Jurnal PASTI (Penelitian dan Aplikasi Sistem dan Teknik Industri)
Vol. 19, No. 3, Desember 2025, 353-365
p-ISSN 2085-5869/ e-ISSN 2598-4853

Analisis Pengaruh Kualitas Batubara terhadap Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode *Statistical Process Control* di Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Arif Budi Sulistyo[1*], Nuraisah Nuraisah[2]
[1,2)] Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Banten Jaya
Jl. Ciwaru Raya II No 73, Cipare, Kec. Serang, Kota Serang, Banten, 42117, Indonesia
Email: arif.b.sulistyo@gmail.com[*], nuraisah319@gmail.com

(Diterima: 30-09-2025; Direvisi: 21-12-2025; Disetujui: 22-12-2025)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kualitas batubara terhadap efisiensi pembakaran pada *Boiler* Unit 4 Pembangkit Listrik Tenaga Uap serta mengevaluasi strategi pencampuran batubara dari berbagai pemasok. Parameter kualitas yang diamati meliputi kadar air total, kadar air *inherent*, kadar abu, zat terbang, karbon tetap, total sulfur, dan nilai kalor. Variasi kualitas batubara diidentifikasi menggunakan metode *Statistical Process Control* untuk mengetahui keterkaitannya dengan kinerja *boiler*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar air total, total sulfur, dan nilai kalor merupakan faktor yang paling memengaruhi efisiensi, dengan rata-rata efisiensi aktual hanya 83,96%. Simulasi pencampuran batubara dengan proporsi pemasok tertentu dapat meningkatkan efisiensi hingga 88,00% dengan tetap memenuhi spesifikasi kualitas. Analisis lebih lanjut menggunakan pendekatan 5W+1H mengungkap faktor penyebab lain yang berasal dari aspek manusia, mesin, material, metode, dan lingkungan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pencampuran batubara efektif untuk meningkatkan efisiensi, yaitu dari 3 *supplier* dengan proporsi masing-masing 30%, 40%, dan 30% namun perlu didukung pemilihan pemasok dengan kualitas lebih baik dan pengendalian mutu yang ketat. Usulan perbaikan yang diberikan adalah pembuatan standar operasional mengenai strategi *blending*, mengembangkan progam pelatihan bagi operator dalam menghadapi variasi kualitas batu bara, dan investasi infrastruktur penyimpanan tertutup batu bara agar kualitasnya lebih terjaga.

Kata kunci: Batubara; Efisiensi *Boiler*; Pencampuran Batubara; Pengendalian Proses Statistik; Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Abstract

This study aims to analyze the effect of coal quality on the combustion efficiency of Boiler Unit 4 at coal-fired power plant and to evaluate blending strategies of coal from multiple suppliers. The observed quality parameters include total moisture, inherent moisture, ash content, volatile matter, fixed carbon, total Sulphur, and calorific value. Variations in coal quality were identified using Statistical Process Control to determine their impact on boiler performance. The results indicate that total moisture, total Sulphur, and calorific value are the most influential factors, with an average efficiency of only 83.96%. A blending simulation with specific supplier proportions successfully increased efficiency to 88.00% while still meeting the quality specifications. Further analysis using the 5W+1H approach revealed additional contributing factors related to human, machine, material, method, and environmental aspects. The study concludes that coal blending is effective in improving efficiency, but it should be supported by selecting higher-quality of 3 suppliers with proportion 30%, 40% and 30% respectively and enforcing quality control strictly. The proposed improvements are creation of operational standards for blending strategies,

development of training programs for operators to handle variations in coal quality, and investment in closed coal storage to better maintain its quality.

Keywords: *Coal; Boiler Efficiency; Coal Blending; Statistical Process Control; Power Plant*

PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik dunia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan industri. Di Indonesia, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara masih menjadi tulang punggung penyedia listrik karena ketersediaannya yang melimpah serta biaya produksi yang relatif rendah. Namun, efisiensi pembakaran pada unit *boiler* seringkali menjadi tantangan utama yang menentukan keandalan operasi sekaligus biaya produksi listrik. Kualitas batubara—terutama kadar air, abu, sulfur, serta nilai kalor—merupakan faktor krusial yang memengaruhi kinerja *boiler* (Amsah *et al*., 2022; Maulana *et al*., 2020)

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa karakteristik batubara di Indonesia sangat bervariasi antarwilayah, seperti Sumatra, Kalimantan, dan Sulawesi, yang dipengaruhi oleh kondisi geologi dan lingkungan pengendapan (Idarwati & Maulia, 2024; Rachman *et al*., 2024). Variasi ini berdampak langsung pada performa pembakaran di *boiler*. Rousseau & Laubscher (2020) menegaskan bahwa tingginya kadar abu dapat mengurangi penyerapan panas serta mempercepat *fouling* pada pipa *superheater*, sementara Liu *et al*. (2021) menambahkan bahwa kualitas batubara sebagai *source rock* juga berhubungan dengan perilaku fluida, yang implikasinya relevan pada proses pembakaran di PLTU (Sulistyo & Rinaldi, 2020).

Dari perspektif internasional, penelitian di Ordos Basin, Tiongkok, mengungkapkan bahwa batubara berperingkat menengah hingga tinggi memiliki karakteristik penyimpanan gas yang berbeda signifikan pada kedalaman lebih dari 3000 m, sehingga kualitas batubara tidak hanya berimplikasi pada efisiensi energi, tetapi juga pada potensi ekonomi jangka panjang (Hou *et al*., 2024). Dengan demikian, penelitian tentang kualitas batubara menjadi penting dalam kaitannya dengan geologi, energi, serta keberlanjutan industri.

Dalam upaya meningkatkan efisiensi *boiler*, pendekatan tradisional kini berkembang ke arah metode berbasis *machine learning* dan kecerdasan buatan. Huang *et al*. (2025) menunjukkan bahwa model hibrid CNN–BiGRU dengan optimasi NSGA-II mampu meningkatkan efisiensi termal sekaligus menekan emisi NO_x. Sejalan dengan itu, Guo *et al*. (2025) memanfaatkan *AutoML* berbasis *big data* gasifikasi batubara untuk memprediksi nilai kalor secara cepat dan akurat, yang mendukung strategi *coal blending* dan pengendalian kualitas bahan bakar. Dari perspektif lingkungan, Fawzy (2020) menegaskan bahwa kualitas batubara rendah tidak hanya menurunkan performa pembakaran, tetapi juga meningkatkan biaya operasional dan emisi.

