

Pengaruh kualitas batu bara terhadap produksi gas SO₂ dan NO_x: studi kasus PLTU “Lentera”

The effect of coal quality on SO₂ and NO_x gas production: case study of PLTU “Lentera”

Qori Fajar Hermawan^{1,*}, Nanda Khoirunisa¹, Zetsaona Sihotang¹, Muhammad Riza¹, Wasono²

¹Program Studi Geofisika, Universitas Mulawarman, Kota Samarinda, Indonesia

²Program Studi Matematika, Universitas Mulawarman, Kota Samarinda, Indonesia

Abstrak.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) “Lentera” yang berkapasitas 130MW menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama. Kualitas batu bara yang dikirimkan ke PLTU “Lentera” akan diuji menggunakan analisis proksimat dan ultimat untuk mengetahui kandungan sulfur dan nitrogen. Kandungan sulfur dan nitrogen tersebut diduga berpengaruh terhadap produksi emisi gas SO₂ dan NO_x dari hasil pembakaran batu bara. Pengamatan emisi gas SO₂ dan NO_x di PLTU “Lentera” dilakukan melalui *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh kandungan sulfur dan nitrogen pada batu bara terhadap produksi gas SO₂ dan NO_x di PLTU “Lentera” periode Juni–Desember 2020. Analisis yang dilakukan berdasarkan analisis statistik metode regresi linear sederhana dan analisis ragam. Batu bara di Provinsi Kalimantan Timur memiliki kandungan sulfur, nitrogen dan nilai kalor lebih rendah dibandingkan batu bara di Provinsi Sumatera Selatan. Kandungan sulfur dan nitrogen secara signifikan berpengaruh terhadap produksi emisi gas SO₂ dan NO_x. Semakin tinggi kandungan sulfur dan nitrogen pada batu bara maka meningkatkan produksi emisi SO₂ dan NO_x. Nilai kalor batu bara tidak menunjukkan korelasi terhadap produksi emisi gas NO_x.

Kata kunci: emisi SO₂, emisi NO_x, kandungan nitrogen, kandungan sulfur, regresi linear sederhana

Abstract.

The “Lentera” power plant is a 130 MW coal-fired power plant facility. The quality of the supplied coal to the “Lentera” power plant were tested using proximate and ultimate analysis to determine sulphur and nitrogen content. The production of SO₂ and NO_x emissions from coal combustion was affected by the sulphur and nitrogen content in the coal. Emission levels were observed using the *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS). This research was conducted to determine the effect of the sulphur and nitrogen content in coal on the production of SO₂ and NO_x gas at “Lentera” power plant during June–December 2020. The analysis was done based on statistical analysis using simple linear regression methods and analysis of variance. Based on the content of sulphur, nitrogen and calorific value, coal from East Kalimantan Province has a lower value than coal from South Sumatra Province. The content of sulfur and nitrogen significantly affected the production of SO₂ and NO_x emissions. The higher the sulfur and nitrogen content in coal showed the higher the production of SO₂ and NO_x emissions. The calorific value of coal did not show a correlation with the production of NO_x emissions.

Keywords: emission of SO₂, emission of NO_x, nitrogen, sulphur, simple linear regression

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik di Indonesia sangat tinggi sehingga upaya maksimal dalam penggunaan bahan bakar fosil untuk pembangkit listrik terus digencarkan. Hal ini terlihat melalui 99 PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) dengan kapasitas 33,6 GW terdapat di Indonesia dengan berbahan bakar utama batu bara (Perdana 2023). Salah satu dari 99 PLTU tersebut adalah PLTU “Lentera” yang memiliki kapasitas 130 MW.

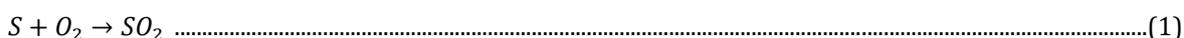
* Korespondensi Penulis
Email : qorifajarhermawan@gmail.com

PLTU "Lentera" menggunakan bahan bakar utama batu bara yang didatangkan dari Provinsi Sumatera Selatan dan Provinsi Kalimantan Timur. Jenis batu bara yang digunakan oleh PLTU Lentera merupakan batu bara sub-bituminus yang memiliki nilai kalor dan kandungan sulfur yang rendah (PLTU "Lentera" 2021). Pada proses produksi listrik, sebuah PLTU akan membutuhkan sumber panas. Sumber panas tersebut digunakan untuk mengubah air dari fase cair menjadi fase gas. Selanjutnya, uap air yang terbentuk akan diarahkan ke ruang turbin menggunakan prinsip dinamika fluida dengan mengandalkan perbedaan tekanan. Perbedaan tekanan tersebut membuat uap air akan bergerak dan menggerakkan turbin sehingga menghasilkan listrik. Uap air kemudian didinginkan melalui proses kondensasi dengan tujuan mengubah air dalam fase gas menjadi fase cair dan proses tersebut terjadi berulang-ulang (Prawoto dan Rahman 2021).

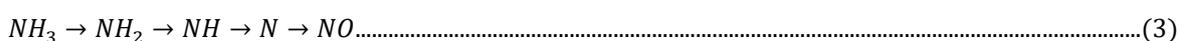
Pembangkitan listrik pada sebuah PLTU bergantung pada teknologi pemanasan. Teknologi pemanasan ini biasanya disebut dengan *boiler* yang hingga saat ini terdapat beberapa macam tipe *boiler* yang digunakan pada PLTU berbahan bakar utama batu bara seperti *pulverized coal* (Gunawan dan Gunawan 2020), *fluidized bed combustion* (Yuliani *et al.* 2019) dan *chain grate* (Idris *et al.* 2022). PLTU "Lentera" menggunakan teknologi *pulverized coal* dalam proses produksi listriknya (PLTU "Lentera" 2021).

Batu bara sebagai bahan bakar utama PLTU "Lentera" dalam proses pembangkitan listrik dipasok langsung dari Provinsi Sumatera Selatan dan Provinsi Kalimantan Timur. Pengiriman batu bara dilakukan menggunakan kapal dan dibongkar menggunakan sistem *static crane* dan *belt conveyor* yang membawa batu bara dari kapal di pelabuhan khusus menuju *coal yard*. Dalam proses pembongkaran dilakukan juga pengambilan sampel batu bara untuk dianalisis secara proksimat dan ultimat. Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui kualitas batu bara yang sedang dibongkar (PLTU "Lentera", 2021). Nilai kandungan sulfur dan nitrogen merupakan beberapa parameter uji yang dilakukan pada analisis tersebut. Analisis proksimat dan ultimat dilakukan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) atau *American Society for Testing Materials* (ASTM) oleh PT. Surveyor Indonesia (PT Surveyor Indonesia 2021).

Kandungan sulfur dan nitrogen akan mempengaruhi produksi gas SO₂ dan NO_x dari hasil pembakaran batu bara tersebut. Pembentukan gas SO₂ secara umum dapat digambarkan melalui proses oksidasi unsur sulfur. Namun, dalam proses oksidasi tersebut, tidak hanya membentuk gas SO₂, tetapi juga membentuk gas SO₃. Jumlah gas SO₃ yang terbentuk dari proses oksidasi unsur sulfur, biasanya tidak lebih dari 10% jumlah pembentukan SO₂ dari proses oksidasi yang sama. Reaksi kimia unsur sulfur dalam proses oksidasi dapat dilihat pada reaksi **Persamaan 1** dan **Persamaan 2** berikut.



