

Evaluasi Rasio Coal Blending terhadap Efisiensi Boiler Unit 7 Suralaya

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Tegar Aris Prayoga³
Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Jakarta, Indonesia
Email: eriprabowo@itpln.ac.id, Trassanda2410505@ITPLN.AC.ID, tegar.aris98@gmail.com

Abstract

This study evaluates the effect of coal blending ratio on boiler efficiency at Unit 7 of PT Indonesia Power Suralaya PGU. The analysis used low-rank coal (LRC) and medium-rank coal (MRC) with three blending ratios, namely 25L:75M, 50L:50M, and 75L:25M. Boiler performance was calculated using the indirect heat-loss method and compared with the direct input-output method. The main evaluated variables were coal quality, calorific value, moisture, ash, ultimate analysis, dry flue-gas loss, hydrogen-moisture loss, fuel-moisture loss, air-moisture loss, and specific fuel consumption. The results show that increasing the MRC fraction improves calorific value and tends to reduce moisture-related losses. The 25L:75M ratio consistently produced the best mixed-coal performance. In February 2020, the BB-2 mixture with 25L:75M achieved the highest indirect boiler efficiency of 85.798%, while the direct-method efficiency reached 73.845%. Therefore, the 25L:75M blending ratio is recommended as the most suitable operating option among the evaluated mixtures.

Keywords: boiler efficiency; coal blending; heat loss; calorific value; SFC

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh rasio coal blending terhadap efisiensi boiler Unit 7 PT Indonesia Power Suralaya PGU. Analisis menggunakan batubara low-rank coal (LRC) dan medium-rank coal (MRC) dengan tiga rasio pencampuran, yaitu 25L:75M, 50L:50M, dan 75L:25M. Kinerja boiler dihitung menggunakan metode tidak langsung berbasis heat loss dan dibandingkan dengan metode langsung input-output. Variabel utama yang dievaluasi meliputi kualitas batubara, nilai kalor, moisture, ash, analisis ultimat, kerugian gas buang kering, kerugian akibat moisture hidrogen, moisture bahan bakar, moisture udara, dan specific fuel consumption. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan fraksi MRC memperbaiki nilai kalor dan cenderung menurunkan losses terkait moisture. Rasio 25L:75M memberikan performa campuran paling konsisten. Pada Februari 2020, campuran BB-2 rasio 25L:75M menghasilkan efisiensi boiler indirect tertinggi sebesar 85,798%, sedangkan efisiensi direct mencapai 73,845%. Dengan demikian, rasio 25L:75M direkomendasikan sebagai opsi operasi paling sesuai di antara campuran yang dievaluasi.

Kata kunci: efisiensi boiler; coal blending; heat loss; nilai kalor; SFC

1. Pendahuluan

PLTU Suralaya merupakan salah satu pembangkit berbahan bakar batubara dengan kapasitas besar dan berperan penting dalam pasokan listrik sistem Jawa-Bali. Kinerja boiler sangat dipengaruhi oleh kualitas batubara, terutama nilai kalor, kadar air, kandungan abu, volatile matter, fixed carbon, dan kandungan unsur hasil analisis ultimat. Batubara dengan nilai kalor rendah dapat meningkatkan kebutuhan bahan bakar, memperbesar losses, dan menurunkan efisiensi pembakaran. Oleh sebab itu, pengendalian kualitas bahan bakar menjadi bagian penting dari operasi boiler [1-3]. Salah satu strategi pengendalian bahan bakar adalah coal blending, yaitu pencampuran batubara dengan kualitas berbeda agar parameter campuran mendekati kebutuhan desain boiler. Pada penelitian ini, batubara low-rank coal (LRC) dicampur dengan medium-rank coal (MRC) dalam tiga rasio. Pendekatan tersebut relevan karena PLTU sering menerima pasokan batubara dengan kualitas bervariasi, sedangkan boiler tetap harus mempertahankan efisiensi dan stabilitas operasi [4-6].

