

PENGARUH JENIS BATUBARA SUB BITUMINUS TERHADAP JUMLAH KONSUMSI BATUBARA SERTA TERHADAP EMISI SO₂ DAN NO₂ PADA CEROBONG BOILER BATUBARA PT.X

Tito Dwi Septian¹, Joko Sutrisno²

titodwi85@gmail.com¹, jsutrisno.adibuana@gmail.com²

Universitas PGRI Adi Buana Surabaya

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis batubara sub-bituminus terhadap jumlah konsumsi batubara dan emisi gas buang sulfur dioksida (SO₂) serta nitrogen dioksida (NO₂) pada cerobong boiler batubara di PT.X. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan observasional. Data yang dianalisis meliputi nilai kalori batubara antara 6.025,20–6.095 kkal/kg, jumlah konsumsi batubara, dan hasil uji emisi yang dilakukan oleh laboratorium lingkungan terakreditasi KAN. Sebelum melakukan analisis regresi linear, data diuji normalitasnya terlebih dahulu menggunakan SPSS. Setelah data dinyatakan normal, metode analisis yang digunakan adalah regresi linear untuk menguji hubungan antara nilai kalori batubara, konsumsi batubara, dan emisi gas buang. Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi negatif antara nilai kalori batubara dan intensitas konsumsi batubara ($r_s = -0,9$), serta korelasi negatif terhadap emisi SO₂ dan NO₂. Selain itu, terdapat perbedaan signifikan konsumsi batubara dan kadar emisi antara Tipe A (sub-bituminus rendah) dan Tipe B (sub-bituminus tinggi). Semakin tinggi nilai kalori batubara, semakin rendah jumlah konsumsi dan emisi yang dihasilkan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan PT.X dalam pengelolaan standar kualitas batubara untuk meningkatkan efisiensi energi dan pengendalian emisi gas buang, serta mendukung upaya pemenuhan baku mutu emisi sesuai peraturan lingkungan hidup yang berlaku.

Kata Kunci: Nilai Kalori Batubara, Sub-Bituminus, Konsumsi Batubara, Emisi SO₂, Emisi NO₂, Statistik Non Parametrik.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of sub-bituminous coal type on coal consumption and the emissions of sulfur dioxide (SO₂) and nitrogen dioxide (NO₂) at the stack of coal boilers in PT.X. A quantitative approach with an observational design was used in this research. The data analyzed includes coal calorific values ranging from 6,025.20 to 6,095 kcal/kg, coal consumption, and emission test results conducted by an accredited KAN environmental laboratory. Before performing linear regression analysis, the data was first tested for normality using SPSS. After the data was confirmed to be normally distributed, linear regression analysis was applied to examine the relationship between coal calorific values, coal consumption, and emissions. The results showed a negative correlation between the coal calorific value and coal consumption intensity ($r_s = -0.9$), as well as negative correlations with SO₂ and NO₂ emissions. Additionally, significant differences were found in coal consumption and emission levels between Type A (low sub-bituminous) and Type B (high sub-bituminous). The higher the calorific value of the coal, the lower the coal consumption and emissions produced. The findings of this study are expected to serve as a basis for PT.X in managing coal quality standards to improve energy efficiency and control emissions, as well as support efforts to meet emission quality standards in accordance with applicable environmental regulations.

Keywords: Coal Calorific Value, Sub-Bituminous, Coal Consumption, SO₂ Emissions, NO₂ Emissions, Non-Parametric Statistics.

PENDAHULUAN

Pencemaran udara menjadi salah satu permasalahan lingkungan hidup yang signifikan dan mendapat perhatian luas, baik secara nasional maupun global. Sumber

pencemaran udara di Indonesia berasal dari berbagai aktivitas, termasuk transportasi, pembangkit listrik, serta sektor industri. Di antara berbagai sumber tersebut, emisi dari proses pembakaran bahan bakar fosil dalam kegiatan industri memiliki kontribusi yang cukup besar terhadap meningkatnya konsentrasi gas pencemar di atmosfer. Salah satu aktivitas yang menghasilkan emisi cukup tinggi adalah pembakaran batubara pada boiler industri.

Proses pembakaran batubara dalam boiler menghasilkan berbagai polutan, di antaranya sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2). Kedua jenis gas ini menjadi perhatian utama karena memiliki dampak langsung terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Emisi SO_2 dan NO_2 dapat berkontribusi terhadap pembentukan hujan asam, penurunan kualitas udara ambien, serta risiko gangguan pernapasan pada masyarakat yang tinggal di sekitar area industri. Penelitian yang dilakukan oleh (Bian, 2020) menunjukkan bahwa emisi gas buang dari boiler batubara dipengaruhi oleh karakteristik batubara yang digunakan, termasuk kandungan sulfur dan nilai kalori, serta kondisi operasi pembakaran.

Meskipun memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, batubara tetap menjadi bahan bakar pilihan utama di banyak sektor industri di Indonesia. Hal ini tidak terlepas dari pertimbangan ketersediaan cadangan batubara domestik yang melimpah, biaya pengadaan yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar minyak, serta kestabilan pasokan yang relatif terjamin. Dalam praktiknya, banyak perusahaan industri mengandalkan batubara sub-bituminus karena sifatnya yang mudah terbakar dan harga yang lebih kompetitif.

Sebagai upaya pengendalian pencemaran udara, pemerintah Indonesia telah mengeluarkan beberapa kebijakan dan peraturan yang mengatur baku mutu emisi gas buang dari sumber tidak bergerak. Di antaranya adalah Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 10 Tahun 2009 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak yang menetapkan batas maksimum konsentrasi SO_2 dan NO_2 yang diizinkan dalam gas buang cerobong industri. Selain itu, dalam rangka meningkatkan transparansi dan akuntabilitas pelaporan emisi industri, pemerintah melalui Kementerian Perindustrian menerbitkan Surat Edaran Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2025 tentang Kewajiban Pelaporan Emisi Polutan Udara dan Gas Rumah Kaca melalui Sistem Informasi Industri Nasional (SIINas). Selain itu, penelitian (Triani et al., 2024) menekankan bahwa pengukuran emisi secara real-time dengan menggunakan Continuous Emission Monitoring Data dapat meningkatkan akurasi perhitungan faktor emisi dan membantu perusahaan dalam melakukan pengendalian pencemaran udara secara lebih efektif.

PT.X merupakan perusahaan agroindustri yang menggunakan boiler berbahan bakar batubara sub-bituminus sebagai sumber energi panas proses produksinya. Berdasarkan data internal perusahaan, mutu batubara yang diterima dari pemasok menunjukkan variasi yang cukup signifikan, terutama pada parameter nilai kalor yang berkisar antara 6.000 hingga 6.100 kkal/kg. Variasi nilai kalori ini berpotensi memengaruhi efisiensi penggunaan bahan bakar serta besaran emisi gas buang yang dihasilkan. Namun, hingga saat ini belum terdapat kajian yang secara khusus menilai sejauh mana variasi nilai kalori batubara sub-bituminus memengaruhi jumlah konsumsi batubara dan kadar emisi SO_2 dan NO_2 pada cerobong boiler perusahaan.