Selain sulfur, kandungan nitrogen pada batu bara juga dapat menghasilkan gas NO_x. Gas NO_x atau nitrogen oksida merupakan gas yang dihasilkan dari proses oksidasi unsur nitrogen. Gas NO_x terdiri dari beberapa jenis gas seperti N₂O, NO, N₂O₂, N₂O₃, NO₂, N₂O₄, dan N₂O₅. Pembentukan gas NO_x melalui beberapa mekanisme seperti mekanisme termal NO_x, mekanisme *prompt* NO_x dan *fuel* NO_x. Emisi NO_x yang dihasilkan dari proses oksidasi terdiri atas 95% gas NO dan 5% gas NO₂ (Goswami *et al.* 2019). Dalam penelitian ini menduga bahwa pembentukan gas NO_x pada gas buang hasil pembakaran batu bara berdasarkan *fuel* NO_x yang digambarkan berdasarkan reaksi **Persamaan 3** di bawah ini. Nilai kalor batu bara diduga mempengaruhi produksi gas NO_x. Hal ini dipengaruhi oleh kandungan karbon di batu bara, sehingga pembentukan gas NO_x melalui proses mekanisme *prompt* NO_x (Nurhayati *et al.* 2021).



Gas SO₂ dan NO_x merupakan gas polutan dalam udara. Kehadiran gas SO₂ dan NO_x dapat menimbulkan hujan asam. Produksi emisi gas tersebut dari kegiatan industri pembangkitan listrik harus memantau produksi gas tersebut yang dibuang ke udara bebas. Pemerintah Indonesia telah menentukan baku mutu untuk gas SO₂ dan NO_x pada pembangkit listrik dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Nomor 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Merujuk pada aturan tersebut dan mempertimbangkan kapasitas & sistem cerobong tunggal yang dimiliki oleh PLTU "Lentera", maka diwajibkan memantau emisi gas SO₂ dan NO_x yang dilepaskan di udara bebas dengan baku mutu 550 mg Nm⁻³.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menentukan pengaruh kandungan sulfur dan nitrogen pada batu bara terhadap produksi gas SO₂ dan NO_x. Selain itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai kalor batu bara terhadap produksi gas NO_x.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLTU “Lentera” yang berada di Provinsi Kepulauan Riau dengan menganalisis kualitas batu bara dari 31 pengiriman selama periode Juni–Desember 2020. Selain itu juga digunakan informasi emisi gas melalui CEMS pada cerobong selama periode waktu tersebut.

2.2. Prosedur pengumpulan data

Pemantauan emisi gas SO₂ dan NO_x dilakukan menggunakan alat CEMS yang terpasang di cerobong PLTU “Lentera”. CEMS yang terpasang memiliki kemampuan untuk mengukur kandungan gas sebanyak 12 kali setiap jamnya. Parameter pantau SO₂ dan NO_x dapat dipantau oleh sensor dalam rentang nilai berkisar 0-750 mg Nm⁻³. Pada sistem pelaporan pemantauan yang dilakukan CEMS, data yang ditampilkan adalah rata-rata jam dan rata-rata harian. Namun, dalam penelitian ini hanya menggunakan data nilai rata-rata jam yang merupakan nilai rata-rata pemantauan setiap lima menit sekali dalam satu jam yang sama. Nilai rata-rata jam sudah dilakukan pengoreksian kandungan oksigen sesuai dengan PerMenLHK Nomor 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.

Penelitian ini membutuhkan persiapan data terlebih dahulu sebelum dilakukan analisis statistik. Hal ini dikarenakan data yang ada bergantung pada sistem pemuatan batu bara di teknologi *boiler* dan kondisi data hasil pemantauan CEMS. Sistem pemuatan batu bara ke tungku pemanasan di PLTU “Lentera” dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu menggunakan batu bara di *coal yard* dan menggunakan batu bara langsung dari kapal pengiriman pasokan. Namun pada penelitian ini, proses pengumpulan data dilakukan menggunakan batu bara yang berasal dari kapal pengiriman untuk menentukan jenis batu bara serta menentukan emisi yang dihasilkan pada proses produksi.

Selama proses pembongkaran batu bara, sistem CEMS mencatat masing-masing untuk nilai emisi SO₂ dan nilai emisi NO_x per jam yang kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh satu nilai emisi SO₂ dan NO_x berdasarkan pasokan yang diterima sesuai dengan **Persamaan 4** (Nuryadi *et al.* 2017). Parameter kandungan sulfur didapatkan berdasarkan keadaan ketika diterima atau *as received*. Kandungan nitrogen didapatkan berdasarkan keadaan kering atau *air-dried base*. Nilai kalor yang digunakan adalah nilai kalor kotor yang didapatkan berdasarkan keadaan saat diterima atau *as received*. Parameter kandungan sulfur dilakukan pengujian dengan metode ASTM D4239-17, sedangkan kandungan nitrogen didapatkan berdasarkan analisis ultimat terhadap sampel batu bara dengan metode ASTM D5373-16 dan nilai kalor kotor batu bara didapatkan dengan menerapkan metode ASTM D5685-13.

$$\overline{Emisi}_{SO_2, NO_x} = \frac{\sum Emisi \text{ tiap jam}_{SO_2, NO_2}}{\text{Jumlah data emisi tiap jam}} \dots\dots\dots(4)$$

2.3. Prosedur analisis data

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis regresi linear sederhana dan analisis ragam dengan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel* dan *Data Analysis Toolpack*. Metode analisis regresi linear sederhana dipilih karena mampu menggambarkan hubungan antara variabel terikat dan variabel bebas dalam fenomena produksi emisi gas SO₂ dan NO_x dalam penelitian ini, sekaligus berfungsi untuk memprediksi besaran emisi berdasarkan kualitas batu bara yang digunakan (Kurniawan 2008). Sedangkan metode analisis ragam memiliki keunggulan dalam penentuan tingkat keterikatan variabel bebas terhadap variabel terikat (Bittner 2022) diharapkan dapat menentukan signifikansi pengaruh kualitas batu bara terhadap produksi emisi gas SO₂ dan NO_x dalam penelitian ini.

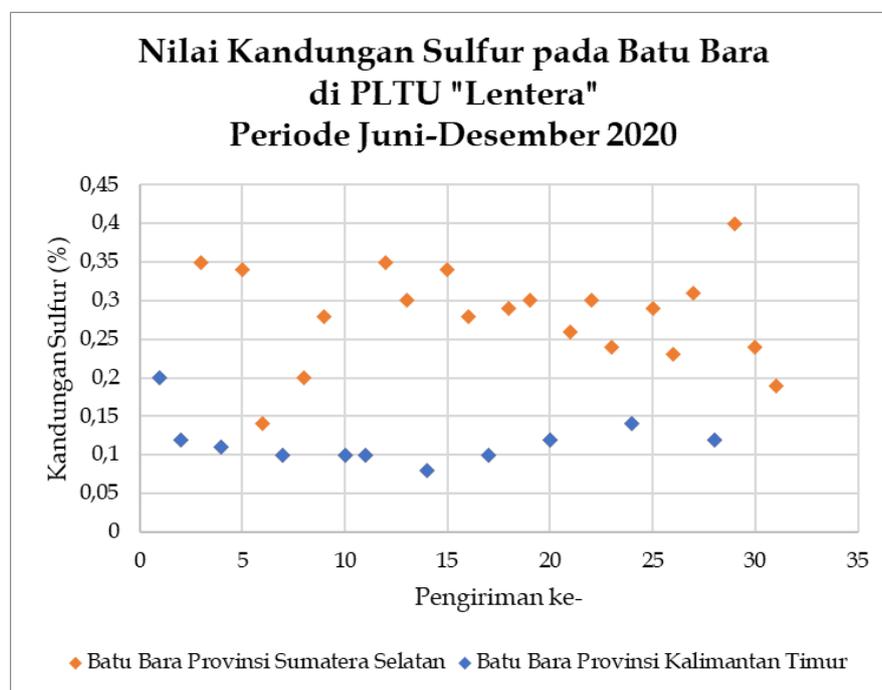
Analisis statistik berupa regresi linear sederhana (Nuryadi *et al.* 2017) dilakukan terhadap pengaruh nilai kandungan sulfur terhadap produksi emisi gas SO₂. Analisis tersebut menempatkan kandungan sulfur sebagai nilai terikat dan emisi SO₂ sebagai nilai bebas. Selain itu, pengaruh kandungan nitrogen dan nilai kalor pada batu bara juga diuji pengaruhnya terhadap produksi gas NO_x. Dalam pengujian ini kandungan nitrogen dan nilai kalor pada batu bara dijadikan sebagai nilai terikat dan emisi NO_x sebagai nilai bebas.