Skripsi asal mengevaluasi rasio 25L:75M, 50L:50M, dan 75L:25M pada data operasi Januari dan Februari 2020. Artikel ini menyusun kembali hasil tersebut dalam format JTM dengan fokus pada hubungan kualitas campuran, heat loss, efisiensi boiler, dan konsumsi bahan bakar spesifik. Tujuan penelitian adalah

menentukan rasio coal blending yang paling efektif untuk meningkatkan efisiensi boiler Unit 7 PLTU Suralaya. Kebaruan artikel ini terletak pada penyajian ulang hasil skripsi menjadi evaluasi jurnal yang menekankan hubungan antara rasio campuran, kualitas bahan bakar, losses pembakaran, dan performa boiler. Dengan demikian, pembahasan tidak hanya menyatakan rasio terbaik, tetapi juga menjelaskan alasan termal mengapa rasio tersebut menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi.

Rasio pencampuran yang dipilih harus mempertimbangkan dua kepentingan sekaligus, yaitu pemanfaatan batubara berkalori rendah dan kebutuhan mempertahankan pembakaran yang stabil. Apabila fraksi LRC terlalu tinggi, kadar air meningkat dan nilai kalor menurun sehingga panas efektif yang diterima boiler berkurang. Sebaliknya, fraksi MRC yang lebih besar dapat memperbaiki nilai kalor campuran, tetapi tetap perlu dikendalikan agar tidak melampaui batas ekonomi dan spesifikasi pasokan. Berdasarkan kebutuhan tersebut, artikel ini menempatkan rasio 25L:75M, 50L:50M, dan 75L:25M sebagai skenario evaluasi. Setiap skenario dibandingkan dengan indikator yang sama sehingga keputusan rasio terbaik tidak bersifat asumsi, melainkan diturunkan dari hasil perhitungan kualitas campuran, heat loss, efisiensi, dan konsumsi bahan bakar spesifik.

2. Metode Penelitian

2.1. Data dan Objek Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis data kualitas batubara dan data performance test boiler Unit 7 PLTU Suralaya. Dua kelompok batubara digunakan, yaitu BB-1 yang terdiri atas LRC 1 dan MRC 1, serta BB-2 yang terdiri atas LRC 2 dan MRC 2. Setiap kelompok dicampur dalam rasio 25L:75M, 50L:50M, dan 75L:25M. Data operasi perbandingan diambil pada Januari dan Februari 2020 dengan beban generator 600 MW. Data operasi utama meliputi coal flow, main steam pressure, main steam temperature, feedwater temperature, feedwater pressure, feedwater flow, main steam flow, kadar O₂ gas buang, temperatur gas buang rata-rata, kelembapan udara ambien, dan temperatur ambien. Data kualitas batubara meliputi *total moisture*, *ash*, *fixed carbon*, *volatile matter*, *total sulphur*, *carbon*, *hydrogen*, *nitrogen*, *oxygen*, dan *calorific value*.

Tabel 1. Data operasi boiler Unit 7

Parameter	Januari 2020	Februari 2020
Generator output	600 MW	600 MW
Coal flow	294 t/h	274 t/h
Main steam pressure	160 kg/cm ²	168 kg/cm ²
Main steam temperature	539 °C	539 °C
Feedwater temperature	286 °C	286 °C
Feedwater flow	1848 t/h	1603 t/h
Main steam flow	1930 t/h	1930 t/h
O ₂ in flue gas	1,96%	2,18%
Average flue gas temperature	189 °C	185 °C

2.2. Parameter dan Persamaan Kinerja

Kualitas campuran dihitung menggunakan rerata berbobot antara parameter kualitas batubara pertama dan kedua. Efisiensi boiler dihitung dengan dua pendekatan, yaitu metode indirect berbasis heat loss dan metode direct berbasis perbandingan energi keluar terhadap energi masuk. Penulisan rumus dibuat dalam bentuk persamaan bernomor agar lebih lazim untuk artikel teknik.

$$KB_c = [(KB_1 \times PB_1) + (KB_2 \times PB_2)] / (PB_1 + PB_2) \quad (1)$$

dengan KB_c adalah kualitas batubara campuran, KB₁ dan KB₂ adalah parameter batubara 1 dan 2, sedangkan PB₁ dan PB₂ adalah persentase campuran masing-masing batubara.

$$\eta_{\text{indirect}} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \quad (2)$$

$$L_1 = [m \times C_p \times (T_f - T_a) / GCV] \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta_{\text{direct}} = [G_{\text{ms}} \times (h_g - h_f) / (G_{\text{fuel}} \times GCV)] \times 100\% \quad (4)$$

$$SFC = m_{\text{batubara}} / P_{\text{generator}} \quad (5)$$

Pada Persamaan (2), L_1 adalah kerugian gas buang kering, L_2 adalah kerugian akibat moisture dari pembakaran hidrogen, L_3 adalah kerugian akibat moisture dalam batubara, dan L_4 adalah kerugian akibat moisture udara. Interpretasi dilakukan secara multiparameter karena efisiensi boiler dipengaruhi oleh nilai kalor, moisture, excess air, temperatur gas buang, dan karakteristik pembakaran secara bersamaan.