Penelitian ini penting dilakukan sebagai dasar pengambilan kebijakan teknis perusahaan dalam menetapkan standar minimal mutu batubara yang dapat diterima. Dengan demikian, perusahaan diharapkan mampu meningkatkan efisiensi konsumsi energi sekaligus memastikan emisi gas buang yang dihasilkan tetap dalam batas baku mutu yang ditetapkan regulasi yang berlaku.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan rancangan penelitian kuantitatif dengan pendekatan observasional atau pengamatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jenis batubara sub bituminus pada beberapa kalori yang berbeda yaitu batubara sub bituminus dengan nilai kalori sebesar 6.046 kkal/kg, 6.025,2 kkal/kg, 6.078,56 kkal/kg, 6.057 kkal/kg dan 6.095 kkal/kg, terhadap jumlah konsumsi batubara yang digunakan serta terhadap emisi gas buang SO₂ dan NO₂ pada cerobong boiler batubara. Hasil dari pembakaran batubara akan dilakukan pengujian emisi cerobong oleh laboratorium lingkungan yang sudah terakreditasi KAN. Selanjutnya akan dilakukan analisis data untuk mengidentifikasi pengaruh jenis batubara sub-bituminus terhadap jumlah batubara yang digunakan selama proses pembakaran serta terhadap emisi gas buang SO₂ dan NO₂ yang dihasilkan pada cerobong boiler batubara. Rancangan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 1. Alur Rancangan Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Penerimaan Batu bara Desember 2024 s.d. April 2025

Batubara merupakan bahan bakar utama dalam sistem pembakaran boiler batubara milik PT.X. Oleh karena itu, mutu dan karakteristik batubara yang diterima sangat mempengaruhi efisiensi operasional, stabilitas pembakaran, serta emisi gas buang yang dihasilkan. Dalam rangka menjaga konsistensi performa pembakaran dan mematuhi regulasi lingkungan yang berlaku, PT.X secara rutin melakukan pengujian kualitas terhadap setiap penerimaan batubara.

Pada periode Desember 2024 hingga April 2025, PT.X menerima pasokan batubara sub-bituminus dari beberapa mitra pemasok. Meskipun tergolong dalam kelas sub-bituminus, batubara yang diterima ditetapkan standar minimal penerimaan kalori batubara oleh PT.X yaitu 5.850 kkal/kg. Nilai ini menunjukkan bahwa batubara yang digunakan termasuk dalam sub-bituminus dengan kualitas mendekati batubara bituminus rendah,

yang umumnya lebih efisien dalam menghasilkan panas dan menghasilkan emisi yang lebih terkendali apabila dikombinasikan dengan sistem pembakaran yang optimal.

Setiap kali batubara tiba di lokasi, tim QC PT.X melakukan serangkaian prosedur pemeriksaan dan dokumentasi. Pemeriksaan ini meliputi identifikasi asal muatan, visual inspeksi, serta pengambilan sampel untuk uji laboratorium.

Setelah itu, sampel diuji di laboratorium internal PT.X menggunakan metode *bomb calorimetry* sesuai standar ASTM D5865 untuk mengetahui nilai kalor total batubara dalam satuan kilokalori per kilogram (kkal/kg). Proses penerimaan batubara di PT.X dapat dilihat pada gambar 4.1



Gambar 1. Penerimaan Batubara

Variasi nilai kalor batubara yang diterima selama periode ini menjadi salah satu dasar utama dalam analisis pada penelitian ini. Karena nilai kalor menentukan seberapa besar energi yang tersedia dari satu kilogram batubara, maka fluktuasi nilai kalor sangat mungkin mempengaruhi jumlah batubara yang dikonsumsi serta jumlah emisi gas buang, khususnya sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2), yang dilepaskan ke udara melalui cerobong boiler.

Berikut adalah rekapitulasi data hasil pengujian laboratorium terhadap nilai kalor batubara yang diterima dari Desember 2024 hingga April 2025 dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Tabel Penerimaan Batubara Desember 2024 – Mei 2025

No.	Tanggal	Supplier	Jumlah (Kg)	Kalori (Kkal/Kg)
1.	23/12/2024 – 24/12/2024	PT. KPL	651.293	6.046
2.	30/01/2025 – 31/01/2025	PT. JSBU	579.472	6.025,20
3.	25/02/2025 – 28/02/2025	PT. BIE	601.269	6.078,56
4.	24/03/2025 – 26/03/2025	PT. KPL	814.961	6.057
5.	28/04/2025 – 30/04/2025	PT. JSBU	687.312	6.095

Data Konsumsi Batu bara Boiler Batu bara 3 PT.X Januari 2025 s.d. Mei 2025

Boiler Batubara 3 merupakan salah satu unit pembangkit uap di fasilitas PT.X yang beroperasi dengan sistem pembakaran berbasis bahan bakar padat, yaitu batubara sub-bituminus. Keandalan dan efisiensi sistem pembakaran sangat bergantung pada karakteristik bahan bakar yang digunakan, terutama nilai kalor sebagai indikator utama kapasitas energi dari batubara. Oleh karena itu, konsumsi batubara menjadi salah satu parameter operasional penting yang dianalisis dalam penelitian ini.

Konsumsi batubara dalam penelitian ini mengacu pada total jumlah batubara dalam satuan ton yang digunakan secara aktual untuk mengoperasikan Boiler Batubara 3 setiap bulan, sebagaimana tercatat oleh sistem penimbangan internal dan log sheet harian operator. Selain jumlah konsumsi, data jam operasi boiler (jam jalan) juga dicatat sebagai variabel penting untuk mengukur intensitas konsumsi batubara.

Intensitas konsumsi batubara dinyatakan dalam satuan kg/jam, yaitu jumlah batubara yang dikonsumsi per jam operasi. Parameter ini memberikan gambaran mengenai efisiensi penggunaan bahan bakar relatif terhadap waktu operasi, yang relevan dalam konteks efisiensi energi dan pengendalian emisi di sektor industri.

Perlu dicatat bahwa dalam sistem logistik dan operasional PT.X, batubara yang diterima pada akhir bulan tertentu disimpan terlebih dahulu di stockpile dan mulai digunakan pada bulan berikutnya.