Selain optimasi teknis, pendekatan statistik juga berperan penting. Ramadhani & Sutabri (2024) membuktikan efektivitas *Statistical Process Control* (SPC) dalam memantau kualitas daya listrik, yang relevan untuk diaplikasikan pada pemantauan kualitas batubara di PLTU (Sulistyo & Mutiawati, 2021). Model statistik lain juga berperan dalam memahami variasi sistem energi; Botev *et al*. (2020) menekankan bahwa prediksi distribusi probabilistik dapat membantu mengendalikan variabilitas kualitas batubara di sepanjang rantai pasok.

Sejumlah studi lokal mendukung pentingnya aspek geologi dalam menentukan kualitas batubara. Penelitian di Bengkulu dan Sumatra menegaskan bahwa kondisi pengendapan serta komposisi mineral sangat berpengaruh pada kualitas batubara yang dihasilkan (Idarwati & Maulia, 2024; Maulana *et al*., 2020). Hal ini sejalan dengan temuan

Rachman *et al*. (2024) yang menunjukkan bahwa keragaman karakteristik batubara Indonesia menuntut pendekatan karakterisasi yang lebih integratif.

Di sisi lain, strategi pencampuran batubara (*coal blending*) kini semakin mendapat perhatian sebagai solusi praktis untuk menjaga stabilitas kualitas bahan bakar. Studi Fitriani *et al*. (2024) di PT Bukit Asam menunjukkan bahwa pencampuran beberapa jenis batubara memungkinkan tercapainya kualitas sesuai spesifikasi PLTU, sehingga efisiensi pembakaran tetap terjaga. Secara global, teknik *blending* juga digunakan untuk mengoptimalkan biaya serta mematuhi regulasi lingkungan. Wang *et al*. (2025) mengembangkan kerangka optimasi berbasis *surrogate* yang mampu menurunkan biaya pembangkitan rata-rata sebesar 3,37%, sementara Li *et al*. (2025) menunjukkan bahwa algoritma pembelajaran penguatan dapat memangkas biaya bahan bakar hingga 14,7%, menurunkan emisi sulfur 24,8%, dan mengurangi kejadian *slag* di *boiler* sebesar 41%.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat celah yang perlu diisi. Sebagian besar studi berfokus pada satu aspek tertentu—baik geologi, parameter operasi, maupun strategi *blending*—tanpa menghubungkannya dalam kerangka operasional yang komprehensif di PLTU. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kontribusi baru dengan mengintegrasikan pemantauan kualitas batubara berbasis SPC, simulasi *blending* dari berbagai pemasok, serta analisis akar masalah menggunakan pendekatan 5W+1H.

Dengan kombinasi ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kerangka yang menyatukan aspek geologi, kualitas batubara, optimasi teknis, dan pengendalian kualitas berbasis statistik. Hasilnya tidak hanya berpotensi meningkatkan efisiensi *boiler* di PLTU, tetapi juga memperkuat strategi manajemen rantai pasok batubara yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Untuk merealisasikan tujuan penelitian yang telah ditetapkan, penelitian ini disusun dalam beberapa tahapan sistematis sebagaimana terlihat pada Gambar 1 dibawah. Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan yang terjadi di PLTU, khususnya terkait penurunan efisiensi pembakaran *boiler* akibat ketidaksesuaian kualitas batubara dengan spesifikasi yang dipersyaratkan. Proses identifikasi dilakukan melalui observasi lapangan serta diskusi awal dengan pihak teknis perusahaan.

Setelah identifikasi masalah, dilakukan studi literatur dari berbagai sumber ilmiah seperti jurnal, prosiding, maupun laporan penelitian terdahulu yang relevan dengan topik kualitas batubara, efisiensi *boiler*, metode *Statistical Process Control* (SPC), dan strategi *blending* batubara. Studi ini bertujuan memberikan landasan teoretis dan memperkuat metodologi penelitian yang diterapkan.

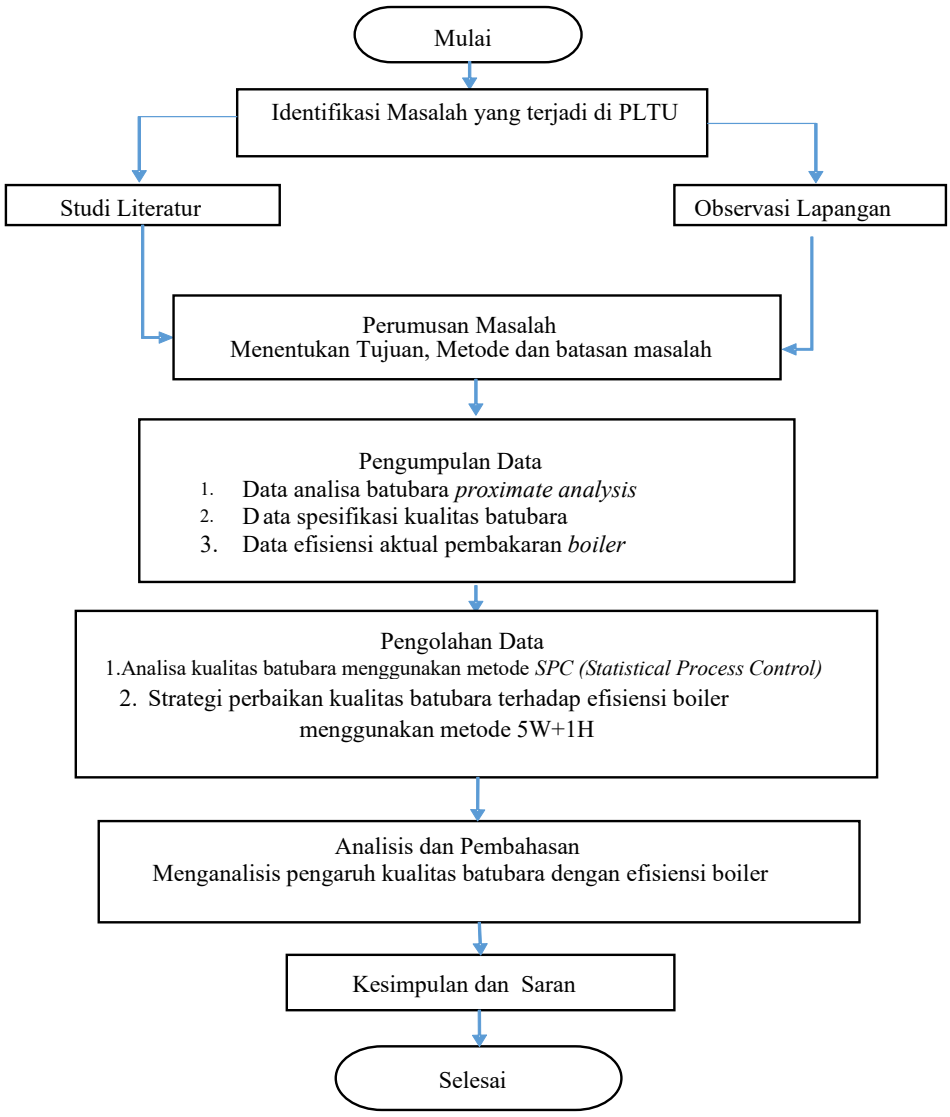
Berdasarkan identifikasi awal dan literatur yang dikaji, kemudian ditentukan tujuan penelitian, metode yang digunakan, serta batasan penelitian agar lebih terfokus dan sesuai dengan kondisi di lapangan. Berikutnya pengumpulan data yang dikumpulkan terdiri dari:

a. Data hasil uji proksimat batubara (kadar air, abu, *volatile matter*, dan *fixed carbon*).
b. Data spesifikasi kualitas batubara yang dipasok ke PLTU.
c. Data efisiensi aktual pembakaran *boiler*.

Data dianalisis melalui dua tahapan utama, yaitu:

a. Analisis SPC (*Statistical Process Control*): digunakan untuk mengevaluasi kestabilan kualitas batubara dan mengidentifikasi adanya variasi khusus (*assignable cause*) yang memengaruhi performa *boiler*.
b. Strategi Perbaikan Efisiensi: dilakukan melalui simulasi pencampuran (*blending*) batubara dari berbagai pemasok serta analisis akar masalah dengan pendekatan 5W+1H untuk merumuskan rekomendasi perbaikan operasional.

Hasil pengolahan data diinterpretasikan dan dianalisis lebih lanjut untuk membandingkan kondisi aktual dengan standar kinerja, sekaligus mengevaluasi efektivitas strategi perbaikan yang diajukan. Sedangkan tahap akhir berupa penarikan kesimpulan dan penyusunan saran implementatif bagi PLTU, terutama terkait strategi pengendalian kualitas batubara dan peningkatan efisiensi pembakaran *boiler*.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh melalui uji laboratorium terhadap sampel batubara yang digunakan di PLTU serta catatan operasional efisiensi *boiler* tahun 2022. Data ini kemudian disajikan dalam bentuk tabel, histogram, dan diagram untuk memudahkan analisis menggunakan metode *Statistical Process Control* (SPC). Berikut adalah uraian dari masing-masing data yang dikumpulkan yang tersaji pada Tabel 1.

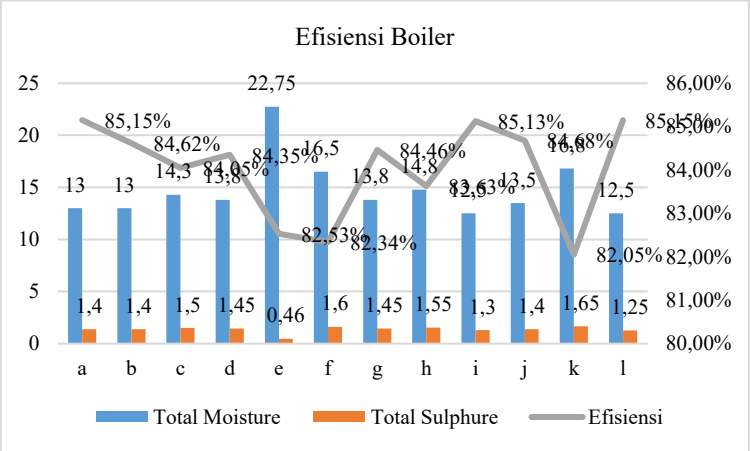
Check Sheet

Tabel 1. *Check Sheet*

	Parameter							
	Total Moisture	***Inherent Moisture***	***Ash Content***	***Volatile Matter***	***Fixed Carbon***	***Total Sulphure***	***Caloric Value***	**efisiensi**
	Satuan							
	ARB%	**ADB%**	**ADB%**	**ADB%**	**ADB%**	**ADB%**	**Kcal / Kg**	**%**
	Persyaratan PLTU							
Supplier	**<12**	**< 11**	**< 8**	**36 – 42**	**36 – 42**	**< 0,5**	**4800 – 5200**	**86 – 88**
a.	13	5.5	7	40	39	1.4	6000	84.51%
b.	13	5.5	7.5	40	37	1.4	6050	84.62%
c.	14.3	6	7.5	39.5	35.5	1.5	5950	84.05%
d.	13.8	5.8	7.2	40	36	1.45	6000	84.35%
e.	22.75	6.3	6.37	35.4	35.4	0.46	5122	82.53%
f.	16.5	7.5	9	38	33	1.6	5800	82.34%
g.	13.8	5.8	7.2	40	36	1.45	6050	84.46%
h.	14.8	6.2	7.8	39.5	35.5	1.55	5975	83.63%
i.	12.5	5	6.5	40	37	1.3	6150	85.13%
j.	13.5	5.5	7	40	36.5	1.4	6075	84.68%
k.	16.8	7.2	9.5	38.5	33.5	1.65	5780	82.05%
l.	12.5	5	6.2	40	37.5	1.25	6200	85.15%
	Rata-rata efisiensi							83.96%

Tabel *Check Sheet* menyajikan hasil uji kualitas batubara dari berbagai pemasok dengan parameter utama seperti *total moisture*, *ash content*, *volatile matter*, *fixed carbon*, *total sulphur*, dan *caloric value*. Tiga faktor yang paling berpengaruh terhadap penurunan efisiensi adalah *total moisture*, *total sulphur*, dan *caloric value*. Kadar air tinggi menurunkan nilai kalor efektif, kandungan sulfur berlebih meningkatkan risiko emisi dan korosi, sementara variasi nilai kalor berdampak langsung pada kestabilan energi yang dihasilkan. Akibat deviasi tersebut, rata-rata efisiensi *boiler* tercatat hanya 83,96%, lebih rendah dari standar 86–88%.