Tabel 2. Tahapan evaluasi kinerja boiler

Tahap	Data masukan	Output	Tujuan
1	Kualitas LRC dan MRC	Kualitas campuran	Menentukan parameter blended coal
2	O ₂ gas buang dan analisis ultimat	Udara teoritis dan AAS	Menilai kebutuhan udara pembakaran
3	GCV, Tf, Ta, moisture	L1-L4	Menghitung heat loss dominan
4	Main steam dan feedwater	Efisiensi direct	Membandingkan input-output energi
5	Coal flow dan output generator	SFC	Menilai konsumsi bahan bakar spesifik

Perhitungan diawali dengan menentukan komposisi setiap parameter kualitas batubara. Parameter campuran tidak dihitung hanya dari nilai kalor, tetapi juga dari total moisture, ash, sulphur, carbon, hydrogen, nitrogen, dan oxygen. Parameter tersebut penting karena masing-masing mempengaruhi kebutuhan udara pembakaran dan besarnya kerugian panas. Dengan cara ini, kualitas batubara dapat dinilai sebagai sistem termal, bukan hanya sebagai nilai GCV tunggal. Metode indirect dipakai sebagai metode utama karena mampu menguraikan sumber penurunan efisiensi. L_1 menunjukkan energi yang terbawa gas buang kering, L_2 menunjukkan energi untuk membentuk dan memanaskan uap air dari hidrogen, L_3 menunjukkan energi yang hilang karena air dalam batubara, sedangkan L_4 menunjukkan pengaruh kelembapan udara pembakaran. Nilai total loss kemudian dikurangkan dari 100% untuk mendapatkan efisiensi boiler.

Metode direct digunakan sebagai pembandingan karena lebih sederhana dan umum dipakai untuk melihat rasio energi uap terhadap energi bahan bakar. Apabila kedua metode menunjukkan kecenderungan yang sama, maka rekomendasi rasio blending menjadi lebih kuat. Selain itu, SFC digunakan untuk membaca konsekuensi operasional terhadap konsumsi batubara per kWh.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kualitas Batubara dan Hasil Blending

Spesifikasi desain PLTU Suralaya mensyaratkan nilai kalor sekitar 4500-5000 kcal/kg dan total moisture maksimum sekitar 27%. Oleh karena itu, rasio blending harus mampu menjaga nilai kalor tetap tinggi tanpa meningkatkan kandungan air secara berlebihan. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa rasio 25L:75M memiliki total moisture lebih rendah dan nilai kalor lebih tinggi dibanding rasio 50L:50M dan 75L:25M.

Tabel 2. Hasil utama kualitas campuran Batubara

Campuran	Rasio	Total moisture (%)	Ash (%)	Sulphur (%)	Carbon (%)	GCV (kcal/kg)
BB-1	25L:75M	25,18	6,78	0,46	53,02	4781,25
BB-1	50L:50M	25,68	6,39	0,41	52,77	4722,50
BB-1	75L:25M	26,18	6,00	0,36	52,53	4663,75
BB-2	25L:75M	25,65	5,57	0,66	53,25	4893,00
BB-2	50L:50M	26,89	5,79	0,52	52,55	4762,00
BB-2	75L:25M	28,12	6,01	0,39	51,84	4631,00

Pada BB-1, nilai kalor rasio 25L:75M mencapai 4781,25 kcal/kg, lebih tinggi dibanding 4722,50 kcal/kg pada 50L:50M dan 4663,75 kcal/kg pada 75L:25M. Pada BB-2, kecenderungan yang sama muncul dengan nilai 4893,00 kcal/kg untuk 25L:75M. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase MRC memberikan dampak positif terhadap nilai kalor campuran. Dari sisi moisture, rasio 25L:75M juga lebih menguntungkan karena kadar airnya lebih rendah sehingga energi pembakaran tidak terlalu banyak

digunakan untuk menguapkan air dalam bahan bakar. Volatile matter juga perlu dibaca bersama fixed carbon. Volatile matter yang memadai membantu proses penyalan, sedangkan fixed carbon berhubungan dengan pelepasan panas lanjutan selama pembakaran. Pada campuran yang terlalu banyak LRC, kenaikan moisture dapat menurunkan manfaat volatilitas karena energi pembakaran terlebih dahulu dipakai untuk menguapkan air. Oleh karena itu, rasio 25L:75M lebih proporsional karena masih memanfaatkan LRC tetapi tetap didominasi MRC.