Berikut adalah rekapitulasi data konsumsi batubara, jam operasi boiler, serta intensitas konsumsi batubara pada Boiler Batubara 3 PT.X selama periode Januari hingga Mei 2025 dapat dilihat pada tabel 2 :

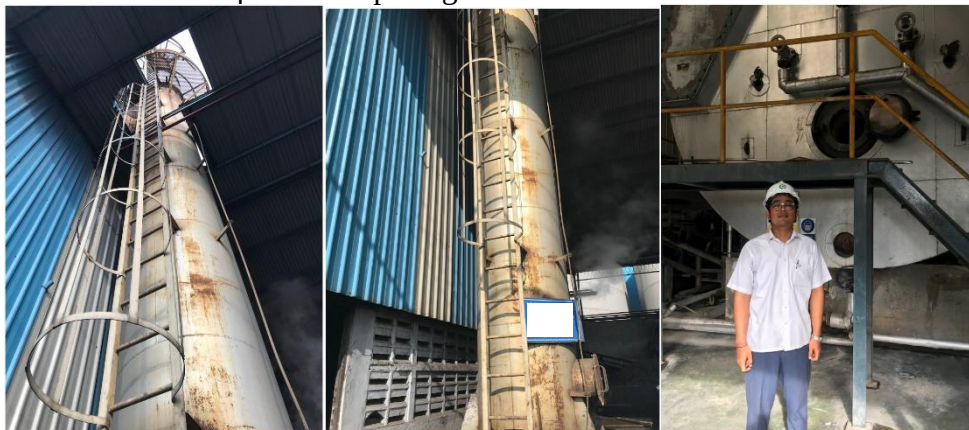
Tabel 2. Tabel Penggunaan Batubara Januari – Mei 2025

No.	Bulan	Kalori Batubara yang digunakan (Kkal/Kg)	Jam Jalan (Jam)	Jumlah Batubara yang digunakan (Ton)	Intensitas Jumlah Batubara yang digunakan (Ton/Jam)
1.	Januari	6.046	431	572	1,33
2.	Februari	6.025,20	227	338,5	1,49
3.	Maret	6.078,56	490	503	1,03
4.	April	6.057	662	729,6	1,10
5.	Mei	6.095	314	317	1,01

Analisis lebih lanjut terhadap hubungan nilai kalor dan intensitas konsumsi batubara akan dibahas pada Sub Bab D, menggunakan pendekatan grafik dan korelasi kuantitatif.

Hasil Uji Emisi Cerobong Boiler Batu bara 3 PT.X Januari 2025 s.d. Mei 2025

Boiler Batubara 3 sebagai unit pembangkit uap di PT.X menghasilkan emisi gas buang yang terdiri dari berbagai komponen, termasuk gas pencemar utama seperti sulfur dioksida SO_2 dan nitrogen dioksida NO_2 . Kedua parameter ini merupakan indikator penting dalam penilaian dampak lingkungan udara dari sumber emisi tidak bergerak, serta merupakan parameter wajib dalam pengujian emisi sesuai regulasi nasional. Boiler batubara 3 milik PT.X dapat dilihat pada gambar 4.2



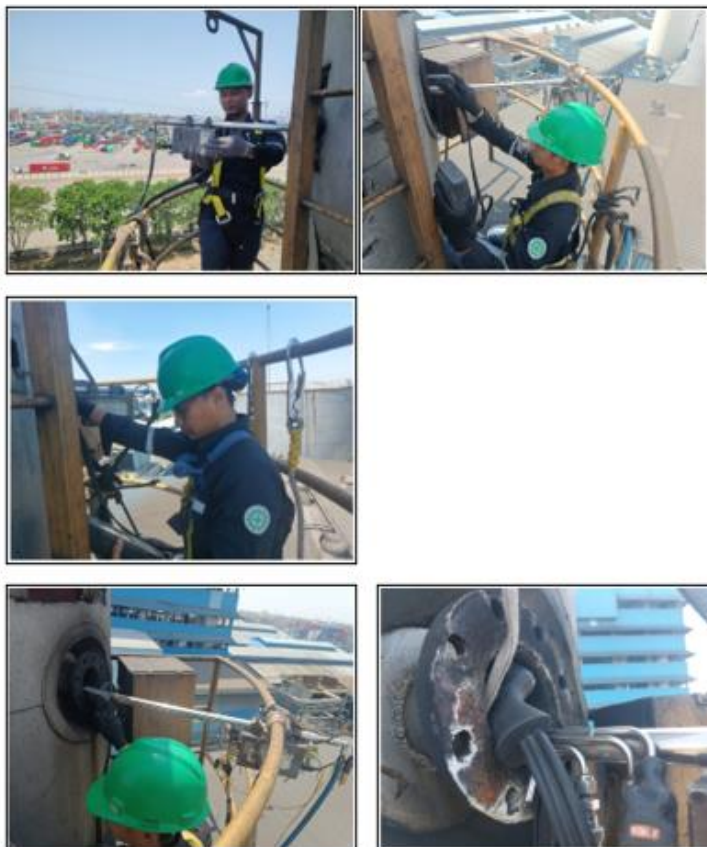
Gambar 2. Cerobong Boiler Batubara 3 PT.X

Dalam penelitian kali ini, pengujian emisi cerobong boiler batubara 3 dilakukan

setiap akhir bulan agar mengetahui emisi yang dihasilkan pada setiap kalori batubara yang digunakan di boiler batubara 3.

Pengujian emisi SO_2 dan NO_2 dilakukan oleh laboratorium lingkungan yang sudah terakreditasi KAN dan memiliki petugas pengambil contoh yang tersertifikasi. Pengujian dilakukan oleh PT. SYS Lab dengan metode direct reading.

Pengukuran dilakukan pada titik sampling representatif di cerobong utama Boiler Batubara 3, pada ketinggian dan lokasi yang memenuhi kriteria teknis sesuai pedoman. Baku mutu emisi mengacu pada Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 10 Tahun 2009. Pengujian emisi cerobong boiler batubara 3 PT.X dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Pengujian Emisi Cerobong Boiler Batubara 3 Bulan Januari – Juni 2025

Berikut adalah rekapitulasi hasil pengujian emisi cerobong Boiler Batubara 3 menggunakan metode direct reading selama Januari hingga Mei 2025 :

Tabel 3. Tabel Uji Emisi Cerobong Boiler Batubara Januari – Mei 2025

No.	Bulan	Tanggal Uji	Emisi SO_2 yang dihasilkan (mg/Nm ³)	Baku Mutu	Emisi NO_2 yang dihasilkan (mg/Nm ³)	Baku Mutu
1	Januari	31/01/2025	11	750	132	825
2	Februari	26/02/2025	12	750	144	825
3	Maret	25/03/2025	8	750	96	825
4	April	29/04/2025	10	750	120	825
5	Mei	22/05/2025	7	750	84	825

Analisa Data Pengaruh Kalori Batu bara Terhadap Jumlah Konsumsi Batu bara

Nilai kalor batubara merupakan parameter utama yang menentukan seberapa besar energi panas yang dihasilkan dari setiap satuan massa batubara yang dibakar. Dalam sistem pembakaran boiler, semakin tinggi nilai kalor batubara, maka semakin sedikit

jumlah batubara yang dibutuhkan untuk menghasilkan output energi panas yang sama. Oleh karena itu, pemahaman mengenai pengaruh nilai kalor terhadap konsumsi batubara sangat penting dalam upaya peningkatan efisiensi energi dan pengurangan beban lingkungan.