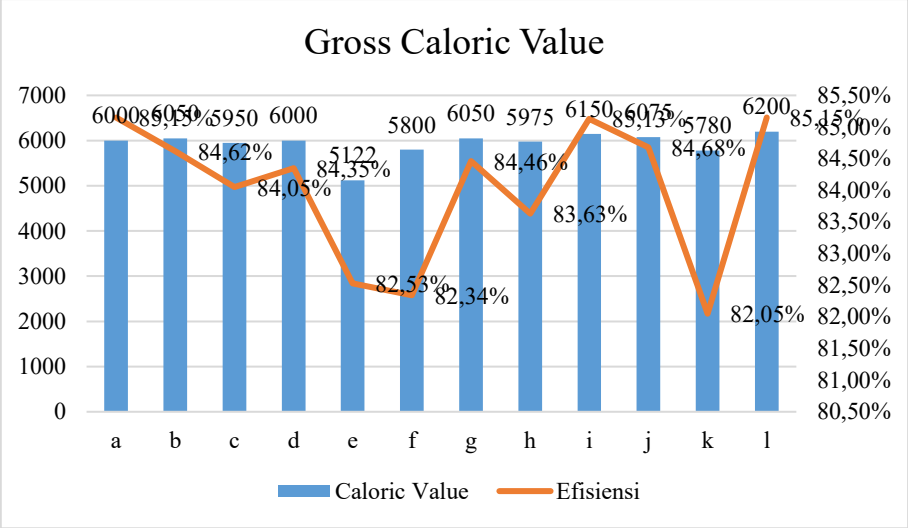
Histogram



Gambar 2. Histogram Efisiensi *Boiler*

Histogram Efisiensi *Boiler* pada Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara *total moisture*, *total sulphur*, dan efisiensi. Terlihat bahwa pemasok dengan kadar air tinggi (misalnya e dan k) menghasilkan efisiensi lebih rendah, yakni 82,53% dan 82,05%.

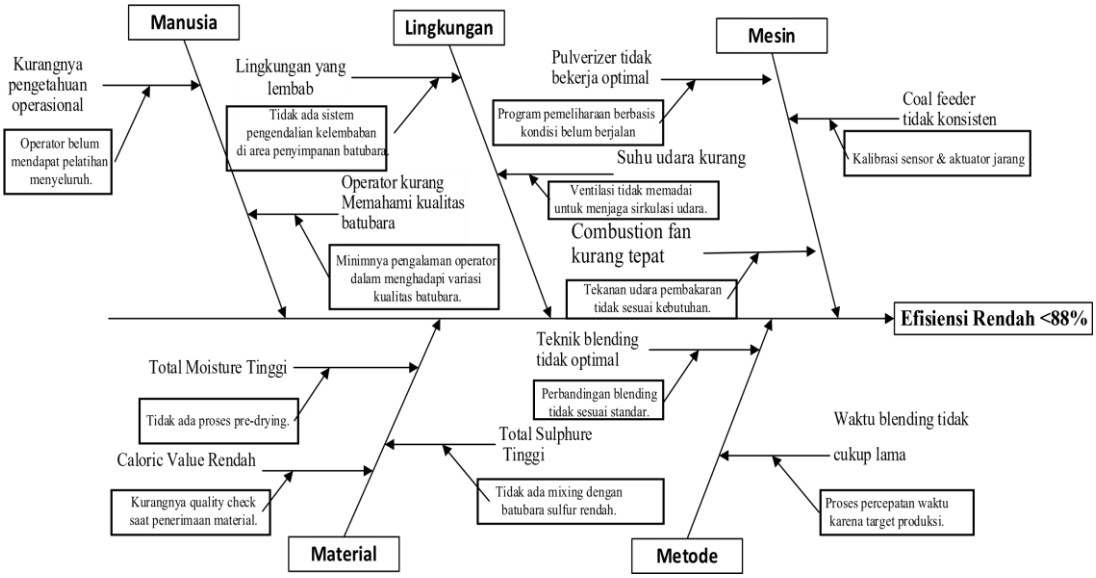
Sebaliknya, pemasok dengan kadar air lebih rendah menunjukkan efisiensi relatif lebih baik, meskipun masih di bawah standar 86–88%. Hal ini menegaskan bahwa kadar air menjadi faktor dominan yang memengaruhi performa pembakaran.



Gambar 3. Histogram *Gross Caloric Value*

Histogram *Gross Caloric Value* (GCV) pada Gambar 3 menampilkan variasi nilai kalor batubara dari berbagai pemasok. Deviasi yang besar, khususnya pada pemasok e dan k dengan nilai kalor 5.122 kcal/kg dan 5.780 kcal/kg, berkorelasi dengan efisiensi terendah. Sementara pemasok dengan nilai kalor mendekati spesifikasi, seperti i dan l, menunjukkan efisiensi relatif lebih tinggi. Hal ini menegaskan bahwa kestabilan nilai kalor berperan penting dalam menjaga konsistensi efisiensi *boiler*.