Tabel 3. Perubahan parameter kunci terhadap rasio blending

Parameter	Kecenderungan saat LRC naik	Dampak terhadap boiler
Total moisture	Meningkat	Energi terserap untuk penguapan air
Caloric value	Menurun	Input energi bahan bakar menurun
Ash content	Relatif berubah menurut sumber batubara	Dapat mempengaruhi fouling dan slagging
Sulphur	Berubah sesuai komposisi MRC/LRC	Perlu dipantau untuk emisi
Carbon	Cenderung menurun pada fraksi LRC tinggi	Potensi panas pembakaran menurun

Menjadi parameter paling sensitif karena langsung meningkatkan energi laten penguapan air. Pada BB-2, moisture meningkat dari 25,65% pada rasio 25L:75M menjadi 28,12% pada 75L:25M. Nilai tersebut melewati batas maksimum spesifikasi 27% yang digunakan sebagai acuan PLTU Suralaya. Artinya, walaupun campuran 75L:25M masih dapat dibakar, kualitasnya lebih berisiko terhadap penurunan efisiensi dan kestabilan pembakaran. Nilai kalor juga menunjukkan kecenderungan jelas. Pada BB-2, penambahan fraksi LRC menurunkan GCV dari 4893,00 kcal/kg menjadi 4631,00 kcal/kg. Perbedaan 262 kcal/kg ini berpengaruh terhadap energi yang tersedia per satuan massa batubara. Pada boiler besar, selisih nilai kalor tersebut dapat mempengaruhi kebutuhan coal flow, udara pembakaran, dan temperatur gas buang. Kandungan sulphur dan ash tetap perlu dipantau karena terkait emisi dan potensi deposit. Rasio terbaik secara efisiensi bukan berarti dapat dilepaskan dari batas lingkungan dan pemeliharaan. Oleh karena itu, rekomendasi blending perlu didukung pengujian laboratorium rutin terhadap parameter proksimat dan ultimat.

Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa coal blending yang baik harus mencari titik kompromi antara ketersediaan bahan bakar dan performa termal. Pada kasus ini, rasio 25L:75M memberi kompromi yang paling kuat karena nilai kalor tinggi, total moisture terkendali, dan kandungan karbon relatif lebih baik. Rasio 50L:50M masih dapat menjadi alternatif, tetapi performanya berada di bawah 25L:75M. Rasio 75L:25M kurang disarankan karena peningkatan LRC menurunkan kualitas termal campuran.

3.2. Evaluasi Heat Loss dan Efisiensi Indirect

Metode indirect menunjukkan pengaruh langsung kualitas campuran terhadap losses pembakaran. Pada data Januari, rasio 25L:75M menghasilkan efisiensi 85,627% pada BB-1 dan 85,678% pada BB-2. Pada data Februari, rasio yang sama menghasilkan 85,749% pada BB-1 dan 85,798% pada BB-2. Nilai tersebut lebih tinggi dibanding rasio 50L:50M dan 75L:25M pada campuran yang sama.

Tabel 3. Perbandingan efisiensi boiler *metode indirect*

Bulan	Campuran	LRC/MRC	25L:75M	50L:50M	75L:25M
Januari	BB-1	LRC1/MRC1	85,627%	85,201%	84,748%
Januari	BB-2	LRC2/MRC2	85,678%	84,884%	84,048%
Februari	BB-1	LRC1/MRC1	85,749%	85,325%	84,873%
Februari	BB-2	LRC2/MRC2	85,798%	85,007%	84,174%