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis hubungan antara nilai kalor batubara (dalam satuan kkal/kg) dengan intensitas jumlah batubara yang digunakan, yaitu konsumsi batubara dalam satuan ton per jam operasi boiler (MT/jam). Data yang digunakan berasal dari hasil pencatatan operasional Boiler Batubara 3 PT.X selama periode Januari hingga Mei 2025, yang telah dikorelasikan dengan data hasil pengujian nilai kalor batubara dari bulan sebelumnya (karena sistem penggunaan batubara menerapkan first in–next month use).

Sebelum melakukan analisa data pengaruh kalori batubara terhadap jumlah konsumsi batubara, terlebih dahulu dilakukan uji normalitas data. Jika data terdistribusi normal maka dapat dilakukan analisa data menggunakan regresi linear sederhana yang merupakan salah satu metode analisa statistik parametrik. Hasil uji normalitas data kalori batubara dan intensitas jumlah konsumsi batubara dapat dilihat pada gambar 4.

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Kalori Batubara	,149	5	,200 [*]	,986	5	,964
Intensitas Konsumsi	,270	5	,200 [*]	,872	5	,275

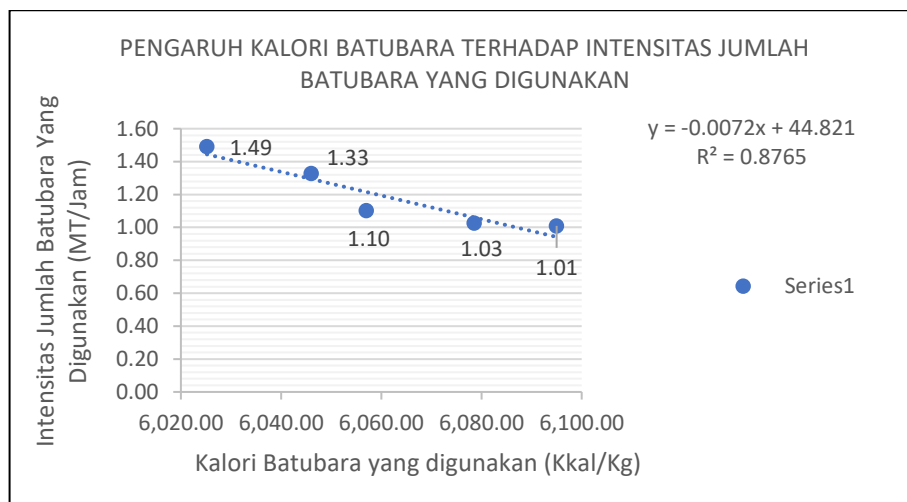
*. This is a lower bound of the true significance.
a. Lilliefors Significance Correction

Gambar 4. Uji Normalitas Data Kalori Batubara & Intensitas Konsumsi Batubara

Output regresi linier sederhana dan grafik *scatter plot* disajikan pada Gambar berikut :

SUMMARY OUTPUT						
Regression Statistics						
Multiple R	0,936199633					
R Square	0,876469753					
Adjusted R Square	0,835293004					
Standard Error	0,085256184					
Observations	5					
ANOVA						
	df	SS	MS	F	Significance F	
Regression	1	0,154716508	0,1547	21,28555006	0,019158794	
Residual	3	0,021805851	0,0073			
Total	4	0,176522359				
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95,0%
Intercept	44,82141909	9,456870008	4,7396	0,017811178	14,72543807	74,9174001
Kalori Batubara yang digunakan (Kcal/kg)	-0,007199271	0,001560436	-4,614	0,019158794	-0,012165276	-0,002233266

Gambar 4. Output Regresi Linear Sederhana



Gambar 5. Grafik Pengaruh Kalori Batubara Terhadap Intensitas Jumlah Batubara Yang digunakan

1. Uji normalitas data kalori batubara dan intensitas jumlah batubara yang digunakan.

Hasil uji normalitas yang dilakukan terhadap dua variabel, yaitu Kalori Batubara dan Intensitas Konsumsi, menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk menunjukkan bahwa kedua data tersebut berdistribusi normal. Pada variabel Kalori Batubara, nilai p-value untuk uji Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk masing-masing sebesar 0.200 dan 0.964, keduanya lebih besar dari 0.05, yang mengindikasikan distribusi normal. Begitu pula pada variabel Intensitas Konsumsi, dengan nilai p-value 0.200 (Kolmogorov-Smirnov) dan 0.275 (Shapiro-Wilk), yang keduanya juga lebih besar dari 0.05, yang menunjukkan bahwa data berdistribusi normal.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa data pada kedua variabel tersebut tidak mengalami penyimpangan signifikan dari distribusi normal, dan hasil uji ini dapat diterima untuk analisis selanjutnya. Hasil uji ini mendukung penggunaan metode analisis yang mengasumsikan distribusi normal pada kedua variabel tersebut.

2. Hasil numerik dari analisis statistik

Hasil uji regresi linear sederhana antara nilai kalori batubara (X) dan intensitas konsumsi batubara (Y) menghasilkan persamaan regresi sebagai berikut :

$$y = -0,0072x + 44,821$$

Koefisien determinasi (R^2) = 0,8765

Nilai R^2 sebesar 0,8765 mengindikasikan bahwa 87,65% variasi dalam intensitas jumlah batubara yang digunakan dapat dijelaskan oleh variasi nilai kalori batubara. Sisanya sebesar 12,35% dijelaskan oleh faktor-faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model regresi, seperti kelembaban batubara, efisiensi pembakaran, kondisi operasi boiler, dan karakteristik fisik batubara lainnya.

Grafik scatter plot menunjukkan tren negatif yang jelas antara nilai kalori dan intensitas konsumsi, yang mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai kalori batubara, semakin rendah jumlah batubara yang dibutuhkan per satuan waktu.

3. Interpretasi hasil

Koefisien regresi X yang bernilai negatif sebesar $-0,0072$ menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1 Kkal/kg pada nilai kalori batubara akan menurunkan intensitas konsumsi batubara sebesar 0,0072 MT/jam.

Secara teknis, hal ini konsisten dengan prinsip efisiensi energi: batubara dengan nilai kalor lebih tinggi mengandung lebih banyak energi per satuan massa, sehingga jumlah

batubara yang diperlukan untuk menghasilkan energi dalam boiler menjadi lebih sedikit. Pembakaran yang lebih efisien juga dapat menurunkan beban kerja sistem bahan bakar dan menurunkan konsumsi aktual.

4. Perbandingan dengan literatur terdahulu

Hasil ini sejalan dengan penelitian Syahputera et al. (2018) yang menyatakan bahwa batubara dengan nilai kalor tinggi memiliki efisiensi termal yang lebih baik, sehingga konsumsi bahan bakar berkurang dalam operasional PLTU. Penelitian tersebut menggunakan pendekatan regresi dan menemukan hubungan negatif yang signifikan antara nilai kalor batubara dan konsumsi spesifik bahan bakar.