Sebelum dilakukan analisis statistik, dilakukan pemilihan data berdasarkan nilai rata-rata emisi. Berdasarkan spesifikasi sensor yang digunakan pada CEMS di PLTU "Lentera", rata-rata jam yang melebihi nilai 750 mg Nm^{-3} tidak akan digunakan dalam analisis statistik. Hal ini dikarenakan nilai 750 mg Nm^{-3} adalah batas kemampuan pengukuran CEMS di PLTU "Lentera". Apabila pengukuran menunjukkan nilai 750 mg Nm^{-3} memiliki ambiguitas yang tinggi, yaitu nilai emisi gas pada waktu pemantauan tersebut 750 mg Nm^{-3} atau nilai emisi di atas nilai 750 mg Nm^{-3} . Jadi, untuk mengurangi efek ambiguitas terhadap analisis yang dilakukan, maka digunakan data dengan rata-rata emisi dari rentang $0-749 \text{ mg Nm}^{-3}$.

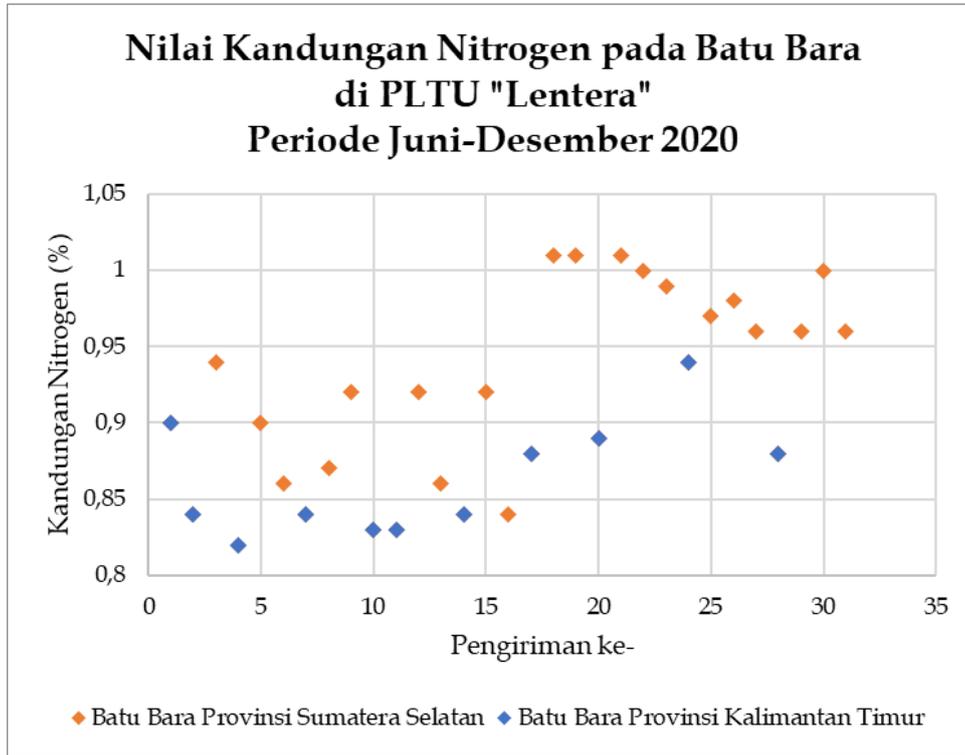
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kandungan sulfur, nitrogen dan nilai kalor pada batu bara

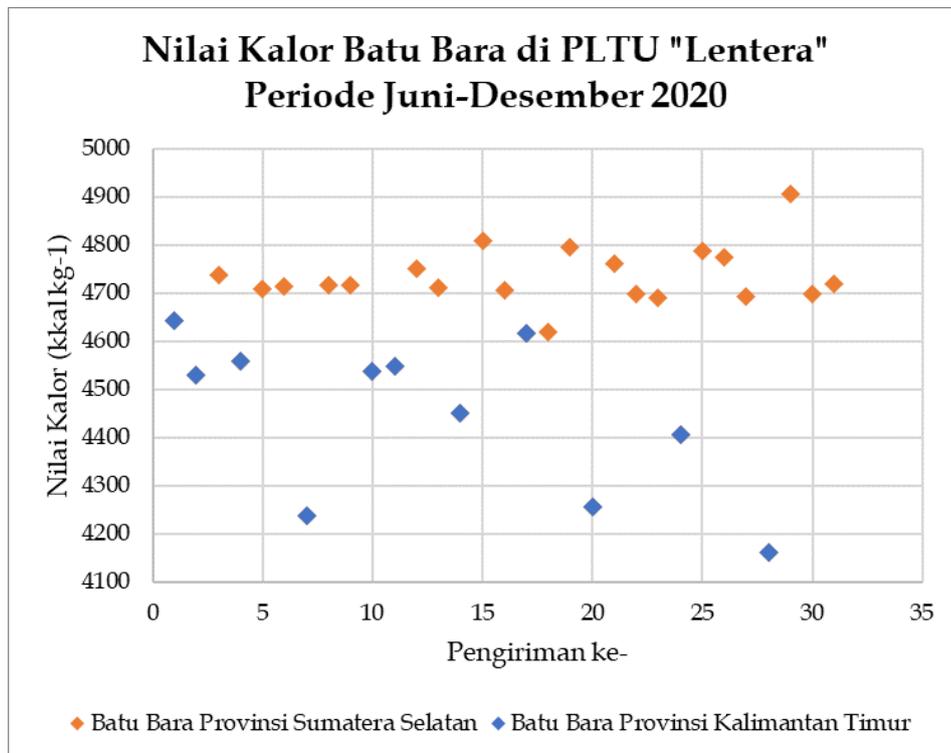
Pengiriman pasokan batu bara ke PLTU "Lentera" periode Juni–Desember 2020, tercatat sebanyak 31 pengiriman batu bara telah dilakukan pembongkaran. Berdasarkan asal provinsinya, 11 pengiriman berasal dari Provinsi Kalimantan Timur dan 20 pengiriman berasal dari Provinsi Sumatera Selatan. Hasil analisis kualitas batu bara terhadap parameter kandungan sulfur, kandungan nitrogen dan nilai kalor ditampilkan pada **Gambar 1**, **Gambar 2** dan **Gambar 3**.



Gambar 1. Grafik nilai kandungan sulfur pada pasokan batu bara di PLTU "Lentera" periode Juni–Desember 2020.



Gambar 2. Grafik nilai kandungan nitrogen pada pasokan batu bara di PLTU "Lentera" periode Juni-Desember 2020.



Gambar 3. Grafik nilai kalor pada pasokan batu bara di PLTU "Lentera" periode Juni-Desember 2020.