Kenaikan efisiensi pada rasio 25L:75M terutama berkaitan dengan kombinasi nilai kalor yang lebih tinggi dan total moisture yang lebih rendah. Moisture yang tinggi meningkatkan L_2 dan L_3 karena sebagian energi pembakaran terpakai untuk menguapkan air. Pada kondisi BB-2, peningkatan rasio LRC dari 25% menjadi 75% menurunkan efisiensi Februari dari 85,798% menjadi 84,174%. Penurunan sebesar 1,624 poin persentase ini cukup signifikan untuk operasi boiler berkapasitas besar. Secara teknis, nilai L_1 dipengaruhi massa gas buang kering, panas jenis gas buang, dan selisih temperatur gas buang terhadap ambien. Sementara itu, L_2 dan L_3 sangat dipengaruhi kandungan hidrogen dan moisture. Karena rasio 25L:75M

memiliki nilai kalor tinggi dan moisture rendah, total losses menjadi lebih kecil dibandingkan rasio dengan proporsi LRC lebih tinggi.

Tabel 4. Contoh komponen losses pada BB-1 Januari

Parameter	LRC 1	MRC 1	25L:75M	50L:50M	75L:25M
L1 gas buang kering (%)	6,072	5,710	5,798	5,886	5,979
L2 moisture H2 (%)	5,332	4,431	4,651	4,866	5,100
L3 moisture batubara (%)	3,988	3,510	3,625	3,743	3,863
L4 moisture udara (%)	0,3156	0,2935	0,2989	0,3042	0,3099
Total losses (%)	15,707	13,945	14,373	14,799	15,252

Tabel 4 memperlihatkan bahwa losses pada campuran 25L:75M berada lebih dekat dengan MRC dibandingkan LRC. Nilai L2 dan L3 pada 25L:75M lebih rendah daripada 50L:50M dan 75L:25M. Hal tersebut memperkuat interpretasi bahwa penambahan MRC menekan pengaruh moisture pada proses pembakaran. Penurunan total losses inilah yang menghasilkan kenaikan efisiensi indirect. Jika dilihat dari data Februari, BB-2 rasio 25L:75M memberikan efisiensi 85,798%, sedangkan 50L:50M turun menjadi 85,007% dan 75L:25M turun menjadi 84,174%. Pola penurunan bertahap ini menunjukkan hubungan yang konsisten antara komposisi campuran dan performa boiler. Dengan demikian, rasio 25L:75M bukan hanya unggul pada satu data, tetapi unggul pada dua periode pengujian.

Meskipun demikian, efisiensi boiler tidak hanya dipengaruhi oleh batubara. Kelebihan udara pembakaran, kondisi air heater, temperatur gas buang, kebersihan permukaan perpindahan panas, serta distribusi udara dan bahan bakar di burner juga berperan. Karena itu, hasil blending perlu dipadukan dengan pengaturan operasi agar perbaikan kualitas bahan bakar benar-benar menghasilkan perbaikan performa.

Perbedaan hasil Januari dan Februari juga memperlihatkan bahwa kondisi operasi mempengaruhi respons campuran. Pada Februari, nilai O₂ gas buang dan excess air lebih tinggi dibanding Januari, tetapi rasio 25L:75M tetap memberikan efisiensi terbaik. Konsistensi ini menunjukkan bahwa komposisi campuran memiliki pengaruh kuat terhadap heat loss walaupun kondisi operasi tidak sepenuhnya identik.

3.3. Evaluasi Direct Method dan SFC

Metode direct menghasilkan nilai efisiensi yang lebih rendah dibanding metode indirect karena perhitungannya langsung membandingkan energi uap terhadap energi bahan bakar. Walaupun demikian, pola hasilnya tetap menunjukkan bahwa rasio 25L:75M lebih baik dibanding rasio dengan fraksi LRC lebih besar. Pada BB-2 bulan Februari, efisiensi direct rasio 25L:75M mencapai 73,8451%, lebih tinggi dibanding 73,3316% pada 50L:50M dan 72,9904% pada 75L:25M.