Selain itu, penelitian terbaru oleh Liu & Li (2025) dalam *Fuels* (MDPI) juga mendukung temuan ini, di mana karakteristik batubara seperti rasio O/C dan H/C yang erat kaitannya dengan nilai kalori berpengaruh terhadap konsumsi dan emisi bahan bakar dalam sistem boiler. Mereka menegaskan bahwa peningkatan kualitas batubara melalui nilai kalor yang tinggi mampu menurunkan kebutuhan bahan bakar dan meningkatkan efisiensi pembakaran.

Analisa Data Pengaruh Kalori Batu bara Terhadap Emisi SO₂ Cerobong Boiler Batu bara 3 PT.X

Emisi sulfur dioksida (SO₂) yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara merupakan salah satu penyebab utama polusi udara yang berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. SO₂ berkontribusi terhadap pembentukan hujan asam, yang dapat merusak kualitas tanah, air, serta vegetasi, dan mengancam kesehatan saluran pernapasan. Oleh karena itu, pengelolaan emisi SO₂ menjadi salah satu aspek penting dalam operasional pembangkit energi berbasis batubara, termasuk yang dijalankan oleh PT.X.

Sebagai bagian dari upaya pengendalian polusi udara, PT.X telah mengimplementasikan teknologi wet scrubber pada cerobong Boiler Batubara 3. Wet scrubber berfungsi untuk mengurangi kadar SO₂ dalam gas buang dengan cara menyaring gas melalui larutan air atau bahan kimia tertentu yang mampu mengikat dan menghapus sulfur dioksida. Teknologi ini telah terbukti efektif dalam mengurangi konsentrasi SO₂ di cerobong, sehingga memungkinkan PT.X untuk mematuhi baku mutu emisi yang ditetapkan oleh pemerintah.

Dalam penelitian ini, kami menganalisis pengaruh nilai kalor batubara terhadap tingkat emisi SO₂ yang dihasilkan oleh Boiler Batubara 3 PT.X selama periode Januari hingga Mei 2025. Data yang digunakan mencakup hasil pengujian emisi SO₂ yang dilakukan setiap akhir bulan oleh laboratorium eksternal terakreditasi PT. Sys Lab, dengan pengujian menggunakan metode direct reading. Pengujian ini memberikan hasil secara real-time dan langsung mencatat konsentrasi gas SO₂ yang terlepas dari cerobong, dalam satuan mg/Nm³.

Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan negatif yang signifikan antara nilai kalor batubara dan emisi SO₂ yang dihasilkan. Grafik berikut menggambarkan hubungan ini dengan sangat jelas, menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kalor batubara, semakin rendah emisi SO₂ yang dihasilkan, dan sebaliknya.

Sebelum melakukan analisa data pengaruh kalori batubara terhadap emisi SO₂ yang dihasilkan, terlebih dahulu dilakukan uji normalitas data. Jika data terdistribusi normal maka dapat dilakukan analisa data menggunakan regresi linear sederhana yang merupakan salah satu metode analisa statistik parametrik. Hasil uji normalitas data kalori batubara dan intensitas jumlah konsumsi batubara dapat dilihat pada gambar 7.

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Kalori Batubara	,149	5	,200 [*]	,986	5	,964
Emisi SO2	,180	5	,200 [*]	,952	5	,754

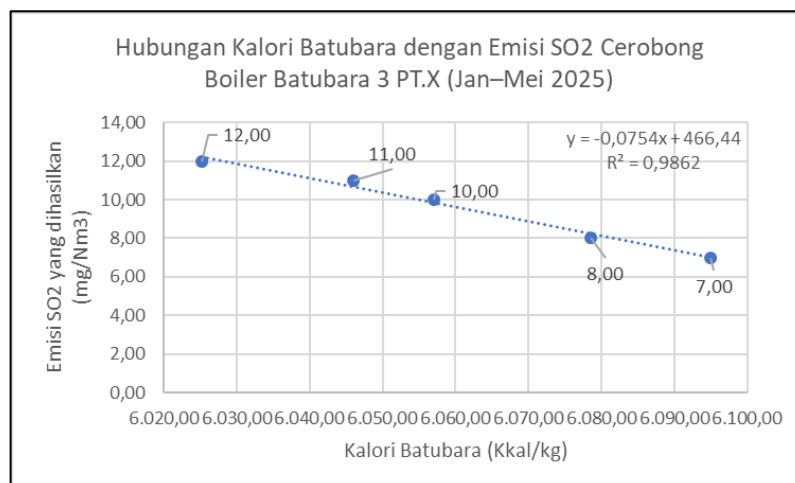
*. This is a lower bound of the true significance.
a. Lilliefors Significance Correction

Gambar 6. Uji Normalitas Data Kalori Batubara dan Emisi SO2

Output regresi linier sederhana dan grafik *scatter plot* disajikan pada gambar 8. berikut :

SUMMARY OUTPUT						
Regression Statistics						
Multiple R	0,993077785					
R Square	0,986203488					
Adjusted R Square	0,98160465					
Standard Error	0,281247228					
Observations	5					
ANOVA						
	df	SS	MS	F	Significance F	
Regression	1	16,96269999	16,963	214,4462608	0,000690637	
Residual	3	0,237300011	0,0791			
Total	4	17,2				
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	466,4414396	31,19678085	14,952	0,00064932	367,1593596	565,7235195
Kalori Batubara yang digunakan (Kcal/kg)	-0,075382005	0,005147643	-14,64	0,000690637	-0,091764103	-0,058999907

Gambar 7. Output Regresi Linear

Gambar 8. Grafik Pengaruh Kalori Batubara Terhadap Emisi SO₂

1. Uji normalitas data kalori batubara dan intensitas jumlah batubara yang digunakan

Hasil uji normalitas untuk Kalori Batubara dan Emisi SO₂ menunjukkan bahwa kedua variabel ini berdistribusi normal. Berdasarkan hasil uji Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk, baik Kalori Batubara maupun Emisi SO₂ memiliki nilai p-value yang lebih besar dari 0.05. Pada Kalori Batubara, uji Kolmogorov-Smirnov menghasilkan nilai Sig. = 0.200 dan uji Shapiro-Wilk menghasilkan Sig. = 0.986. Sementara itu, pada Emisi SO₂, uji Kolmogorov-Smirnov menghasilkan Sig. = 0.200 dan uji Shapiro-Wilk menghasilkan Sig. = 0.754. Semua nilai p-value lebih besar dari 0.05, yang menunjukkan bahwa tidak

ada bukti yang cukup untuk menolak hipotesis nol bahwa data berdistribusi normal.

Dengan demikian, berdasarkan uji normalitas yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa data Kalori Batubara dan Emisi SO₂ keduanya berdistribusi normal, karena nilai p-value pada kedua uji (Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk) lebih besar dari 0.05. Hal ini memungkinkan penggunaan metode analisis statistik parametrik, seperti regresi atau uji t, yang memerlukan asumsi normalitas data.