Gambar 1 menunjukkan bahwa pasokan batu bara ke PLTU "Lentera" periode Juni–Desember 2020 memiliki kandungan sulfur pada rentang 0,08%-0,40% dengan nilai rata-rata sebesar 0,22%. Berdasarkan asal provinsi, batu bara dari Provinsi Kalimantan Timur dalam 11 pengiriman memiliki kandungan sulfur rata-rata sebanyak 0,12% dengan rentang nilai 0,08%-0,20%. Batu bara yang berasal dari Provinsi Sumatera Selatan dalam 20 pengiriman memiliki kandungan sulfur rata-rata sebanyak 0,28% dengan rentang nilai 0,14%-0,40%. Berdasarkan informasi tersebut, batu bara yang berasal dari Provinsi Sumatera Selatan memiliki kandungan sulfur yang lebih tinggi dibandingkan batu bara dari Provinsi Kalimantan Timur.

Kandungan nitrogen pada batu bara ditentukan berdasarkan analisis ultimat dalam satuan persen (%). Pada penelitian ini, kandungan nitrogen ditentukan pada keadaan sampel *air-dried base* (adb). Nilai kandungan nitrogen rata-rata pada pasokan batu bara di PLTU "Lentera" pada periode Juni-Desember 2020 adalah 0,92% dengan rentang nilai 0,82%-1,01% (**Gambar 2**). Diketahui pula bahwa batu bara yang didatangkan dari Provinsi Kalimantan Timur memiliki kandungan nitrogen rata-rata 0,86% dengan rentang nilai 0,82%-0,94%, sedangkan batu bara Provinsi Sumatera Selatan terpantau lebih tinggi sebesar 0,94% dengan rentang nilai 0,84%-1,01%.

Perbedaan kandungan nitrogen tersebut menunjukkan adanya variasi kualitas batu bara berdasarkan daerah asalnya. Kandungan nitrogen yang lebih tinggi umumnya berpotensi meningkatkan emisi NO_x pada proses pembakaran, sehingga dapat memengaruhi strategi pengendalian emisi yang diterapkan di PLTU. Pada konteks ini, pasokan batu bara dari Sumatera Selatan cenderung menghasilkan emisi yang lebih besar dibandingkan dengan pasokan dari Kalimantan Timur.

Nilai kalor batu bara dianggap memiliki pengaruh terhadap produksi emisi gas NO_x saat pembakaran batu bara nantinya. Nilai kalor yang diambil adalah nilai kalor kotor atau *gross caloric value* (GCV) yang diukur pada sampel dalam keadaan saat diterima (*as received*). **Gambar 3** menunjukkan bahwa pasokan batu bara memiliki nilai kalor tertinggi sebesar 4.163–4.907 kkal kg⁻¹ dengan rata-rata nilai 4.635,13 kkal kg⁻¹. Jika ditinjau dari provinsi asal batu bara, Provinsi Kalimantan Timur memiliki batu bara dengan nilai kalor rata-rata sebesar 4.450,64 kkal.kg⁻¹ pada rentang 4.163–4.644 kkal kg⁻¹, sedangkan batu bara Provinsi Sumatera Selatan memiliki nilai kalor rata-rata sebesar 4.736,60 kkal.kg⁻¹ dengan rentang nilai 4.621–4.907 kkal kg⁻¹.

Perbedaan nilai kalor ini penting karena berkaitan langsung dengan efisiensi pembakaran dan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik. Nilai kalor yang lebih tinggi, seperti pada batu bara Sumatera Selatan, memungkinkan pembakaran lebih efisien dengan kebutuhan bahan bakar yang lebih sedikit, namun juga berpotensi meningkatkan suhu nyala api yang dapat memengaruhi pembentukan emisi NO_x . Sebaliknya, batu bara dengan nilai kalor lebih rendah, seperti yang berasal dari Kalimantan Timur, memerlukan volume pembakaran lebih besar untuk menghasilkan energi setara, yang juga dapat berdampak pada pola emisi.

Kandungan sulfur, nitrogen dan nilai kalor batu bara menunjukkan perbedaan kualitas batu bara dari Provinsi Sumatera Selatan dan Provinsi Kalimantan Timur. Perbedaan tersebut disebabkan oleh beberapa faktor seperti proses pembentukan batu bara dan lingkungannya. Kandungan sulfur yang ada pada batu bara berasosiasi dengan proses deposisi dan pembentukan batu bara seperti pemampatan mineral, biota dan material organik lainnya secara kimiawi dalam rentang waktu geologi. Sulfur pada batu bara biasanya ditemukan dalam bentuk sulfat, sulfida dan sulfur organik (Bottle and White 2023). Hal ini menunjukkan bahwa proses pembentukan batu bara di Provinsi Sumatera Selatan menghasilkan lebih banyak senyawa sulfur dibandingkan di Provinsi Kalimantan Timur.

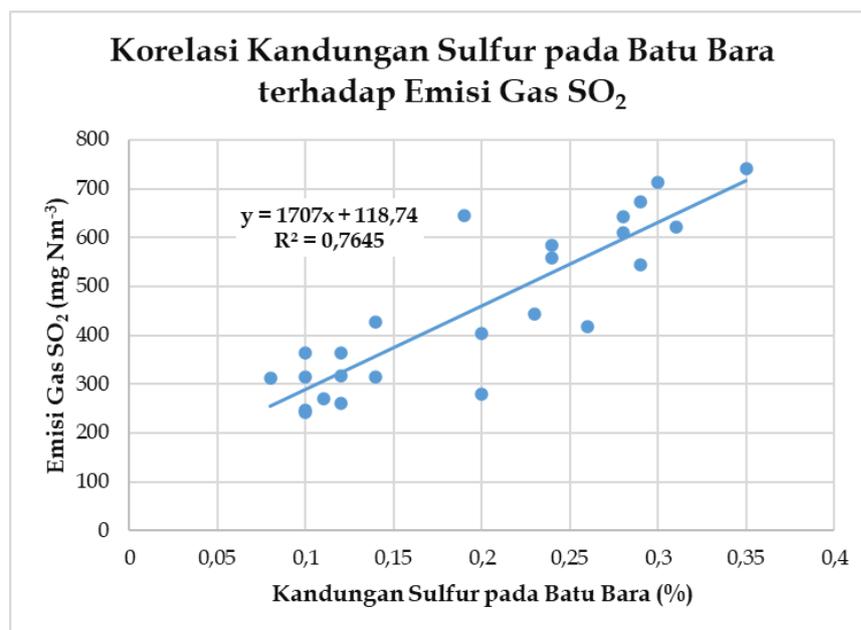
Perbedaan kandungan nitrogen dalam batu bara juga dipengaruhi oleh material penyusun batu bara dalam proses pembentukannya. Nitrogen tersebut didapatkan dari kandungan protein dalam tumbuhan dan organisme mikro yang membentuk batu bara. Nitrogen pada batu bara biasanya ditemukan dalam bentuk asam amino dan amonia (Flaig 1968). Hal tersebut mengindikasikan bahwa batu bara di Provinsi Sumatera Selatan dibentuk oleh tumbuhan dan organisme mikro yang kaya dengan protein dibandingkan batu bara di Provinsi Kalimantan Timur.

Nilai kalor pada batu bara dari Provinsi Sumatera Selatan lebih tinggi dibandingkan dari Provinsi Kalimantan Timur. Hal ini dipengaruhi oleh kandungan abu, kelembaban dan material yang mudah menguap. Apabila suatu batu bara memiliki kandungan abu yang tinggi, maka nilai kalor batu bara tersebut akan lebih rendah. Kelembaban dan material mudah menguap yang tinggi pada batu bara juga dapat menurunkan nilai kalor batu bara tersebut (Liu and Lv 2020).