Tabel 4. Efisiensi direct dan specific fuel consumption

Data	25L:75M	50L:50M	75L:25M	Indikator terbaik
Direct BB-1 Jan (%)	70,5764	70,0874	69,6609	25L:75M
Direct BB-2 Feb (%)	73,8451	73,3316	72,9904	25L:75M
SFC Jan (kg/kWh)	0,5243	0,5215	0,5184	dibaca bersama GCV
SFC Feb (kg/kWh)	0,5269	0,5241	0,5209	dibaca bersama GCV

Nilai SFC tidak boleh dibaca terpisah dari GCV dan kondisi operasi. Pada data skripsi, SFC juga dipengaruhi pasokan udara, temperatur gas buang, dan kondisi boiler seperti slagging atau penurunan

performa air heater. Oleh karena itu, rasio terbaik tidak hanya dipilih berdasarkan SFC terendah, tetapi berdasarkan kombinasi nilai kalor, moisture, losses, efisiensi indirect, dan kestabilan pembakaran.

Perbedaan antara metode direct dan indirect wajar terjadi karena metode direct lebih sederhana dan sensitif terhadap data energi input-output, sedangkan metode indirect menelusuri komponen losses. Dalam konteks operasional, metode indirect lebih informatif untuk menentukan penyebab penurunan efisiensi karena masing-masing loss dapat diidentifikasi dan dikaitkan dengan kualitas bahan bakar maupun kondisi peralatan.

Tabel 5. Pembacaan gabungan indikator kinerja

Indikator	Rasio 25L:75M	Rasio 50L:50M	Rasio 75L:25M
Kualitas GCV	Tertinggi	Menengah	Terendah
Moisture	Terendah	Menengah	Tertinggi
Efisiensi indirect	Terbaik	Turun sedang	Turun terbesar
Efisiensi direct	Terbaik	Turun sedang	Turun terbesar
Kelayakan operasi	Direkomendasikan	Alternatif	Kurang disarankan

Perbedaan nilai SFC pada data tabel perlu dilihat secara hati-hati. SFC rendah tidak selalu berarti efisiensi termal lebih baik apabila kualitas batubara rendah dan boiler harus bekerja dengan kondisi udara berlebih atau temperatur gas buang tinggi. Karena itu, dalam artikel ini indikator utama tetap efisiensi indirect dan direct, sedangkan SFC digunakan sebagai informasi pendukung untuk membaca kebutuhan bahan bakar terhadap output generator. Kombinasi hasil *direct* dan *indirect* menunjukkan bahwa rasio 25L:75M memiliki arah perbaikan yang paling konsisten. Nilai direct pada BB-2 Februari sebesar 73,8451% lebih tinggi daripada 73,3316% dan 72,9904%. Walaupun selisihnya terlihat kecil, perbedaan tersebut menjadi berarti pada operasi 600 MW karena perubahan efisiensi akan berpengaruh pada konsumsi batubara dalam skala ton per jam. Secara praktis, hasil ini memberikan dasar bagi operator untuk tidak hanya mengejar target nilai kalor akhir, tetapi juga menjaga keseimbangan *moisture*, *ash*, dan *sulphur*. Jika rasio aktual di lapangan berubah karena variasi kualitas pasokan, maka perhitungan ulang kualitas campuran dan estimasi *losses* perlu dilakukan sebelum batubara digunakan secara masif.

Pada sisi pembangkitan, perubahan kecil pada efisiensi dapat berdampak pada konsumsi batubara harian karena unit beroperasi pada kapasitas besar. Oleh sebab itu, pemantauan SFC tetap perlu dilakukan bersamaan dengan pencatatan *coal flow* dan beban generator. Ketika SFC meningkat pada nilai kalor yang tinggi, operator perlu memeriksa apakah terjadi excess air berlebih, slagging, penurunan performa mill, atau peningkatan temperatur gas buang. Dari sudut pandang pengambilan keputusan, rasio 25L:75M memenuhi dua indikator penting sekaligus: efisiensi lebih tinggi dan kualitas campuran lebih dekat dengan spesifikasi. Rasio ini memberikan margin operasi yang lebih aman dibandingkan rasio 75L:25M yang memiliki moisture lebih tinggi dan GCV lebih rendah. Oleh karena itu, hasil direct, indirect, dan kualitas campuran saling menguatkan satu sama lain.

3.4. Analisis Penyebab Penurunan Efisiensi

Faktor utama penurunan efisiensi adalah heat loss gas buang kering, moisture hasil pembakaran hidrogen, moisture dalam batubara, dan moisture udara. Pada campuran dengan fraksi LRC lebih besar, kadar air meningkat dan nilai kalor menurun. Kondisi tersebut membuat energi efektif yang tersedia untuk menghasilkan uap menjadi lebih kecil. Selain kualitas batubara, faktor peralatan seperti unjuk kerja air heater juga dapat meningkatkan temperatur gas buang dan memperbesar L_1 . Faktor lingkungan seperti curah hujan dan kelembapan udara dapat menaikkan moisture batubara selama pengiriman dan penyimpanan di coal yard.