Diagram *Fishbone*

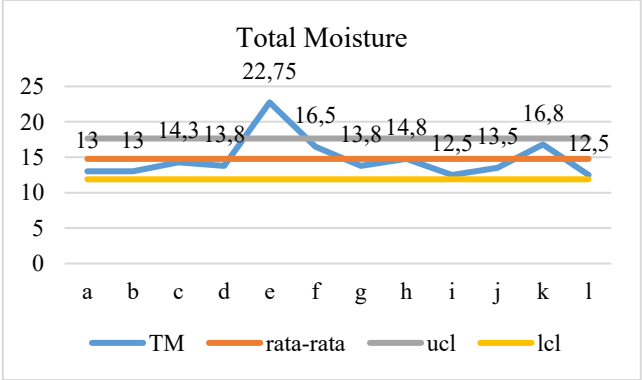


Gambar 4. Diagram *Fishbone*

Diagram *Fishbone* pada Gambar 4 digunakan untuk mengidentifikasi penyebab rendahnya efisiensi *boiler* mendapatkan faktor utama yang berkontribusi berasal dari lima

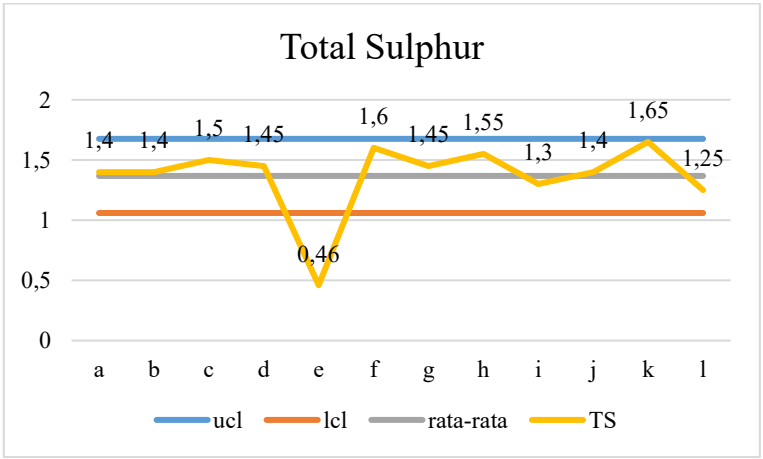
aspek, yaitu manusia, mesin, material, metode, dan lingkungan. Dari sisi manusia, kurangnya pelatihan operator serta minimnya pemahaman terhadap variasi kualitas batubara menjadi penyebab utama. Faktor mesin meliputi *coal feeder* yang tidak konsisten, *pulverizer* yang kurang optimal, serta *fan* pembakaran yang tidak tepat akibat kalibrasi dan pemeliharaan yang jarang dilakukan. Dari sisi material, tingginya kadar air dan sulfur serta rendahnya nilai kalor terkait dengan absennya proses *pre-drying* dan lemahnya *quality check*. Metode operasional juga berpengaruh, khususnya teknik *blending* yang tidak sesuai standar serta waktu pencampuran yang terbatas. Sementara dari sisi lingkungan, kelembaban tinggi di area penyimpanan batubara tanpa sistem pengendalian yang memadai turut memperburuk kondisi. Secara keseluruhan, diagram ini menunjukkan bahwa rendahnya efisiensi *boiler* merupakan hasil akumulasi faktor teknis dan manajerial yang saling berkaitan.

Peta Kendali



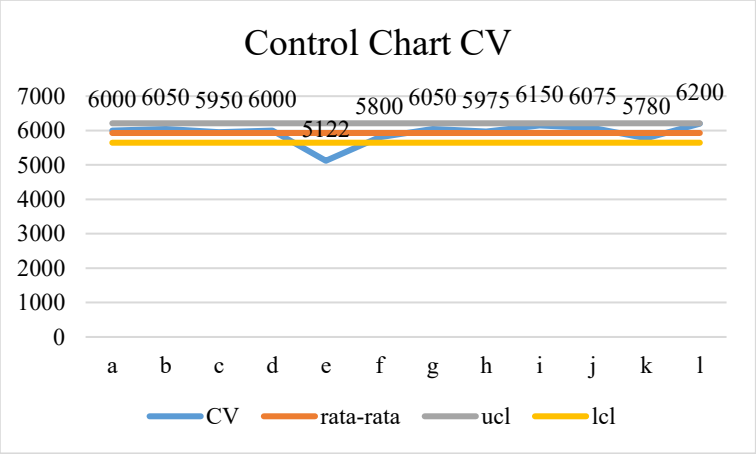
Gambar 5. Peta Kendali *Total Moisture*

Peta Kendali *Total Moisture* pada Gambar 5 menunjukkan bahwa sebagian besar data berada dalam batas kendali, namun terdapat penyimpangan signifikan pada pemasok e dengan kadar air 22,75%, jauh di atas spesifikasi. Hal ini mengindikasikan adanya ketidakstabilan kualitas pasokan batubara yang berdampak negatif terhadap proses pembakaran.



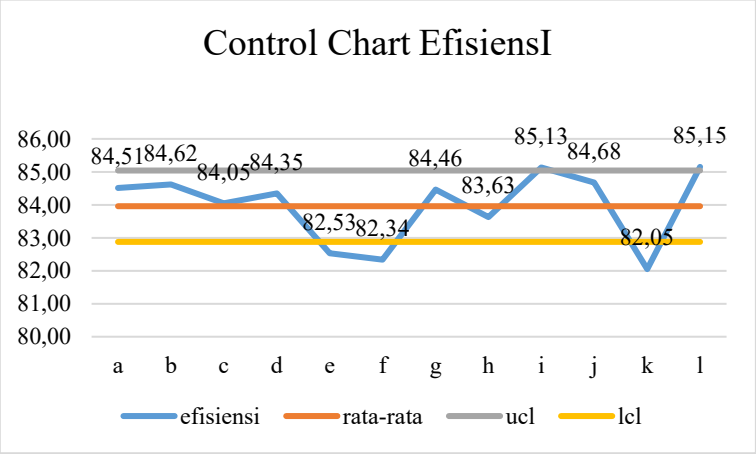
Gambar 6. Peta Kendali *Total Sulphur*

Peta Kendali *Total Sulphur* pada Gambar 6 memperlihatkan kadar sulfur relatif stabil di sekitar rata-rata, tetapi terdapat anomali pada pemasok e dengan nilai 0,46%, jauh di bawah batas kendali. Meskipun rendah, kondisi ini tetap menunjukkan adanya ketidakkonsistenan pasokan yang dapat memengaruhi keseragaman performa *boiler*.