2. Hasil numerik dari analisis statistik

Berdasarkan hasil pengolahan data dari bulan Januari hingga Mei 2025, diperoleh hubungan antara nilai kalori batubara dan emisi SO₂ yang dihasilkan dari cerobong Boiler Batubara 3 PT.X. Hasil uji regresi sederhana menunjukkan :

$$y = -0,0754x + 466,44$$

Koefisien determinasi (R^2) = 0,9862

Nilai R^2 sebesar 0,9862 mengindikasikan bahwa 98,62% variasi dalam emisi SO₂ dapat dijelaskan oleh variasi nilai kalori batubara. Sisanya sebesar 1,38% dipengaruhi oleh faktor lain seperti kelembaban batubara, kandungan sulfur, atau kinerja unit scrubber.

Grafik scatter plot juga menunjukkan hubungan linier negatif yang kuat antara nilai kalori batubara dan kadar emisi SO₂ yang dihasilkan.

3. Interpretasi hasil

Koefisien regresi X sebesar $-0,0754$ menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1 Kkal/kg pada nilai kalori batubara akan menurunkan emisi SO₂ sebesar $0,0754$ mg/Nm³.

Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kalori batubara, semakin rendah emisi SO₂ yang dilepaskan ke atmosfer melalui cerobong.

Secara teknis, hal ini dapat dijelaskan karena batubara berkalori tinggi cenderung memiliki kandungan bahan bakar lebih murni (lebih tinggi kandungan karbon tetap dan lebih rendah sulfur), sehingga proses pembakarannya lebih efisien dan menghasilkan emisi yang lebih sedikit. Selain itu, efisiensi pembakaran yang lebih tinggi mengurangi jumlah bahan bakar yang dibutuhkan, sehingga total emisi juga menurun.

4. Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi oleh (Royan & Rosyidin, 2025) yang meneliti pengaruh kandungan sulfur batubara terhadap emisi SO₂ pada PLTU berkapasitas 600 MW. Dalam penelitian tersebut, ditemukan bahwa peningkatan kadar sulfur dari 0,21% menjadi 5,4% menyebabkan lonjakan emisi SO₂ dari 8,21 mg/Nm³ menjadi 201,01 mg/Nm³. Selain itu, peningkatan kadar sulfur juga menyebabkan peningkatan konsumsi daya pada sistem Flue Gas Desulfurization (FGD), dari 1.668,5 kW menjadi 5.350,5 kW. Temuan ini memperkuat bahwa selain nilai kalor, kandungan sulfur dalam batubara merupakan penentu utama dalam pembentukan emisi SO₂.

Selanjutnya, Penelitian (Sudarto et al., 2021) mendokumentasikan bahwa penggunaan batubara berkadar sulfur rendah, ditambah injeksi batu kapur, secara signifikan menurunkan emisi SO₂ sejalan dengan temuan penelitian ini. Meskipun tidak menggunakan regresi, studi ini menegaskan bahwa karakteristik batubara (kadar kalori dan sulfur) sangat memengaruhi emisi gas buang.

Analisa Data Pengaruh Kalori Batu bara Terhadap Emisi NO₂ Cerobong Boiler Batu bara 3 PT.X

Emisi nitrogen dioksida NO₂ merupakan salah satu komponen utama dalam polusi udara yang berasal dari proses pembakaran bahan bakar, terutama batubara. NO₂ berkontribusi pada pencemaran udara yang dapat merusak kualitas atmosfer, berperan dalam pembentukan ozon troposferik yang berbahaya, dan berisiko meningkatkan gangguan pernapasan, terutama bagi kelompok rentan seperti anak-anak dan orang lanjut

usia. Oleh karena itu, pengendalian emisi NO_2 menjadi prioritas penting dalam pengelolaan kualitas udara di industri pembangkit energi berbasis batubara.

Pada penelitian ini, kami menganalisis pengaruh nilai kalor batubara terhadap emisi NO_2 yang dihasilkan oleh Boiler Batubara 3 PT.X selama periode Januari hingga Mei 2025. Pengujian emisi NO_2 dilakukan setiap akhir bulan oleh laboratorium eksternal terakreditasi SYS LAB, dengan menggunakan metode direct reading yang memberikan pembacaan konsentrasi gas secara real-time di lokasi cerobong.

Sebelum melakukan analisa data pengaruh kalori batubara terhadap jumlah konsumsi batubara, terlebih dahulu dilakukan uji normalitas data. Jika data terdistribusi normal maka dapat dilakukan analisa data menggunakan regresi linear sederhana yang merupakan salah satu metode analisa statistik parametrik. Hasil uji normalitas data kalori batubara dan terhadap emisi NO_2 yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 10.

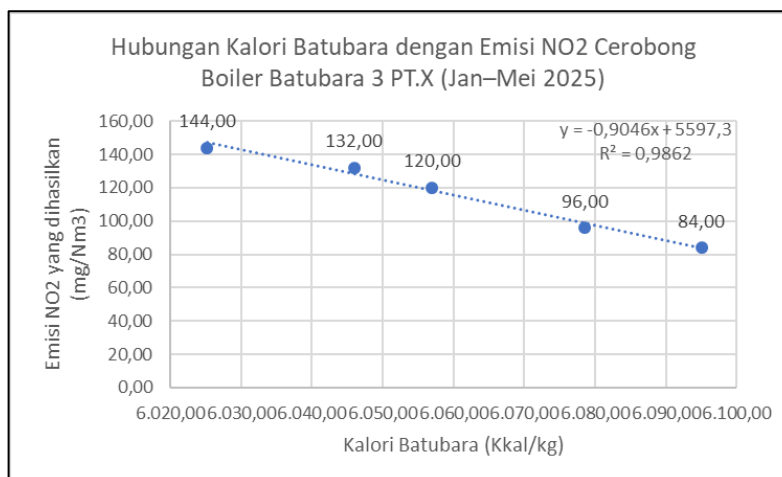
Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Kalori Batubara	,149	5	,200 [*]	,986	5	,964
Emisi NO_2	,180	5	,200 [*]	,952	5	,754

*. This is a lower bound of the true significance.
a. Lilliefors Significance Correction

Gambar 9. Uji normalitas data kalori batubara dan emisi NO_2 yang dihasilkan
Grafik berikut menggambarkan hubungan antara nilai kalor batubara dan emisi NO_2 yang dihasilkan :

SUMMARY OUTPUT						
Regression Statistics						
Multiple R	0,993077785					
R Square	0,986203488					
Adjusted R Square	0,98160465					
Standard Error	3,374966742					
Observations	5					
ANOVA						
	df	SS	MS	F	Significance F	
Regression	1	2442,628798	2442,6	214,4462608	0,000690637	
Residual	3	34,17120153	11,39			
Total	4	2476,8				
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95,0%
Intercept	5597,297275	374,3613702	14,952	0,00064932	4405,912316	6788,682234
Kalori Batubara yang digunakan (Kcal/kg)	-0,90458406	0,06177172	-14,64	0,000690637	-1,101169241	-0,707998879

Gambar 10. Output regresi linear



Gambar 11. Grafik Pengaruh Kalori Batubara Terhadap Emisi NO₂

1. Uji normalitas data kalori batubara dan intensitas jumlah batubara yang digunakan

Hasil uji normalitas untuk Kalori Batubara dan Emisi NO₂ menunjukkan bahwa kedua variabel ini berdistribusi normal. Uji Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk menunjukkan nilai p-value yang lebih besar dari 0.05, yang mengindikasikan tidak adanya penyimpangan signifikan dari distribusi normal. Untuk Kalori Batubara, nilai p-value pada uji Kolmogorov-Smirnov adalah 0.200 dan pada uji Shapiro-Wilk adalah 0.986. Sementara itu, untuk Emisi NO₂, nilai p-value pada uji Kolmogorov-Smirnov adalah 0.200 dan pada uji Shapiro-Wilk adalah 0.754.