Dari sisi operasional, rasio 25L:75M lebih aman untuk direkomendasikan karena memberikan kualitas campuran yang lebih dekat dengan spesifikasi PLTU Suralaya. Rasio ini mengurangi dominasi LRC tanpa sepenuhnya menghilangkan pemanfaatan batubara berkalori lebih rendah. Dengan demikian, strategi blending tetap dapat menjaga fleksibilitas pasokan bahan bakar sekaligus mempertahankan efisiensi boiler pada tingkat yang lebih baik.

Tabel 5. Ringkasan interpretasi teknis hasil blending

Aspek	Temuan	Implikasi operasi
Nilai kalor	Tertinggi pada rasio 25L:75M	Pembakaran lebih efektif
Total moisture	Naik saat fraksi LRC bertambah	Heat loss L ₂ dan L ₃ meningkat
Efisiensi indirect	Tertinggi 85,798% pada BB-2 Februari	Rasio 25L:75M paling layak
Efisiensi direct	Pola terbaik tetap pada 25L:75M	Memperkuat hasil indirect
Faktor non-bahan bakar	Air heater, O ₂ , flue gas, kelembapan	Perlu monitoring berkala

3.5. Implikasi Operasional

Penerapan rasio 25L:75M perlu disertai kontrol kualitas batubara sejak penerimaan, penyimpanan, hingga pengumpanan ke boiler. Pengujian moisture, ash, sulphur, dan GCV sebaiknya dilakukan secara konsisten agar rasio aktual tidak menyimpang dari perencanaan. Karena penelitian ini menggunakan data Januari dan Februari 2020, pengujian lanjutan pada musim dan variasi beban yang berbeda diperlukan untuk memastikan stabilitas rekomendasi. Selain aspek bahan bakar, operator perlu memantau excess air, temperatur gas buang, kebersihan air heater, performa mill, dan indikasi slagging. Apabila temperatur gas buang meningkat, efisiensi dapat turun walaupun GCV batubara relatif baik. Dengan pendekatan multiparameter, coal blending dapat dipakai sebagai strategi optimasi yang lebih terukur, bukan hanya sebagai pencampuran kualitas batubara berdasarkan nilai kalor.

Keterbatasan penelitian ini adalah penggunaan data operasi pada dua bulan dan satu unit boiler. Pengujian lanjutan disarankan dilakukan pada beberapa kondisi beban, musim hujan dan kemarau, serta variasi pasokan batubara yang lebih luas. Analisis tambahan terhadap fouling, slagging, air-fuel ratio, dan performa pulverizer akan memperkuat dasar rekomendasi operasi.

Tabel 6. Rekomendasi monitoring pasca-blending

Aspek	Parameter	Tindakan
Bahan bakar	GCV, moisture, ash, sulphur	Uji laboratorium rutin setiap lot
Pembakaran	O ₂ flue gas, excess air	Optimasi air-fuel ratio
Peralatan	Air heater, mill, burner	Inspeksi performa dan cleaning
Emisi	SO ₂ , NO _x , partikulat	Pastikan sesuai batas lingkungan
Ekonomi	Coal flow dan SFC	Evaluasi biaya per kWh