Gambar 7. Peta Kendali *Caloric Value*

Peta Kendali *Caloric Value* pada Gambar 7 menampilkan sebagian besar nilai kalor berada dalam rentang kendali, kecuali pemasok e (5.122 kcal/kg) dan k (5.780 kcal/kg) yang menyimpang dari spesifikasi. Fluktuasi ini menegaskan bahwa nilai kalor tidak seragam, sehingga efisiensi pembakaran sulit dipertahankan pada level optimal.



Gambar 8. Peta Kendali Efisiensi

Peta Kendali Efisiensi seperti paa Gambar 8 menunjukkan bahwa sebagian besar titik pengamatan masih berada dalam batas kendali, tetapi efisiensi *boiler* secara umum berada di bawah standar target 86–88%. Pemasok e, f, dan k tercatat memiliki efisiensi terendah (82,34–82,05%), yang selaras dengan kualitas batubara yang tidak memenuhi spesifikasi.

Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk menganalisis kualitas batubara yang digunakan di PLTU serta hubungannya dengan efisiensi pembakaran *boiler*. Tahapan pengolahan data meliputi analisis menggunakan metode *Statistical Process Control* (SPC), perumusan

strategi perbaikan dengan pendekatan 5W+1H, serta simulasi *blending* batubara dari berbagai pemasok.

Analisis Kualitas Batubara dengan Metode SPC

Metode *Statistical Process Control* (SPC) digunakan untuk memantau stabilitas proses melalui parameter kualitas batubara yang paling berpengaruh, yaitu *total moisture* (TM), *total sulphur* (TS), dan *caloric value* (CV). Peta kendali (*control chart*) yang disusun menunjukkan variasi dari masing-masing parameter terhadap batas kendali atas (*Upper Control Limit/UCL*) dan batas kendali bawah (*Lower Control Limit/LCL*).

a. Pada parameter TM, ditemukan adanya penyimpangan signifikan pada pemasok e dengan nilai 22,75%, jauh di atas batas kendali. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kualitas pasokan batubara tidak stabil, sehingga energi pembakaran berkurang akibat tingginya kebutuhan untuk menguapkan air.
b. Pada parameter TS, sebagian besar data stabil, tetapi ditemukan anomali pada pemasok e dengan nilai 0,46%, yang walaupun rendah tetap menunjukkan ketidakkonsistenan kualitas (Krisnaningsih *et al*., 2022).
c. Pada parameter CV, variasi terbesar terjadi pada pemasok e (5122 kcal/kg) dan k (5780 kcal/kg), yang keduanya berada di luar spesifikasi, sehingga berimplikasi langsung pada penurunan efisiensi *boiler*.

Secara umum, hasil SPC memperlihatkan bahwa variasi kualitas batubara belum terkendali sepenuhnya. Hal ini menjadi salah satu penyebab utama rata-rata efisiensi *boiler* berada di bawah standar, yakni hanya 83,96% dari target 86–88%.

Analisis Kualitas Batubara dengan Metode SPC

Berdasarkan hasil analisis *fishbone*, diketahui bahwa rendahnya efisiensi *boiler* tidak hanya disebabkan oleh kualitas batubara, tetapi juga faktor manusia, mesin, metode, dan lingkungan. Untuk merumuskan solusi perbaikan, digunakan pendekatan 5W+1H sebagai terlihat pada Tabel 2 di bawah.

Tabel 2. 5W+1H

Kategori	*What* (Apa)	*Why* (Mengapa)	*Where* (Dimana)	*When* (Kapan)	*Who* (Siapa)	*How* (Usulan Perbaikan)
Manusia	Operator kurang terlatih dan belum terbiasa menghadapi variasi kualitas batubara	Program pelatihan rutin belum ada; sebagian operator baru	*Boiler* Unit 4	2022	Operator, supervisor, tim HRD/*training*	Susun program pelatihan terstruktur dan *refresh* tahunan; buat simulasi kasus variasi batubara serta *coaching* dari senior
Lingkungan	Penyimpanan batubara tidak terkontrol (kelembaban & ventilasi buruk)	*Stockpile* terbuka, drainase kurang baik, ventilasi tidak memadai	Area *stockpile*	2022	Tim *coal yard*, K3, manajemen	Bangun penutup/*dome*, pasang sensor kelembaban & detektor gas, perbaiki ventilasi, redesign tata letak, buat SOP inspeksi rutin

Tabel 2. 5W+1H (Lanjutan)

Kategori	*What* (Apa)	*Why* (Mengapa)	*Where* (Dimana)	*When* (Kapan)	*Who* (Siapa)	*How* (Usulan Perbaikan)
Mesin	Perawatan & kalibrasi peralatan kurang optimal; suplai udara pembakaran tidak sesuai	Pemeliharaan masih *corrective*; kalibrasi *coal feeder* jarang; *fan* tidak berbasis O_2 *analyzer*	*Boiler* Unit 4	2022	Tim *maintenance*, instrumentasi, operator	Terapkan *predictive maintenance*, jadwalkan kalibrasi *feeder* rutin, gunakan *automatic control* berbasis O_2 *analyzer*, optimalkan *excess air*
Material	Kualitas batubara tidak terjaga (*moisture* tinggi, sulfur tinggi, CV bervariasi)	Tidak ada *pre-drying*; *quality check* tidak rutin; *blending* fokus CV tanpa kontrol sulfur	*Boiler* Unit 4	2022	Tim *coal yard*, QC, pemasok	Terapkan *pre-drying*, lakukan uji kualitas setiap *batch*, tetapkan standar kontrak pemasok, buat rasio *blending* rendah-sulfur, gunakan *software* optimasi *blending*
Metode	Proses *blending* tidak standar dan dipercepat karena target produksi	Tidak ada SOP baku; waktu *blending* dikurangi untuk mengejar beban puncak	*Boiler* Unit 4	2022	Supervisor produksi, operator *coal handling*	Buat SOP *blending* berbasis CV & sulfur, gunakan otomatisasi *conveyor*, tetapkan waktu *blending minimal*, tambah *shift* bila perlu

Strategi ini diharapkan mampu menurunkan variasi kualitas batubara sehingga efisiensi *boiler* dapat ditingkatkan.