Perbedaan proses pembentukan batu bara di Provinsi Sumatera Selatan dan Provinsi Kalimantan Timur diduga mempengaruhi kualitas batu bara yang dihasilkan. Namun, dibutuhkan penelitian lebih lanjut mengenai kondisi lingkungan dan bagaimana dampaknya terhadap proses pembentukan batu bara di provinsi-provinsi tersebut berdasarkan sudut pandang geologi. Hal ini diharapkan dapat menjelaskan lebih rinci alasan perbedaan kualitas batu bara pada masing-masing provinsi tersebut.

3.2. Korelasi kandungan sulfur terhadap emisi gas SO₂

Berdasarkan nilai emisi gas SO₂ yang dilaporkan oleh CEMS, data yang digunakan hanya berjumlah 25 data. Hal ini dikarenakan 6 data hasil pemantauan emisi gas SO₂ lebih dari 749 mg Nm⁻³ yang dihasilkan proses pembakaran pasokan batu bara dari Provinsi Sumatera Selatan. Berdasarkan 25 data yang digunakan, didapatkan hasil regresi linear sederhana yang ditunjukkan oleh **Gambar 4** berikut.



Gambar 4. Grafik korelasi nilai kandungan sulfur batu bara terhadap emisi gas SO₂ di PLTU "Lentera" periode Juni-Desember 2020.

Gambar 4 menunjukkan korelasi kandungan sulfur terhadap emisi gas SO₂ yang ditunjukkan oleh **Persamaan 5**. Regresi linear sederhana ini memiliki nilai koefisien korelasi $r = 0,87$ yang mengindikasikan bahwa kandungan sulfur pada batu bara dan produksi emisi gas SO₂ memiliki korelasi yang sangat kuat. Nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,76$ yang berarti 76,45% data yang digunakan menunjukkan korelasi regresi linear yang digambarkan sebagai **Persamaan 5**.

$$y = 1,707x + 118,74 \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

y = Nilai emisi gas SO₂ (mg Nm⁻³)

x = Kandungan sulfur pada batu bara (%)

Penentuan signifikansi dari korelasi ini dilakukan dengan analisis ragam menggunakan uji F. Uji F menguji signifikansi secara simultan dari pengaruh nilai kandungan sulfur terhadap emisi gas SO₂. Berdasarkan uji ini, didapatkan nilai $p=1,11 \times 10^{-8}$ yang menunjukkan nilai kurang dari nilai $\alpha=0,05$. Hal ini mengartikan bahwa kandungan sulfur secara signifikan mempengaruhi nilai emisi gas SO₂.

Berdasarkan **Persamaan 5**, maka kita dapat memperkirakan kandungan sulfur maksimal agar PLTU dapat memenuhi aturan PerMenLHK Nomor 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk memenuhi baku mutu emisi gas SO₂ pada PLTU sebesar 550 mg Nm⁻³, maka kandungan sulfur maksimal yang dapat digunakan adalah 0,25% dalam kondisi saat diterima (*as received*). Apabila PLTU masih menggunakan batu bara dengan kandungan sulfur >0,25%, maka diharapkan dapat menggunakan teknologi seperti *sea water desulfurization* untuk memenuhi regulasi yang disyaratkan.

3.3. Korelasi kandungan nitrogen terhadap emisi gas NO_x

Emisi gas NO_x yang terpantau oleh sistem CEMS dari batu bara yang dikirimkan melalui 31 pengiriman menunjukkan seluruh data kurang dari 749 mg Nm⁻³, sehingga seluruh nilai emisi gas NO_x digunakan dalam penentuan korelasi ini. Korelasi antara kandungan nitrogen pada batu bara dan produksi emisi gas NO_x dapat dilihat pada **Gambar 5** dan melalui persamaan linear pada **Persamaan 6** di bawah ini.

$$y = 903,49x - 319,29 \dots\dots\dots (6)$$

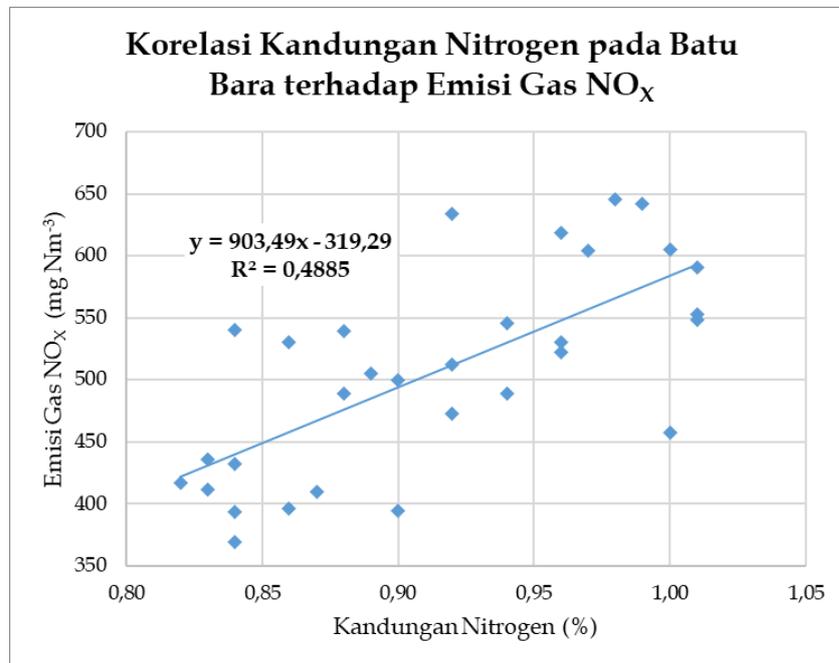
Keterangan:

y = Nilai emisi gas NO_x (mg Nm⁻³)

x = Kandungan nitrogen pada batu bara (%)

Korelasi tersebut menunjukkan nilai koefisien korelasi sebesar $r = 0,70$ yang berarti korelasi kuat ditunjukkan oleh nilai kandungan nitrogen terhadap emisi gas NO_x. **Gambar 5** juga menunjukkan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,48$ yang memberikan arti bahwa emisi gas NO_x hanya dapat dideterminasikan oleh data nilai kandungan nitrogen batu bara sebesar 48,85% dan 51,15% data digambarkan oleh faktor-faktor lain. Hal tersebut diartikan bahwa proses pembentukan emisi gas NO_x

secara *fuel* NO_x hanya berperan sebesar 48,85%, dan sisanya dimungkinkan terbentuk dari proses mekanisme termal NO_x , mekanisme *prompt* NO_x . Mekanisme pembentukan gas NO_x tersebut dipilih berdasarkan mekanisme pembentukan yang telah disampaikan oleh Nurhayati *et al.* (2021) dan Goswami *et al.* (2019) yaitu mekanisme termal NO_x , mekanisme *prompt* NO_x dan *fuel* NO_x .