Berdasarkan rekomendasi tersebut, rasio blending sebaiknya tidak dipandang sebagai angka tetap yang berdiri sendiri. Rasio 25L:75M dapat digunakan sebagai titik operasi awal, kemudian disesuaikan berdasarkan hasil coal analysis, kebutuhan beban, dan kondisi peralatan. Apabila moisture pasokan LRC meningkat akibat hujan atau penyimpanan terbuka, porsi MRC dapat dinaikkan sementara untuk menjaga nilai kalor campuran. Pengawasan pada air heater juga penting karena komponen ini menentukan temperatur udara pembakaran dan berpengaruh terhadap temperatur gas buang. Air heater yang kotor atau bocor dapat menyebabkan pembakaran tidak optimal dan meningkatkan L₁. Dengan demikian, coal blending dan pemeliharaan peralatan harus dilaksanakan sebagai satu paket strategi efisiensi. Implementasi operasional dapat dilakukan melalui tiga langkah. Pertama, menentukan kualitas awal setiap pasokan batubara melalui coal analysis. Kedua, menghitung rasio blending sebelum pengumpanan ke bunker agar nilai GCV dan moisture berada dalam batas desain. Ketiga, mengevaluasi hasil pembakaran melalui efisiensi, O₂ gas buang, temperatur gas buang, dan SFC. Siklus ini perlu diulang secara periodik karena kualitas pasokan batubara dapat berubah antar-pengiriman.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi, coal blending berpengaruh terhadap efisiensi boiler Unit 7 PLTU Suralaya. Rasio 25L:75M menghasilkan kualitas campuran paling baik karena memiliki nilai kalor lebih tinggi dan moisture lebih rendah dibanding rasio 50L:50M dan 75L:25M. Pada metode indirect, efisiensi tertinggi diperoleh pada campuran BB-2 bulan Februari rasio 25L:75M sebesar 85,798%. Pada metode direct, rasio yang sama juga menunjukkan nilai terbaik sebesar 73,8451%.

Peningkatan fraksi MRC dalam campuran terbukti menurunkan dominasi losses yang berkaitan dengan moisture dan meningkatkan kinerja pembakaran. Oleh karena itu, rasio 25L:75M direkomendasikan sebagai rasio operasi paling sesuai di antara variasi yang diuji. Untuk penerapan jangka panjang, evaluasi perlu dilengkapi dengan monitoring GCV, total moisture, O₂ gas buang, temperatur gas buang, SFC, serta performa air heater dan mill.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa keberhasilan blending tidak hanya ditentukan oleh perhitungan nilai kalor, tetapi oleh pengendalian kualitas batubara secara menyeluruh. Rasio dengan nilai kalor tinggi tetap perlu dievaluasi terhadap moisture, sulphur, ash, dan kondisi pembakaran aktual. Untuk implementasi industri, perhitungan rasio sebaiknya diperbarui setiap kali terdapat perubahan sumber batubara atau perubahan karakteristik operasi boiler.

Saran

Penelitian lanjutan disarankan menggunakan data operasi pada variasi beban, musim, dan sumber batubara yang lebih beragam. Evaluasi juga perlu memasukkan analisis biaya bahan bakar, batas emisi, serta kondisi peralatan seperti air heater, pulverizer, burner, dan indikasi slagging agar rekomendasi rasio blending dapat diterapkan secara lebih komprehensif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Indonesia Power Suralaya PGU, pembimbing akademik, pembimbing lapangan, dan seluruh pihak yang telah mendukung proses pengambilan data serta penyusunan artikel ini.

Daftar Rujukan

- 1) Baek SH, Park HY, Ko SH. The effect of the coal blending method in a coal fired boiler on carbon in ash and NO_x emission. *Fuel*. 2014;128:62-70.
- 2) Liu G, Li Z, Chen Z, Zhu X, Zhu Q. Effect of the anthracite ratio of blended coals on combustion and NO_x emission characteristics of a 660-MWe utility boiler. *Appl Energy*. 2012;95:196-201.
- 3) Zheng S, Hu Y, Wang Z, Cheng X. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *J Energy Inst*. 2020;93(4):1373-1381.
- 4) Samsudin S, Aziz NA, Sukhri MH. Sub bituminous coal blended analysis. 2020:739-748.
- 5) M Raut S, Kumbhare SB, Thakur KC. Energy performance assessment of boiler at PSSK Ltd, Basmathnagar, Maharashtra State. *Int J Emerg Technol Adv Eng*. 2014;4(12):1-12.
- 6) Nagar V. Boiler efficiency improvement through analysis of losses. *Int J Sci Res Dev*. 2013;1(3):1-5.
- 7) Pravitasari Y, Malino MB, Novitasari M. Analisis efisiensi boiler menggunakan metode langsung. *Prisma Fisika*. 2017;5(1):9-12.
- 8) Saputra D, Triantoro A. Kajian blending dua jenis grade batubara beda kualitas. 2013:40-55.
- 9) Divo M. Optimasi pencampuran batubara beda kualitas dengan metode trial and error untuk memenuhi kriteria permintaan konsumen di CV Bara Mitra Kencana Kota Sawahlunto. 5(1):51-60.
- 10) 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.