Simulasi *Blending* Batubara

Selain pendekatan SPC dan 5W+1H, dilakukan pula simulasi *blending* batubara untuk menstabilkan kualitas. Metode *weighted average* digunakan untuk menghitung kualitas campuran dari dua atau lebih pemasok, dengan formula sebagai berikut:

$$Qblend = \frac{\sum(Qi \times Wi)}{\sum Wi} \quad (1)$$

dengan Qi adalah parameter kualitas batubara pemasok ke-i (misalnya nilai kalor, kadar air, kadar sulfur), dan Wi adalah proporsi campuran dari pemasok ke-i.

Berdasarkan data efisiensi masing-masing pemasok, terlihat bahwa penggunaan batubara secara individual dari *Supplier* 9, 10, dan 12 hanya menghasilkan efisiensi 85.13%, 84.68%, dan 85.15%. Nilai ini masih berada di bawah target kinerja *boiler* PLTU sebesar 88%. Oleh karena itu, diperlukan strategi *blending* dengan proporsi tertentu untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan.

Dengan asumsi bobot proporsi *Supplier* 9 sebesar 30%, *Supplier* 10 sebesar 40%, dan *Supplier* 12 sebesar 30%, diperoleh efisiensi *blending* awal sebesar 84.956%. Untuk mencapai target 88%, digunakan faktor peningkatan (K) sebesar 1.03583, yang kemudian

diaplikasikan pada efisiensi masing-masing *supplier*. Hasil simulasi pada tabel 3 menunjukkan bahwa efisiensi akhir dari *Supplier* 9, 10, dan 12 meningkat menjadi 88.19%, 87.71%, dan 88.21%, dengan rata-rata efisiensi *blending* tercapai pada 88.004%.

Tabel 3. Simulasi Faktor Peningkatan Efisiensi (K)

Supplier	**Efisiensi Awal (%)**	**Faktor K**	**Efisiensi Akhir (%)**
9	85.13	1.03583	88.19
10	84.68	1.03583	87.71
12	85.15	1.03583	88.21

Selain efisiensi, parameter kualitas batubara lain seperti *total moisture, ash content, volatile matter, fixed carbon, total sulphur,* dan *caloric value* juga dihitung untuk memastikan hasil *blending* sesuai dengan standar PLTU, yang terlihat pada Tabel 4. Perhitungan menunjukkan bahwa *blended coal* memiliki total *moisture* 12.9%, total *sulphur* 1.325%, dan *caloric value* sebesar 6135 kcal/kg, yang masih berada dalam rentang yang dapat diterima untuk menjaga stabilitas pembakaran.

Tabel 4. Hasil *Blending* Parameter Kualitas Batubara

Parameter	***Supplier* 9**	***Supplier* 10**	***Supplier* 12**	**Hasil *Blending***
Total Moisture (%)	12.5	13.5	12.5	12.9
Inherent Moisture (%)	5.0	5.5	5.0	5.2
Ash Content (%)	6.5	7.0	6.2	6.61
Volatile Matter (%)	40.0	40.0	40.0	40.0
Fixed Carbon (%)	37.0	36.5	37.5	36.95
Total Sulphur (%)	1.3	1.4	1.25	1.325
Caloric Value (kcal/kg)	6150	6075	6200	6135
Efisiensi (%)	88.19	87.71	88.21	88.004

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa strategi *blending* dengan proporsi 30%-40%-30% menghasilkan kualitas batubara yang memenuhi standar operasional PLTU, baik dari sisi efisiensi maupun parameter kimia utama. Dengan demikian, penerapan *blending* terstruktur dapat menjadi solusi praktis untuk mengatasi variasi kualitas batubara antar pemasok serta menjaga stabilitas operasi *boiler* secara berkelanjutan.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi kualitas batubara, khususnya kandungan *total moisture* (TM), *total sulphur* (TS), dan *caloric value* (CV), memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi *boiler* di PLTU tersebut. Nilai yang menyimpang dari spesifikasi *boiler* terbukti menurunkan efisiensi pembakaran hingga di bawah target 88%, sejalan dengan temuan Rousseau & Laubscher (2020) yang menekankan dampak negatif kandungan abu dan kelembaban tinggi terhadap performa termal. *Control chart* yang disusun juga menunjukkan bahwa fluktuasi kualitas batubara kerap berada di luar batas kendali, mengindikasikan lemahnya sistem *quality control* dalam rantai pasok.

Penerapan diagram *fishbone* dan tabel 5W+1H berhasil mengidentifikasi akar permasalahan utama, mulai dari keterbatasan kompetensi operator, kurangnya pengendalian lingkungan di *stockpile*, hingga absennya prosedur standar dalam proses *blending*. Hal ini mengonfirmasi hasil penelitian Liu *et al*. (2021) dan Maulana *et al*. (2020) yang menyatakan bahwa faktor geologi dan proses pengelolaan material berperan besar terhadap kualitas batubara yang diterima pembangkit.

Simulasi *blending* menunjukkan bahwa penggunaan batubara dari beberapa pemasok dengan proporsi terkontrol mampu meningkatkan efisiensi rata-rata menjadi 88,004%,

melampaui batas minimal target. Strategi ini konsisten dengan studi Fitriani *et al*. (2024) di PT Bukit Asam serta penelitian global Wang *et al*. (2025) dan Li *et al*. (2025), yang menekankan bahwa optimasi *blending* tidak hanya menstabilkan performa pembakaran, tetapi juga mampu menurunkan biaya bahan bakar serta emisi polutan. Dengan demikian, *blending* dapat diposisikan sebagai strategi operasional jangka panjang dalam manajemen energi berbasis batubara.

