal analysis by laser-induced breakdown. *View Article Online*. 2019;1047-1082.
- 14) Treedet R, Suntivarakorn R. Improvement of boiler efficiency using heat recovery and optimization. *Energy Procedia*. 2016;193-197.
- 15) Junga RP. Improvement of coal boiler efficiency after application of liquid fuel additive. *Applied Thermal Engineering*. 2020.
- 16) Satyam P, Dhanesh J. Performance analysis and optimization of boiler efficiency. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2021;326-331.
- 17) 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.