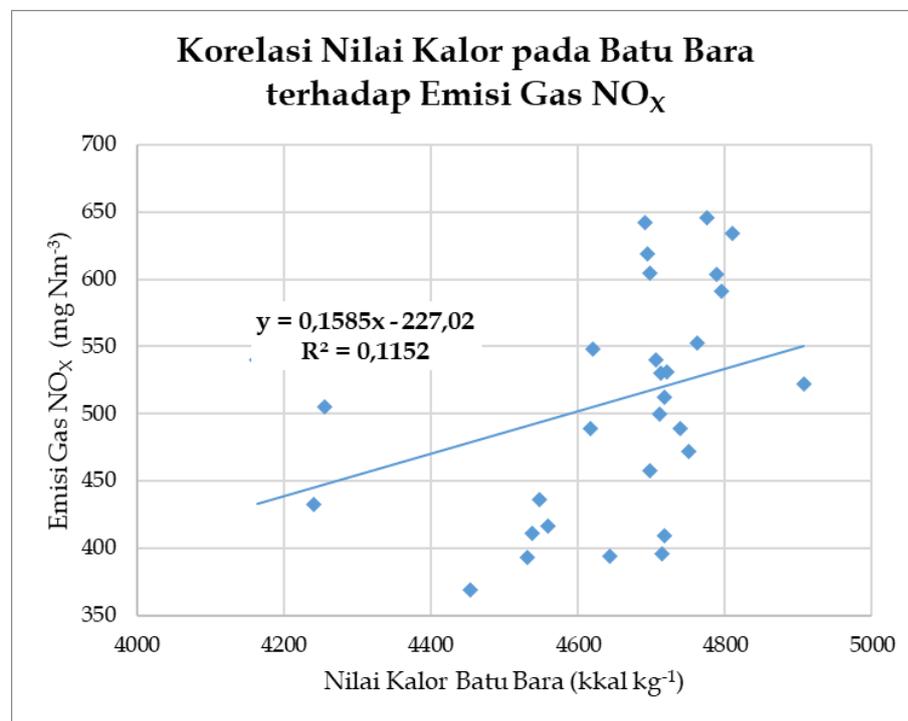
Gambar 5. Grafik korelasi nilai kandungan nitrogen batu bara terhadap emisi gas NO_x di PLTU "Lentera" periode Juni–Desember 2020.

Uji F dilakukan terhadap regresi linear sederhana antara nilai kandungan nitrogen dan emisi gas NO_x dalam analisis ragam. Nilai p dari uji F ini menunjukkan nilai $1,22 \times 10^{-5}$ yang lebih rendah dari nilai $\alpha = 0,05$. Hal ini menunjukkan nilai kandungan nitrogen pada batu bara secara simultan berpengaruh signifikan terhadap produksi emisi gas NO_x .

Berdasarkan **Persamaan 6**, peneliti mengestimasi kandungan nitrogen maksimum pada batu bara agar dapat memenuhi baku mutu emisi NO_x sebesar 550 mg Nm^{-3} sesuai PerMenLHK Nomor 15 Tahun 2019. Berdasarkan perhitungan tersebut, nilai kandungan nitrogen maksimal untuk memenuhi peraturan adalah 0,96%. Apabila masih menggunakan batu bara dengan kandungan nitrogen $>0,96\%$, PLTU dapat melakukan pengaturan pencampuran gas dalam sistem pembakaran atau menggunakan teknologi lainnya untuk mengurangi pelepasan gas NO_x hasil pembakaran.

3.4. Korelasi nilai kalor pada batu bara terhadap emisi gas NO_x

Kandungan amonia di batu bara dipengaruhi oleh besarnya kandungan karbon pada batu bara. Semakin besar kandungan karbon pada batu bara akan meningkatkan kandungan amonia (Flaig 1968). Kandungan karbon ini juga memiliki korelasi positif terhadap nilai kalor pada batu bara. Semakin tinggi kandungan karbon pada batu bara akan meningkatkan nilai kalor batu bara tersebut (Anshariah *et al.* 2020). Hal tersebut menjadi pendugaan bahwa nilai kalor dapat mempengaruhi produksi emisi gas NO_x akibat kandungan karbon di batu bara. Pendugaan tersebut dianalisis dengan menggunakan analisis regresi linear sederhana untuk mengungkap hubungan antara nilai kalor pada batu bara terhadap produksi emisi gas NO_x (**Gambar 6**).



Gambar 6. Grafik korelasi nilai kalor batu bara terhadap emisi gas NO_x di PLTU "Lentera" Periode Juni–Desember 2020.

Hasil analisis ini penting karena dapat menjelaskan keterkaitan antara karakteristik kimia batu bara dan dampak lingkungannya. Jika terbukti signifikan, maka nilai kalor dapat dijadikan salah satu indikator awal dalam memprediksi potensi emisi gas NO_x dari proses pembakaran. Dengan demikian, pengelolaan pasokan batu bara tidak hanya ditentukan oleh aspek efisiensi energi, tetapi juga perlu mempertimbangkan implikasi lingkungan.

Korelasi antara nilai kalor batu bara terhadap produksi emisi gas NO_x yang ditunjukkan oleh **Gambar 6** dapat pula direpresentasikan sebagai persamaan linear seperti yang disampaikan melalui **Persamaan 7**. Persamaan memiliki nilai koefisien korelasi sebesar $r = 0,34$ yang berarti korelasi antara nilai kalor dan produksi gas NO_x bersifat lemah. Koefisien determinasi bernilai $R^2 = 0,1152$, yang artinya hanya 11,52% data yang dapat menunjukkan hubungan antara keduanya. Nilai koefisien korelasi dan determinasi tersebut mengindikasikan hubungan sangat lemah antara kedua variabel.

$$y = 0,1585x + 227,02 \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan:

y = Nilai emisi gas NO_x (mg Nm⁻³)

x = Nilai kalor pada batu bara kkal (kg⁻¹)

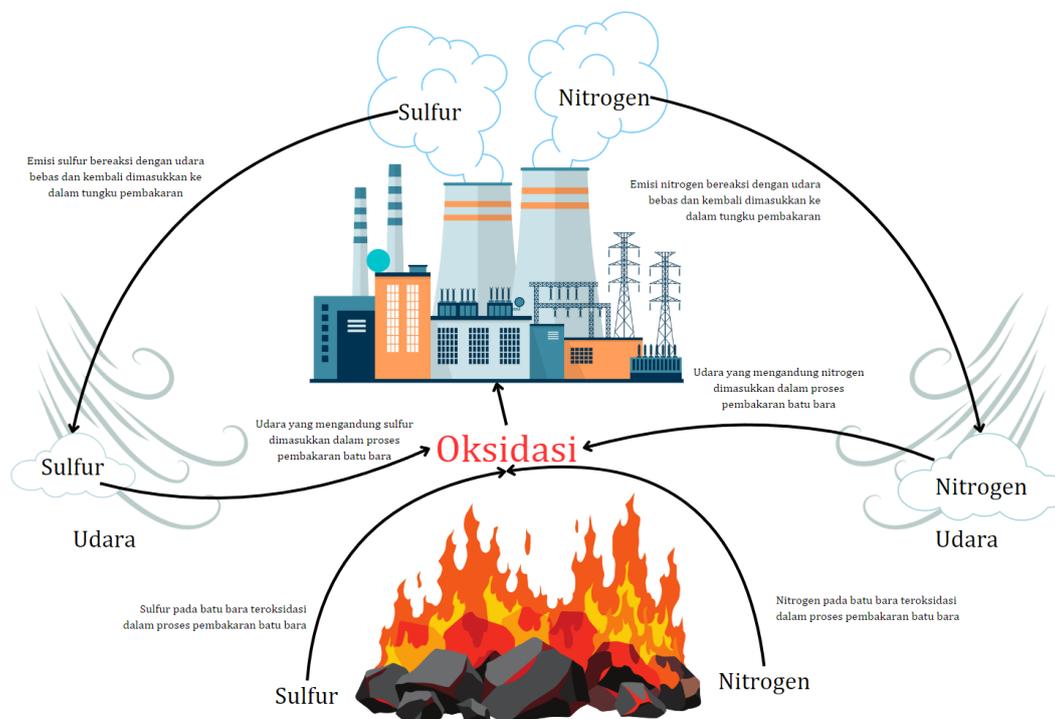
Walaupun korelasi antara nilai kalor terhadap emisi gas NO_x tergolong lemah, peneliti melakukan uji F untuk menentukan signifikansi simultan. Berdasarkan uji F tersebut, nilai p dari uji menunjukkan nilai 0,06 yang lebih besar dari $\alpha=0,05$. Hal tersebut menunjukkan bahwa kalor batu bara tidak berpengaruh signifikan terhadap produksi emisi NO_x. Tidak signifikannya nilai kalor terhadap produksi emisi gas NO_x mengindikasikan bahwa kandungan nitrogen pada batu bara dari Provinsi Sumatera Selatan dan Kalimantan Timur bukan berasal dari amonia, melainkan berasal dari protein tumbuhan dan organisme mikro pembentuk batu bara (Flaig 1968).