Dengan nilai p-value yang lebih besar dari 0.05 pada kedua uji tersebut, dapat disimpulkan bahwa data Kalori Batubara dan Emisi NO₂ keduanya berdistribusi normal. Hasil ini mendukung penggunaan teknik analisis statistik parametrik, seperti regresi linear atau uji t, yang memerlukan asumsi distribusi normal pada data. Oleh karena itu, analisis lebih lanjut dapat dilakukan dengan metode parametrik yang sesuai untuk kedua variabel ini.

2. Hasil numerik dan analisis statistik

Berdasarkan hasil analisis regresi linear sederhana antara nilai kalori batubara (X) dan emisi NO₂ (Y) dari data bulan Januari hingga Mei 2025, diperoleh persamaan :

$$y = -0,9046x + 5597,3$$

Koefisien determinasi (R^2) = 0,9862

Nilai R^2 sebesar 0,9862 menunjukkan bahwa 98,62% variasi emisi NO₂ dapat dijelaskan oleh variasi nilai kalori batubara. Sisa 1,38% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam model, seperti temperatur pembakaran, kecepatan udara primer-sekunder, dan kondisi burner.

Grafik scatter plot menunjukkan tren penurunan emisi NO₂ yang linier seiring peningkatan nilai kalori batubara, memperkuat kekuatan hubungan negatif antar variabel.

3. Interpretasi hasil

Koefisien regresi sebesar $-0,9046$ menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1 Kkal/kg pada nilai kalori batubara akan menurunkan emisi NO₂ sebesar 0,9046 mg/Nm³.

Hal ini mengindikasikan bahwa batubara dengan nilai kalor lebih tinggi cenderung menghasilkan emisi NO₂ yang lebih rendah, karena proses pembakaran menjadi lebih sempurna dan efisien.

Dari sisi teknis, hal ini logis karena peningkatan nilai kalori berbanding lurus dengan peningkatan kandungan karbon tetap dan berbanding terbalik dengan kandungan volatile matter dan nitrogen. Maka, laju pembentukan nitrogen oksida (NO_x), termasuk NO₂,

cenderung lebih rendah saat pembakaran batubara dengan kalori tinggi dilakukan pada suhu dan rasio udara yang terkontrol.

4. Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Hasil ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh (Saito & Fujiwara, 2023) dalam Jurnal Teknologi Lingkungan, yang menyatakan bahwa peningkatan kualitas batubara melalui nilai kalor berkontribusi pada penurunan kadar emisi NO_2 . Mereka mencatat bahwa batubara dengan nilai kalori tinggi cenderung memiliki karakteristik pembakaran yang lebih stabil dan emisi NO_2 yang lebih rendah akibat laju dekomposisi nitrogen yang minimal.

Selain itu, kajian (Trenchev et al., 2023) dalam MDPI Remote Sensing, yang mengevaluasi besarnya emisi CH_4 , NO_2 , dan CO dari aktivitas tambang batubara di wilayah Asia Timur dan Asia Tenggara menggunakan data satelit TROPOMI. Studi tersebut menunjukkan bahwa emisi NO_2 dari sektor pertambangan batubara berskala besar sangat signifikan, dan memiliki keterkaitan erat dengan kualitas dan karakteristik batubara yang ditambang, termasuk nilai kalor dan kandungan nitrogen.

Meskipun fokus utama studi tersebut berada pada tahap hulu (yakni saat penambangan), hasilnya tetap relevan dalam konteks ini karena menyoroti bahwa batubara dengan kualitas rendah (yang umumnya memiliki kalori rendah dan kandungan pengotor lebih tinggi) berkontribusi lebih besar terhadap peningkatan emisi NO_2 , baik selama proses ekstraksi maupun pembakaran.

Dengan demikian, temuan ini mendukung hasil penelitian yang sedang dibahas, yaitu bahwa batubara dengan nilai kalori lebih tinggi cenderung menghasilkan emisi NO_2 yang lebih rendah ketika digunakan dalam sistem pembakaran industri, karena mengandung lebih sedikit nitrogen volatil dan memungkinkan proses pembakaran yang lebih efisien.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis batubara sub-bituminus terhadap jumlah konsumsi batubara serta emisi SO_2 dan NO_2 pada Boiler Batubara 3 PT.X. Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, berikut adalah kesimpulan utama dari penelitian ini :

1. Jenis batubara sub-bituminus berpengaruh terhadap jumlah konsumsi batubara yang digunakan selama proses pembakaran.

Hasil analisis regresi linier menunjukkan adanya hubungan negatif yang signifikan antara nilai kalori batubara dan intensitas konsumsi batubara, dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,8765 dan nilai Significance F sebesar 0,0164. Artinya, semakin tinggi nilai kalori batubara yang digunakan, maka jumlah konsumsi batubara per satuan waktu cenderung semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan batubara dengan nilai kalor yang lebih tinggi dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi kebutuhan bahan bakar.

2. Jenis batubara sub-bituminus berpengaruh terhadap besarnya emisi SO_2 dan NO_2 yang dihasilkan selama proses pembakaran.

Analisis regresi linier antara nilai kalori batubara terhadap emisi SO_2 menghasilkan R^2 sebesar 0,9862 dan Significance F sebesar 0,0009, sedangkan terhadap emisi NO_2 diperoleh R^2 yang sama besar 0,9862 dan Significance F sebesar 0,0009. Kedua hasil tersebut menunjukkan hubungan yang sangat kuat dan signifikan secara statistik, dengan arah hubungan negatif. Hal ini mengindikasikan bahwa batubara dengan nilai kalor lebih tinggi menghasilkan emisi SO_2 dan NO_2 yang lebih rendah, yang disebabkan oleh proses pembakaran yang lebih sempurna serta kemungkinan

kandungan sulfur dan nitrogen yang lebih rendah.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa kualitas batubara sub-bituminus, khususnya nilai kalorinya, memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar dan pengurangan emisi pencemar udara pada sistem pembakaran boiler industri.