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa kualitas batubara, khususnya parameter *total moisture*, *total sulphur*, dan *caloric value*, memiliki peran krusial dalam menentukan efisiensi pembakaran *boiler* di PLTU. Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi kualitas batubara dari pemasok seringkali menyebabkan penurunan efisiensi di bawah target 88%. Melalui pendekatan *fishbone* diagram dan 5W+1H, strategi simulasi *blending* suplier 9, 10 dan 12 dengan proporsi 30%, 40% dan 30% secara berurutan menghasilkan kualitas batubara yang memenuhi standar operasional PLTU dan mampu meningkatkan efisiensi hingga 88% serta menjaga kualitas batubara sesuai spesifikasi. Temuan ini memberikan strategi praktis dalam mengoptimalkan performa *boiler* sekaligus mendukung manajemen rantai pasok yang lebih efektif, sehingga dapat berkontribusi terhadap pengembangan pendekatan integratif dalam peningkatan efisiensi energi dan keberlanjutan operasi PLTU.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar PLTU tersebut untuk memperkuat sistem pengendalian kualitas batubara dengan menerapkan uji laboratorium rutin pada setiap *batch* pasokan, khususnya untuk parameter *total moisture*, *total sulphur*, dan *caloric value*. Selain itu, strategi *blending* sebaiknya dijadikan standar operasional untuk menstabilkan kualitas bahan bakar dan menjaga efisiensi *boiler* di atas target minimal. Perusahaan juga perlu mengembangkan program pelatihan berkelanjutan bagi operator guna meningkatkan kompetensi dalam menghadapi variasi kualitas batubara serta mengoptimalkan pemanfaatan peralatan kontrol otomatis. Untuk mendukung keberlanjutan, investasi pada infrastruktur penyimpanan tertutup dan penerapan sistem pemeliharaan berbasis kondisi akan sangat membantu dalam menjaga keandalan operasi. Di sisi akademis, penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas cakupan data jangka panjang, melibatkan aspek ekonomi secara rinci, serta mengeksplorasi penerapan metode optimasi *blending* berbasis teknologi kecerdasan buatan agar hasil yang diperoleh lebih komprehensif dan aplikatif bagi industri pembangkitan listrik.

DAFTAR PUSTAKA

Amsah, K., Kurnia, F., & Malim, F. (2022). Analisis Kualitas Daya Listrik Menggunakan Metode Statistical Process Control (SPC) di Gedung Laboratorium Program Studi Teknik. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, *18*(2), 102–110.

Botev, Z. I., Gnedin, A., & Pitman, J. (2020). Statistical Models for Energy Systems: An Application to Coal Quality Variability. *Journal of Applied Probability*, *57*(3), 715–733. https://doi.org/10.1017/jpr.2020.38

Fawzy, S. (2020). The Impact of Coal Quality on the Efficiency of Power Plants. *International Journal of Energy Engineering*, *10*(2), 33–39.

Fitriani, S., Pratama, R., & Wijaya, H. (2024). Simulasi Pencampuran Batubara untuk Optimasi Kualitas Bahan Bakar di PT Bukit Asam. *Jurnal Energi Dan Pertambangan*, *8*(1), 45–55.

Guo, Y., Liu, X., Gao, Y., Wang, X., Ding, L., Pan, W., Hua, C., He, Y., Chen, X., Dai, Z., Yu, G., & Wang, F. (2025). AutoML for calorific value prediction using a large database from the coal gasification practices in China. *International Journal of Coal Science & Technology*, *12*(1), 63. https://doi.org/10.1007/s40789-025-00763-8

Hou, Q., Li, J., Yang, S., & Chen, B. (2024). Reservoir Characteristics of Deep Coal Seams in Ordos Basin and Their Implications for Energy Utilization. *Energy Exploration & Exploitation*, *42*(1), 31–47. https://doi.org/10.1177/01445987231175312

Huang, C., Zheng, Y., Zhao, H., Zhu, J., Fu, Y., Tang, Z., Zhang, C., & Peng, T. (2025). Intelligent Deep Learning Modeling and Multi-Objective Optimization of Boiler Combustion System in Power Plants. *Processes*, *13*(8), 2340. https://doi.org/10.3390/pr13082340

Idarwati, N., & Maulia, D. (2024). Analisis Kualitas Batubara di Daerah Muara Enim dan Kaitannya dengan Efisiensi Pembangkit. *Jurnal Energi Dan Geologi*, *12*(1), 15–23.

Krisnaningsih, E., Sulistyo, A. B., Rahim, A., & Dwiyatno, S. (2022). Fuzzy risk priority number assessment to detect midsole product defects. *Jurnal Sistem Dan Manajemen Industr*, *6*(1), 77–88.

Li, H., Zhao, K., & Xu, M. (2025). Reinforcement Learning Approach for Cost-effective and Clean Coal Blending Optimization. *Energy*, *284*, 130512. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.130512

Liu, S., Fan, W., Wu, X., Chen, J., Liu, Z., & Guo, H. (2021). Heterogeneous Reaction of N2O and Formation of NO with Coal Char in The Simulated Air-Staged Combustion Atmosphere of Pulverized Coal at High Temperature. *Fuel*, *289*, 119856. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119856

Maulana, R., Dewanto, R., & Abriansyah, T. (2020). Karakteristik Batubara Berdasarkan Analisis Proksimat di Daerah Air Laya, Sumatera Selatan. *Jurnal Geosains Dan Teknologi*, *3*(2), 77–86.

Rachman, T., Hidayat, A., Rahmat, M., & Wibosono, R. (2024). Pengaruh Geologi terhadap Variasi Kualitas Batubara di Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, *20*(1), 1–12.

Ramadhani, R., & Sutabri, T. (2024). Penerapan Statistical Process Control dalam Monitoring Kualitas Daya Listrik. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi*, *10*(2), 211–220.

Rousseau, P. G., & Laubscher, R. F. (2020). Coal Quality Effects on the Performance of Utility Boilers. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *120*(3), 157–164. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2020/v120n3a1

Sulistyo, A. B., & Mutiawati, S. H. (2021). *Usulan Jadwal Preventive Maintenance Komponen Ban Pada Truk Tronton 20.000 Kl Menggunakan Metode Age Replacement*. *7*(2), 137–146.

Sulistyo, A. B., & Rinaldi, A. (2020). Pemilihan Komposisi Batubara GC-8 atau SMM untuk Mendapatkan Kualitas dan Biaya Produksi yang Optimum di PT. VINYSEA. *Jurnal Intent: Jurnal Industri Dan Teknologi Terpadu*, *3*(2), 52–66. https://doi.org/10.47080/intent.v3i2.951

Wang, Z., Liu, Q., & Tang, Y. (2025). Surrogate-based Optimization Framework for Coal Blending in Power Generation. *Applied Energy*, *348*, 121456. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.121456