3.5. Evaluasi analisis statistik dalam model emisi gas SO₂ dan NO_x

Analisis regresi sederhana yang dilakukan menunjukkan adanya hubungan sebab-akibat antara kualitas batu bara (kandungan sulfur, nitrogen dan nilai kalor) terhadap produksi emisi gas SO₂ dan NO_x memiliki nilai intersep pada **Persamaan 5**, **Persamaan 6** dan **Persamaan 7**. Hal ini menunjukkan ambiguitas hasil analisis, contohnya pada **Persamaan 5** yang menunjukkan apabila batu bara memiliki kandungan sulfur 0%, maka batu bara tersebut akan menghasilkan emisi gas SO₂ sebanyak 118,74 mg Nm³. Kondisi ini mengindikasikan kemungkinan bahwa nilai intersep tersebut merepresentasikan hasil oksidasi sulfur yang tidak berasal dari batu bara, sebagaimana juga terlihat pada **Persamaan 6**. Dalam proses pembakaran batu bara, udara dimasukkan ke dalam tungku untuk menyediakan oksigen yang dibutuhkan dalam pembakaran. Namun, udara yang dimasukkan tidak hanya mengandung oksigen, terdapat pula kandungan nitrogen (78%), argon (0,9%) dan gas

lain (0,1%). Oksigen hanya terkandung sebanyak 21% (Joseph 2023). Kandungan nitrogen di udara yang dimasukkan dalam proses pembakaran mengindikasikan nilai intersep yang timbul pada **Persamaan 6**.

Kandungan sulfur di udara termasuk dalam kandungan gas lain (0,1%). Sulfur yang ada di atmosfer terbentuk dari aktivitas industri seperti pembakaran bahan bakar fosil (Thurston 2017). Selain itu, aktivitas letusan gunung api, juga dapat menjadi sumber sulfur pada udara bebas (Delmelle *et al.* 2015). Hal ini mengindikasikan bahwa sulfur yang dikandung udara bebas dapat mempengaruhi produksi emisi gas SO_2 walaupun batu bara tidak memiliki kandungan sulfur sebagai nilai intersep pada **Persamaan 5**. Kondisi ini dapat digambarkan secara skematik melalui **Gambar 7** di bawah ini.



Gambar 7. Model skematik pembentukan emisi gas SO_2 dan NO_x di PLTU "Lentera" periode Juni–Desember 2020.

Gambar 7 juga menunjukkan bahwa jika batu bara tidak memiliki nilai kalor, maka pembakaran batu bara tersebut juga dapat mempengaruhi produksi emisi gas SO_2 dan NO_x . Namun, hal ini membutuhkan penjelasan lebih lanjut mengenai pengaruh nilai intersep pada hubungan antara kualitas batu bara dan produksi emisi gas SO_2 dan NO_x . Metode statistik yang dapat digunakan untuk mempelajari lebih lanjut adalah regresi linear tanpa intersep.

Metode regresi linear tanpa intersep ini akan menjadikan variabel terikat bernilai 0 jika variabel bebasnya bernilai 0 atau tidak ada intersep pada persamaan garis linear. Haryadi (2017) mengajukan metode regresi linear tanpa intersep yang dapat diaplikasikan dalam banyak bidang, termasuk statistika. Namun, Kozak and Kozak (1995) memberikan catatan yang kuat apabila menemukan hasil regresi linear melewati titik original (tanpa intersep), maka hasil tersebut perlu diinterpretasikan lebih lanjut agar tidak menimbulkan kesalahan dalam pemahaman. Hal ini dikarenakan nilai koefisien determinasi (R²) akan meningkat dan analisis variasi (Uji F) akan meningkat, sehingga tidak dapat digunakan sebagai parameter dalam interpretasi hasil model regresi linear yang didapatkan.

Hal tersebut juga didukung oleh Othman (2014) yang menyatakan bahwa hasil model regresi linear tanpa intersep tidak dapat dianalisis berdasarkan koefisien determinasi dan analisis ragam untuk menentukan signifikansi variabel bebas terhadap variabel terikat. Namun, dalam konteks estimasi berdasarkan data statistik, hasil model regresi linear tanpa intersep cenderung memberikan hasil lebih baik dibandingkan dengan intersep, dengan catatan nilai intersep tersebut tidak signifikan. Berdasarkan keunggulan dalam estimasi, maka metode regresi linear tanpa intersep sering digunakan dalam beberapa bidang. Analisis hasil regresi linear tanpa intersep ini dapat menggunakan Indeks Haryadi yang diajukan oleh Haryadi (2017). Indeks ini menunjukkan tingkat kepercayaan dari regresi linear tanpa intersep yang dilakukan.

Indeks Haryadi ini dapat ditentukan menggunakan **Persamaan 8** dan **Persamaan 9**, sedangkan klasifikasi tingkat kepercayaan hasil regresinya dapat dilihat pada **Tabel 1**. Regresi linear tanpa intersep pada nilai kandungan sulfur, nitrogen dan nilai kalor batu bara terhadap produksi emisi SO₂ dan NO_x, dan hasil hitungan Indeks Haryadi ditampilkan sebagai **Tabel 2**.

$$HI = \frac{1}{N\{\sum_{i=1}^N + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (S_i - S_j)^2\}} ; i > j \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan:

HI = Indeks Haryadi

S_{ij} = Kemiringan persamaan linear atau koefisien regresi

N = Jumlah data

$$S_{i,j} = \frac{b_{i,j}}{\sum_{i,j=1}^N b_{i,j}} \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan:

b = koefisien persamaan garis lurus $y(x) = bx$

Tabel 1. Tingkat kepercayaan hasil regresi (Haryadi 2017).

Indeks korelasi	Tingkat kepercayaan hasil regresi
HI=1,00	Sempurna
0,95≤HI<1,00	Hampir sempurna
0,75≤HI<0,95	Kuat
0,60≤HI<0,75	Medium
0,50≤HI<0,60	Lemah
HI<0,50	Hampir salah
HI≤{(N-1)/2N}	Sudah pasti salah

Tabel 2. Hasil analisis regresi linear tanpa intersep dan Indeks Haryadi.