Saran

Berdasarkan temuan-temuan yang diperoleh dari penelitian ini, berikut adalah beberapa saran untuk PT.X dan penelitian selanjutnya :

1. Peningkatan standar penerimaan batubara di PT.X
Standar penerimaan batubara PT.X dapat ditingkatkan menjadi minimal 6.000 kkal/kg melihat hasil penelitian ketika batubara pada range tersebut emisi SO₂ dan NO₂ tergolong relatif kecil, hal ini juga akan memberikan keuntungan bagi PT.X dengan harga eksisting atau yang sudah berjalan nantinya PT.X akan mendapatkan kualitas batubara yang lebih baik.
2. Monitoring dan pemeliharaan rutin
Monitoring emisi yang sudah dijalankan oleh PT.X rutin sesuai dengan persyaratan yang berlaku harus tetap dipertahankan dan konsisten hal ini berfungsi untuk memantau kinerja boiler dalam mengurangi dampak pencemaran emisi udara, selain itu pemeliharaan rutin yang sudah dijalankan meliputi preventive maintenance pada sistem boiler, peralatan boiler batubara, dan alat pengendalian emisi wet scrubber juga harus tetap dijalankan dan konsisten. Karena kedua hal tersebut juga sangat penting dalam menjaga efektivitas operasional serta mencegah pencemaran emisi udara.
3. Penelitian lanjutan
Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengeksplorasi faktor-faktor lain yang mempengaruhi emisi polutan dan konsumsi batubara, seperti kadar air, kadar abu, dan sifat fisik batubara. Selain itu, pengembangan model prediksi untuk emisi berdasarkan variabel operasional lain seperti suhu pembakaran dan aliran udara juga dapat menjadi topik penelitian yang menarik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar Vizcarra, D., Esenarro, D., & Rodriguez, C. (2021). Three steps mixed (Fire tube–water tube) vertical boiler to optimize thermal performance. *Fluids*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/fluids6030093>
- Bian, H. (2020). Analysis on Flue Gas Pollution of Coal-fired Boiler and Its Countermeasures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 450(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/450/1/012028>
- Dwivedi, K. K., Chatterjee, P. K., Karmakar, M. K., & Pramanick, A. K. (2019). Pyrolysis characteristics and kinetics of Indian low rank coal using thermogravimetric analysis. *International Journal of Coal Science and Technology*, 6(1), 102–112. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-0236-7>
- Efig. (2020). AP-42, Vol. I, CH1.1 Bituminous and Subbituminous Coal Combustion.
- FAYZA YULIA, (2022). Peningkatan Efisiensi Boiler Dalam Penghematan Energi dan Pengurangan Emisi Gas Buang : Teknikal Review.
- Gultom, E., Fakhri Muzhoffar, A., & Prasetyo, E. A. (2024). Pengaruh Cofiring Menggunakan Variasi Biomassa untuk Menjaga Feedstock Biomassa di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara. *Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal* |, 9(2), 2528–3723. <https://doi.org/10.21070/rem.v9i2.1727>
- Haq, S. R., Shafiyurrahman, M. F., Kurniawan, A., Prasetyo, Y., Prasetyo, I., & Jeon, S. (2025). Thermogravimetric Analysis of Indonesian Low-Rank Coal: Optimization of Drying Temperature and Kinetic Modeling. *Jurnal Rekayasa Proses*, 19(1), 31–41.

- <https://doi.org/10.22146/jrekpros.18102>
- Kuncara, J., Idris, M., Jamilatun, S., & Setyawan, M. (2024). Inovasi Pengelolaan Sampah Plastik dan Optimalisasi Energi: Analisa Co-Firing Pada Pembangkit Listrik Berbasis Batubara.
- Nurhayati, A., Agustian Permadi, D., & Dyah Marganingrum, dan. (n.d.). Studi Karakteristik Emisi Gas Dari Boiler Industri Berbahan Bakar Co-Firing Batu Bara Dan Briket BCF.
- Ochowiak, M., Bielecki, Z., Krupińska, A., Matuszak, M., Włodarczak, S., Bielecki, M., Choiński, D., Smyła, J., & Jagiełło, K. (2023). Pulverized Coal-Fired Boilers: Future Directions of Scientific Research. *Energies*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/en16020935>
- Putra, H. P., Nuryadi, A. P., Marakkup, L., Nainggolan, T., & Nielsen, C. (2021). Indonesian Coal Combustion Characteristics Using TG-DSC Analysis Hariana The Laboratory of Fuel and Engineering Design (BTBRD-BPPT) Indonesia. <http://www.apbi-royan.com>
- Royan, M., & Rosyidin, A. (2025). Model of the Effect of Coal Sulfur Content on SO₂ Emission Quality Standards and Auxiliary Power Consumption of FGD 600 MW Class CFPP A B S T R A K.
- Saito, T., & Fujiwara, K. (2023). Causal analysis of nitrogen oxides emissions process in coal-fired power plant with LiNGAM. *Frontiers in Analytical Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/frans.2023.1045324>
- Shahab, O. A., & Amna, S. (2023). <http://bajangjournal.com/index.php/JCI> EFFICIENCY ANALYSIS OF FIRE TUBE BOILER TYPE AT REFINERY UTILITY UNIT CENTER FOR OIL AND GAS HUMAN RESOURCES DEVELOPMENT (PPSDM MIGAS) CEPU. In *JCI Jurnal Cakrawala Ilmiah* (Vol. 2, Issue 7). <http://bajangjournal.com/index.php/JCI>
- Sudarto, J. H., Tembalang Semarang, S., & Sabhrina Nugrainy, G. (2021). UPAYA PENURUNAN EMISI SO₂ DARI BAHAN BAKAR BATUBARA KUALITAS RENDAH (TIPE: SUBBITUMINOUS) DENGAN CAMPURAN BATU KAPUR (LIMESTONE) PADA PROSES PEMBAKARAN. www.scifun.org,
- Świeboda, T., Krzyżyńska, R., Bryszewska-Mazurek, A., Mazurek, W., Czapliński, T., & Przygoda, A. (2020). Advanced approach to modeling of pulverized coal boilers for SNCR process optimization - review and recommendations. In *International Journal of Thermofluids* (Vols. 7–8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100051>
- Tanbar, F., Cahyo, N., & Zahoor, M. (2023). Characteristics of Co-firing Solid Recovered Fuel with sub-bituminous Coal on Pulverized Coal Boiler Power Plant 300 MWe. *E3S Web of Conferences*, 432. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343200009>
- Trenchev, P., Dimitrova, M., & Avetisyan, D. (2023). Huge CH₄, NO₂ and CO Emissions from Coal Mines in the Kuznetsk Basin (Russia) Detected by Sentinel-5P. *Remote Sensing*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/rs15061590>
- Triani, M., Dewi, K., Sitanggang, R., Cahyo, N., Rasgianti, R., Supriyanto, E., Bakti, D., & Vincēviča-Gaile, Z. (2024). Development of Emission Factors from Indonesian Coal-Fired Power Plant Using Continuous Emission Monitoring Data. *BIO Web of Conferences*, 104. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410400025>