Variabel		Persamaan Linear	Indeks Haryadi	Tingkat kepercayaan hasil regresi
Bebas	Terikat	$y(x) = bx$		
Kandungan sulfur	Produksi emisi SO ₂	$y(x) = 2.222,6x$	0,39	Hampir salah
Kandungan nitrogen	Produksi emisi NO _x	$y(x) = 556,2x$	0,68	Medium
Nilai kalor	Produksi emisi NO _x	$y(x) = 0,2x$	0,58	Lemah

Tabel 2 di atas menunjukkan bahwa persamaan linear tanpa intersep pada hubungan kandungan sulfur dan produksi emisi gas SO₂ tidak dapat digambarkan dengan persamaan linear tanpa intersep. Indeks Haryadi pada hubungan kandungan sulfur dan produksi emisi SO₂ menunjukkan bahwa persamaan linear tanpa intersep yang terbentuk ($y(x) = 2.222,6x$) tidak dapat menjadi hasil yang terbaik untuk mewakili hubungan keduanya. Hal ini menunjukkan bahwa intersep pada Persamaan 2 adalah signifikan. Namun, hubungan kandungan nitrogen pada batu bara dan produksi emisi gas NO_x menunjukkan tingkat kepercayaan yang medium. Persamaan linear tanpa intersep ($y(x) = 556,2x$) ini dapat menggambarkan hubungan di antara keduanya yang menandakan intersep pada Persamaan 3 tidak signifikan. Di sisi lain, tingkat kepercayaan lemah ditunjukkan oleh persamaan linear tanpa intersep pada hubungan antara nilai kalor batu bara dan produksi emisi gas NO_x.

Namun, hasil tersebut belum sepenuhnya dapat mewakili dan menjadi patokan dalam memperkirakan produksi emisi gas. Kozak and Kozak (1995) telah menyampaikan bahwa regresi linear tanpa intersep ini hanya dapat digunakan pada data yang telah dibenarkan secara teori. Walaupun terkesan tidak memberikan arti yang mendalam pada interpretasi hasil, tetapi nilai intersep dibutuhkan untuk memperkirakan produksi emisi gas berdasarkan kualitas batu bara. Selain itu, pembentukan emisi gas juga dapat melalui beberapa cara yang menjadi pengaruh

intersep pada persamaan linear tersebut. Hal ini menjadi diskusi terbuka untuk menentukan metode yang tepat untuk memperkirakan kualitas batu bara yang dapat memenuhi peraturan pemerintah di PLTU "Lentera" ini.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian mengenai pengaruh kandungan sulfur dan nitrogen pada batu bara terhadap produksi gas SO₂ dan NO_x dengan studi di PLTU "Lentera" telah dilakukan dan menunjukkan bahwa pasokan batu bara di PLTU "Lentera" periode Juni–Desember 2020 dari Provinsi Kalimantan Timur memiliki kandungan sulfur, nitrogen dan nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan batu bara dari Provinsi Sumatera Selatan. Selain itu, terdapat korelasi positif antara kandungan sulfur dan emisi gas SO₂ yang menginformasikan bahwa kandungan sulfur akan meningkatkan produksi emisi gas SO₂. Korelasi positif antara kandungan nitrogen dan emisi gas NO_x juga ditunjukkan dengan menginformasikan bahwa semakin tinggi kandungan nitrogen akan meningkatkan produksi emisi NO_x. Namun, nilai kalor dan produksi emisi NO_x tidak menunjukkan korelasi yang kuat dan signifikan.

Peneliti menyarankan untuk selanjutnya dilakukan penelitian dengan mengaplikasikan metode statistik yang lain seperti *Principal Component Analysis* (PCA), sehingga dapat menganalisis lebih mendalam mengenai pengaruh seluruh komponen kualitas batu bara dari analisis proksimat dan ultimat terhadap produksi gas SO₂ dan NO_x.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti menyampaikan ucapan terima kasih kepada PLTU "Lentera" yang telah memberikan izin dan data dalam penelitian ini dan PT Surveyor Indonesia yang telah melakukan pengujian terhadap batu bara.

6. DAFTAR PUSTAKA

Anshariah, Imran AM, Widodo S and Irvan UR. 2020. Correlation of fixed carbon content and calorific value of South Sulawesi coal, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 473(1):012106. doi:10.1088/1755-1315/473/1/012106.

- Bittner A. 2022. Analysis-of-variance (ANOVA) assumptions review: normality, variance equality, and independence [Proceeding]. The XXXIVth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference:28–33.
- Bottle J and White ARJ. 2023. The coal handbook (Chapter 5 – coal analysis). Woodhead Publishing. Cambridge.
- Delmelle P, Maters E and Oppenheimer C. 2015. The encyclopedia of volcanoes (Chapter 50-Volcanic influences on the carbon, sulfur, and halogen biogeochemical cycles). Academic Press. New York.
- Flaig W. 1968. Origin of nitrogen in coals. *Chemical Geology* 3(3):161–187. doi:10.1016/0009-2541(68)90018-1.
- Goswami M, Volkov EN, Konnov AA, Bastiaans RJM and de Goey LPH. 2019. Updated kinetic mechanism for NO_x prediction and hydrogen combustion. Department of Mechanical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven.
- Gunawan W dan Gunawan BA. 2020. Studi efisiensi boiler terhadap nilai kalor batubara pada boiler jenis pulverizer coal kapasitas 300 T/H. *Jurnal Industri dan Teknologi Terpadu* 3(2):122–130. doi:10.47080/intent.v3i2.958.
- Haryadi S. 2017. Haryadi index and its applications in science of law, sociology, economics, statistics and telecommunication. Elex Media Komputindo. Jakarta.
- Idris M, Wibisono AP, Hermawan I, Iswandi dan Harahap UN. 2022. Analisis pengaruh ukuran batubara terhadap performa PLTU dengan jenis boiler tipe chain grate. *Journal of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy* 6(1):104-116.
- Joseph A. 2023. Water worlds in the solar system (Chapter 8-Surface environment evolution for Venus, Earth, and Mars—the planets which began with the same inventory of elements). Elsevier. Amsterdam.
- Kozak A and Kozak RA. 1995. Notes on regression through the origin. *The Forestry Chronicle* 71(3):326-330.
- Kurniawan D. 2008. Regresi linear. In: *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna.
- Liu P and Lv S. 2020. Measurement and calculation of calorific value of raw coal based on artificial neural network analysis method. *Thermal Science* 24(5B):3129–3137. doi:10.2298/TSCI191106087L

- Nurhayati A, Permadi DA dan Marganingrum D. 2021. Studi karakteristik emisi gas dari boiler industri berbahan bakar co firing batu bara dan briket BCF [Prosiding]. Prosiding FTSP Series 1:1-11.
- Nuryadi, Astuti TD, Utami ES dan Budiantara M. 2017. Dasar-dasar statistik penelitian. SIBUKU MEDIA. Yogyakarta.
- Othman SA. 2014. Comparison between models with and without intercept. *General Mathematics Notes* 21(1):118–127.
- Perdana AP. 2023. 99 PLTU batubara mengawali perdagangan karbon [internet]. Diakses di: <https://www.kompas.id/artikel/99-unit-pltu-mulai-terlibat-perdagangan-karbon>.
- PerMenLHK (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Tentang baku mutu emisi pembangkit listrik tenaga termal, Indonesia.
- PLTU "Lentera." 2021. Laporan izin lingkungan semester II tahun 2020 PLTU "Lentera." PLTU "Lentera". Provinsi Kepulauan Riau.
- Prawoto dan Rahman RA. 2021. Mesin konversi energi. Universitas Pancasila. Jakarta.
- PT Surveyor Indonesia. 2021. Sertifikat pengambilan sampel dan analisa. PT Surveyor Indonesia. Batam.
- Thurston GD. 2017. Outdoor air pollution: sources, atmospheric transport, and human health effects. *International Encyclopedia of Public Health* :367–377.
- Yuliani I, Maridjo and Abdul MM. 2019. Analisis sistem ruang bakar boiler jenis fluidized bed combustion untuk PLTU kapasitas 8 MW. *Jurnal Teknik Energi* 9(1):1–8. doi:10.35313/energi.v9i1.1638.